



Variabla hastighetsgränser för Stockholms motorvägsnät

Effekter av alternativa algoritmer
och möjligheter till styrning
genom skattade trafikillstånd

Ellen Grumert
Viktor Bernhardsson
Joakim Ekström
David Gundlegård
Rasmus Ringdahl
Andreas Tapani

Variabla hastighetsgränser för Stockholms motorvägsnät

Effekter av alternativa algoritmer och möjligheter till styrning genom estimerade trafikillstånd

Ellen Grumert

Viktor Bernhardsson

Joakim Ekström

David Gundlegård

Rasmus Ringdahl

Andreas Tapani

Författare: Ellen Grumert, VTI, www.orcid.org/0000-0001-5531-0274
Viktor Bernhardsson, VTI, www.orcid.org/0000-0003-0767-5169
Joakim Ekström, LiU, www.orcid.org/0000-0002-1367-6793
David Gundlegård, LiU, www.orcid.org/0000-0002-5961-5136
Rasmus Ringdahl, LiU, www.orcid.org/0000-0001-9142-8464
Andreas Tapani, VTI, www.orcid.org/0000-0001-9635-5233
Diarienummer: 2016/0153-7.1
Publikation: VTI rapport 1006
Omslagsbilder: Mostphotos
Utgiven av VTI, 2019

Referat

Variabla hastighetsgränser är väl utbredd på Stockholms stadsnära motorvägar och en del av Stockholms Motorway Control System (MCS). Målet med dagens system är att minska risken för olyckor och följdolyckor vid låga hastigheter, trafikstockningar m.m. Detta görs genom att mäta medelhastigheten med hjälp av fasta detektorer och uppdatera hastigheten som visas på variabla meddelandeskyltar utifrån rådande trafik tillstånd. I och med att efterfrågan på resor i Stockholm under rusningstid överstiger den tillgängliga kapaciteten i vägnätet är behovet av ett effektivt trafiksystem stort. Variabla hastighetsgränser kan bidra till ökad framkomlighet, men då dagens system har som målsättning att öka säkerheten är effekter som leder till ökad framkomlighet begränsade. Dessutom finns det i dagens system ett stort beroende av fungerande detektorer som mäter trafik tillståndet så korrekt som möjligt för att valet av hastighet ska kunna bestämmas på ett effektivt sätt.

Syftet med den här rapporten är att undersöka alternativa styralgoritmer för att bestämma variabla hastighetsgränser på Stockholms motorvägsnät. Målet är att öka framkomligheten jämfört med dagens system. Två olika sträckor med olika komplexitet, trafiksituation och problematik studeras. Valet av studerade styralgoritmer för de olika sträckorna väljs för att på bästa sätt motverka den problematiken som uppstår på de specifika sträckorna. Därmed kan val av algoritmer komma att skilja sig åt beroende på sträcka. I projektet utvärderas också om estimering av trafik tillståndet kan användas för att förbättra informationsflödet till algoritmerna då detektorer inte fungerar som de ska eller helt saknas, vilket i sin tur kan leda till förbättrad anpassning av de variabla hastighetsgränserna. Detta görs av för en av de studerade sträckorna. Styralgoritmerna utvärderas med mikroskopisk trafiksimulering och metoden utvecklad i projektet Mobile Millennium Stockholm (MMS), som bygger på en makroskopisk trafikflödesmodell och Kalman filtrering, används för estimering av trafik tillståndet.

Resultatet visar att det finns styralgoritmer med potential att öka framkomligheten. Valet av styralgoritm är dock beroende av typ av trafiksituation, vägdesignens komplexitet och trafikförhållanden på vägen. Det betyder att olika styralgoritmer kan prestera olika bra beroende på vilken vägsträcka man studerar. Vidare är estimering av trafik tillståndet användbart vid förlorad information på grund av icke-fungerande detektorer eller som komplement till detektorer för att minska mängden stationär utrustning.

Titel:	Variabla hastighetsgränser för Stockholms motorvägsnät: Effekter av alternativa algoritmer och möjligheter till styrning genom estimerade trafik tillstånd
Författare:	Ellen Grumert (VTI, www.orcid.org/0000-0001-5531-0274) Viktor Bernhardsson (VTI, www.orcid.org/0000-0003-0767-5169) Joakim Ekström, (LiU, www.orcid.org/0000-0002-1367-6793) David Gundlegård (LiU, www.orcid.org/0000-0002-5961-5136) Rasmus Ringdahl (LiU, www.orcid.org/0000-0001-9142-8464) Andreas Tapani (VTI, www.orcid.org/0000-0001-9635-5233)
Utgivare:	VTI, Statens väg och transportforskningsinstitut, www.vti.se
Serie och nr:	VTI rapport 1006
Utgivningsår:	2019
VTI:s diarienummer:	2016/0153-7.1
ISSN:	0347-6030
Projektnamn:	Trafikstyrning – Stockholms motorvägsnät
Uppdragsgivare:	Trafikverket via CTR (Center for Traffic Research)
Nyckelord:	Trafikstyrning, variabla hastighetsgränser, prediktiv styrning, mikroskopisk trafiksimulering, makroskopisk trafiksimulering
Språk:	Svenska
Antal sidor:	52

Abstract

Variable speed limits are commonly used on Stockholm's urban motorways, and it is part of the Stockholm Motorway Control System (MCS). The goal of today's system is to reduce the risk of accidents during congested conditions, traffic jams etc. This is done by updating the speed limits shown on variable message signs based on a measured average speed at fixed detectors. As the demand for travel in Stockholm during peak-hours exceeds the available capacity in the road network, the need for an efficient traffic system is high. Variable speed limit systems have the possibility to contribute to increased efficiency, but since today's system aims to increase safety, effects that lead to increased efficiency are limited. Further, in today's variable speed limit systems there are a large dependency of precise and available measurements from stationary detectors to be able to display speed limits that reflects the current traffic conditions. The purpose of this report is to investigate alternative control algorithms to decide on the variable speed limits to be displayed at variable message signs on the urban motorway of Stockholm.

The goal is to increase efficiency compared to today's system. Two different road stretches with different complexity and different traffic conditions, resulting in two different types of congestion, are studied. Thereby, the studied control algorithms on the two road stretches are chosen based on the possibility of solving a specific problematic traffic situation in the best way. Hence, the studied control algorithms might differ for the two road stretches. Furthermore, for one of the roads stretches it is investigated if estimation of the traffic state can be used as input to the control algorithm as a complement to missing and erogenous measurements from stationary detectors in order to improve the calculations of the variable speed limits. The control algorithms are evaluated with microscopic traffic simulation and the method developed in the project Mobile Millennium Stockholm (MMS), using a macroscopic traffic flow model together with a Kalman filter, is used for estimation of the traffic state.

The result shows that there are control algorithms with the potential to increase efficiency. However, the choice of suitable control algorithm for improving traffic efficiency is dependent on the traffic situation, the complexity of the road design and the traffic conditions. Furthermore, estimation of the traffic state is useful when information is lost due to malfunctioning detectors or as a complement to reduce the amount of stationary detectors.

Title:	Variable speed limits for Stockholm's urban motorways: Effects of different algorithms and the possibility to control by the use of estimated traffic states.
Author:	Ellen Grumert (VTI, www.orcid.org/0000-0001-5531-0274) Viktor Bernhardsson (VTI, www.orcid.org/0000-0003-0767-5169) Joakim Ekström, (LiU, www.orcid.org/0000-0002-1367-6793) David Gundlegård (LiU, www.orcid.org/0000-0002-5961-5136) Rasmus Ringdahl (LiU, www.orcid.org/0000-0001-9142-8464) Andreas Tapani (VTI, www.orcid.org/0000-0001-9635-5233)
Publisher:	Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) www.vti.se
Publication No.:	VTI rapport 1006
Published:	2019
Reg. No., VTI:	2016/0153-7.1
ISSN:	0347-6030
Project:	Traffic control on the Stockholm motorway network
Commissioned by:	Swedish Transport Administration through CTR (Center for Traffic Research)
Keywords:	Traffic control, variable speed limits, predictive control, microscopic traffic simulation, macroscopic traffic simulation
Language:	Swedish
No. of pages:	52

Förord

Denna VTI rapport presenterar en undersökning av hur olika styralgoritmer för att bestämma variabla hastighetsgränser påverkar framkomligheten på Stockholms stadsnära motorvägsnät. Rapporten presenterar också en utvärdering av hur estimerade trafikillstånd kan användas i algoritmen för att öka informationsflödet och på så sätt förbättra styrningen vid avsaknaden av detektorer eller då information från detektorer saknas. Resultaten är baserade på de trafiksimuleringsstudier som har gjorts inom ramen för projektet.

Projektet är finansierat av Trafikverket via CTR (Center for Traffic Research) och Tomas Julner har varit kontaktperson hos Trafikverket. Arbetet har genomförts av en arbetsgrupp bestående av Viktor Bernhardsson, Ellen Grumert och Andreas Tapani från VTI och Joakim Ekström, David Gundlegård och Rasmus Ringdahl från LiU (Linköpings Universitet). VTI har haft ansvaret för modellering, kalibrering, analys och dokumentering av den mikroskopiska trafiksimuleringen och LiU har haft ansvaret för modellering, kalibrering, analys och dokumentering av MMS-systemet. Sammankopplingen mellan den mikroskopiska trafikmodellen och MMS-systemet har varit ett gemensamt arbete.

En referensgrupp bestående av Tomas Julner (Trafikverket), Otto Åstrand (Trafik Stockholm), Beatrice Gustafsson (Trafik Stockholm), Alexander Nilsson (Trafik Stockholm) samt projekt-deltagarna har träffats kvartalsvis.

Linköping mars 2019

Ellen Grumert
Projektledare

Kvalitetsgranskning

Granskningsseminarium har genomförts 28 september 2018 där Sogol Kharrazi var lektor. Ellen Grumert har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus. Forskningschef Anderas Tapani har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering 12 mars 2019. De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning.

Quality review

Review seminar was carried out on 28 September 2018 where Sogol Kharrazi reviewed and commented on the report. Ellen Grumert has made alterations to the final manuscript of the report. The research director Andreas Tapani examined and approved the report for publication on 12 mars 2019. The conclusions and recommendations expressed are the authors' and do not necessarily reflect VTI's opinion as an authority.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	9
Summary	11
1. Inledning	13
2. Bakgrund	14
2.1. Variabla hastighetsstyrningssystem	14
2.1.1. Stockholmsalgoritmen (Motorway Control System (MCS))	14
2.1.2. Södertäljealgoritmen	15
2.1.3. Flaskhalsalgoritmen (Motorway Traffic Flow Control (MTFC))	15
2.2. Trafikstyrning baserat på estimerat eller predikterat trafikillstånd	16
2.2.1. Förskjutning av variabla hastigheter baserat på kunskap om trafikstockningens start	16
2.2.2. MMS-systemet för estimering och prediktering av trafikillstånd på Stockholms motorvägsnät	16
3. Ramverk för simuleringsbaserad utvärdering av VSL-system.....	19
4. Åtgärder för förbättrad framkomlighet förbi Stora Wäsby	21
4.1. Bakgrund.....	21
4.2. Simuleringsupplägg	22
4.3. Kalibrering	22
4.4. Resultat.....	26
5. Effekter av alternativa styralgoritmer, Håggvik – Eugeniattunneln.....	29
5.1. Bakgrund.....	29
5.2. Simuleringsupplägg	29
5.3. Kalibrering	30
5.4. Resultat variabla hastigheter	33
5.4.1. Kalibrerat nuläge utan variabla hastighetsgränser	33
5.4.2. Nuvarande MCS-systemet (tvingande).....	34
5.4.3. Södertäljealgoritmen (tvingande).....	35
5.4.4. Mainstream Traffic flow Control (tvingande)	36
5.4.5. Sammanställning av resultat från styralgoritmerna	37
5.5. Effekt av förskjutning av variabla hastighetsgränser	38
6. Styrning med begränsad tillgång till detektordata	41
6.1. Bakgrund.....	41
6.2. Simuleringsupplägg	41
6.3. Kalibrering	41
6.4. Resultat.....	43
6.4.1. MCS-algoritmen	44
6.4.2. Södertäljealgoritmen	45
7. Slutsatser och fortsatt arbete	48
Referenser	51

Sammanfattning

Variabla hastighetsgränser för Stockholms motorvägsnät: Effekter av alternativa algoritmer och möjligheter till användning av estimerade trafiktillstånd

av Ellen Grumert (VTI), Viktor Bernhardsson (VTI), Joakim Ekström (LiU), David Gundlegård (LiU), Rasmus Ringdahl (LiU) och Andreas Tapani (VTI)

Hastighetsstyrningssystem som bygger på variabla hastighetsgränser är ett av de mest vanligt förekommande trafikstyrningssystemen på svenska stadsmotorvägar. Systemet finns idag bland annat implementerat på en stor del av de stadsnära motorvägarna i och omkring Stockholm. Målet med systemet kan vara att öka säkerheten vid trängsel och olyckor eller att öka framkomligheten genom minskade restider, minskad fördröjning och ökade hastigheter. Systemet består av en styralgoritm som avgör vilken hastighet som ska visas på variabla meddelandeskyltar. Som input till algoritmen används ofta data från detektorer för att få en bild av hur trafiksituationen ser ut.

I den här rapporten utvärderas styralgoritmer som bestämmer vilka hastighetsgränser som ska visas på variabla meddelandeskyltar på två motorvägssträckor i Stockholm. Dessutom studeras hur estimerade trafiktillstånd kan användas som komplement till fasta detektorer uppsatta längs med vägen. Rapporten innehåller 3 delstudier: (1) en utvärdering av åtgärder för förbättrad framkomligheten på en motorvägssträcka norr om Stockholm (Stora Wäsby), (2) en utvärdering av alternativa styralgoritmer med fokus på framkomlighet för det hastighetsstyrningssystem som finns idag på en motorvägssträcka i centrala Stockholm (Häggvik-Eugeniattunneln) och där fokus i nuläget är på säkerhet och (3) en utvärdering av hur estimerade trafiktillstånd kan användas då detektordata saknas pga. exempelvis saknade detektorer eller felaktiga data från existerande detektorer.

I den första delstudien saknas idag ett hastighetsstyrningssystem så målet har varit att undersöka om variabla hastighetsgränser eller infrastrukturella förändringar kan förbättra framkomligheten under rusningstrafik, då man har en högt belastad trafiksituation men fortfarande ligger runt kapacitetsnivåer. Anledningen till att man vill förbättra framkomligheten på sträckan är att det uppstår daglig trängsel på sträckan utan några uppenbara orsaker, dvs. det är inga större olyckor eller liknande som gör att trafiken bryter samman. Detta gör att variabla hastighetsgränser anses som en lämplig åtgärd då de fungerar bra för att förebygga eller förskjuta sammanbrott i trafiken vid trafikflöden runt kapacitetsnivåer.

I den andra delstudien har målet varit att utvärdera om man skulle kunna öka framkomligheten med hjälp av alternativa styralgoritmer, då den styralgoritm som finns idag i hastighetsstyrningssystem har som mål att öka säkerheten vid trängsel och olyckor. Nuvarande styralgoritm har i tidigare studier inte visat på ökad framkomlighet och i vissa fall har man till och med sett en minskad framkomlighet. Dessutom studeras om en enkel prediktiv styrning kan förbättra framkomligheten, dvs. om man har kunskap om framtida trafiktillstånd kan man använda denna kunskap för att justera hastigheterna på ett mer sofistikerat sätt?

I den tredje delstudien har Mobile Millennium Stockholm (MMS)-systemet, som består av en makroskopisk trafikflödesmodell och Kalman filtrering för prediktering och estimering av trafiktillstånd, använts för att estimerade trafiktillstånd. På så sätt kan man utvärdera om estimering av trafiktillstånd kan användas som komplement till detektorer, då fasta detektorer saknas eller inte fungerar som de ska. Den mikroskopiska trafiksimuleringsmodellen över sträckan i den andra delstudien har använts för att jämföra styrningen med estimerade trafiktillstånd från MMS-systemet med styrningen baserat på fasta detektorer.

För att utvärdera de olika studerade styralgoritmerna i (1) och (2) har det mikroskopiska trafiksimuleringsverktyget Simulation of Urban MObility (SUMO) använts. De två motorvägssträckorna i

Stockholm har modellerats och kalibrerats utifrån tillgängliga data från fasta detektorer strax före, under och strax efter rusningstrafik. På så sätt kan man implementera och utvärdera olika styralgoritmer och den påverkan dessa har då lägre hastigheter är tillämpliga.

Då motorvägssträckorna för de två första delstudierna har väldigt olika egenskaper, såsom olika hastighetsgräns, olika belastningsgrad under rusningstrafik, olika komplexitet i nätverket (antal körfält, på- och avfarter, osv.), så kan man dra en hel del slutsatser om vad man bör tänka på då man implementerar olika styralgoritmer och vad man kan förvänta sig för resultat för olika typer av vägsträckor.

Resultatet visar att det finns styralgoritmer med potential att öka framkomligheten. Valet av styralgoritm är dock beroende av typ av trafiksituation, vägdesignens komplexitet och trafikförhållanden på vägen. Det betyder att olika styralgoritmer kan prestera olika bra beroende på vilken vägsträcka man studerar. Detta ses tydligt i resultaten då man jämför delstudie (1) och delstudie (2) och där motorvägssträckorna har väldigt olika egenskaper.

Estimering av trafiktillståndet är användbart vid förlorad information på grund av icke-fungerande detektorer eller som komplement till detektorer för att minska mängden stationär utrustning. Då man minskar andelen detektorer tappar man en del information vilket leder till att hastighetsgränserna inte sänks med samma precision. Trots det kan man dra slutsatsen att så länge estimeringen lyckas fånga upp trafiktillstånden med mest trängsel så är algoritmerna robusta med hänsyn till fördröjning, dvs. inga signifikanta skillnader i fördröjning har observerats vid olika andel detektorer. Däremot är valet av styralgoritm av större vikt då en signifikant minskning av fördröjningen observerats då man jämför styralgoritmen som har som mål att öka säkerheten med styralgoritmen som har som mål att öka framkomligheten.

Den enkla prediktiva styrningen visar inte på några större effekter med hänsyn till framkomlighet. Dock bör mer avancerad prediktiv styrning med MMS-systemet undersökas.

Hänsyn har inte tagits till de lagar och föreskrifter som skulle kunna begränsa valet av den hastighet som visas på de variabla meddelandeskyltarna vid olika tidpunkter. Mer studier behövs för att undersöka hur sådana begränsningar påverkar styrningen och därmed framkomligheten.

Summary

Variable speed limits for Stockholm's urban motorways: Effects of different algorithms and the possibility to use predictive control

by Ellen Grumert (VTI), Viktor Bernhardsson (VTI), Joakim Ekström (LiU), David Gundlegård (LiU), Rasmus Ringdahl (LiU) and Andreas Tapani (VTI)

Variable speed limit control systems are one of the most common traffic control systems on urban motorways in Sweden. The system is currently implemented on a large part of the urban motorways in and around Stockholm. The goal of the system is often to increase safety during congestion and accidents or to increase efficiency through a reduction of travel times, reduced delays and increased average speeds. The system consists of a control algorithm that determines the speed to be displayed on variable message signs. As input to the algorithm, data from detectors is often used as a representation of the current traffic situation.

In this report, we evaluate different control algorithms that determine which speed limits that are going to be displayed on variable message signs on two motorway sections in Stockholm. In addition, we study how estimated traffic conditions can be used as a complement to fixed detectors installed along the road. The report contains three sub-studies: (1) an evaluation of measures for improving the traffic efficiency of a motorway stretch north of Stockholm (Stora Wäsby), (2) an evaluation of alternative control algorithms with a focus on traffic efficiency for the variable speed limit system that is currently available on a motorway stretch in central Stockholm (Häggvik–Eugenia tunnel) and where focus is currently on safety and (3) an evaluation of how estimated traffic states can be used when data from stationary detectors is missing due to e.g. lack of detectors or incorrect data from existing detectors.

In the first sub-study, the road stretch does not have a variable speed limit system, hence the goal has been to investigate whether variable speed limits or infrastructural changes can improve traffic efficiency during peak-hour traffic, when the traffic flow is close to capacity levels. The reason for wanting to improve traffic efficiency on the considered motorway stretch is that daily congestion is observed without any obvious reasons, i.e. there are no major accidents/incidents that cause the traffic to break down. Therefore, variable speed limit systems are considered as a suitable measure, since they work well for preventing or prolonging a breakdown in traffic flows around capacity levels.

In the second sub-study, the aim has been to evaluate whether it would be possible to increase traffic efficiency by means of alternative control algorithms, since the control algorithm that exists on the considered motorway stretch today aims at increasing safety at congestion and during accidents. The current control algorithm has in previous studies not shown improvements in traffic efficiency and in some cases, even a reduced traffic efficiency has been observed. In addition, an investigation of whether a simple predictive control strategy can improve traffic efficiency or not is performed, i.e. can knowledge about future traffic states be used to adjust the variable speed limits in a more sophisticated way?

In the third sub-study, the Mobile Millennium Stockholm (MMS) system, which consists of a macroscopic traffic flow model and Kalman filtering for prediction and estimation of traffic states, has been used to estimate traffic states. In this way, it is possible to evaluate whether estimation of traffic states can be used as a complement to detectors, when fixed detectors are missing or not functioning properly. The microscopic traffic simulation model over the motorway stretch in the second sub-study has been used to compare using control strategies with estimated traffic states from the MMS system as input with using control strategies with traffic states based on fixed detectors as input.

In order to evaluate the considered control algorithms in (1) and (2), the microscopic traffic simulation tool Simulation of Urban MObility (SUMO) has been used. The two motorway stretches in Stockholm have been modeled and calibrated based on available data from fixed detectors just before, during and shortly after peak-hour traffic. In this way it is possible to implement and evaluate different control algorithms and the influence these have when lower variable speed limits are activated.

Since the motorway stretch for the first two sub-studies have very different properties, such as different speed limits, different demands during peak-hour traffic, different complexity in the network (number of lanes, on and off trips, etc.), conclusions can be drawn on the important characteristics to consider when implementing different control algorithms and what results that can be expected for different types of road sections.

The result shows that there are control algorithms with the potential to increase traffic efficiency. However, the choice of control algorithm depends on the type of traffic situation, the complexity of the road design and the traffic conditions on the road. This means that different control algorithms are expected to perform differently depending on the type of road stretch under consideration. This is clearly observed in the results when comparing sub-study (1) and sub-study (2), where the two considered motorway stretches have very different properties.

Estimation of the traffic states are useful for lost information due to non-functioning detectors or as a complement to detectors to reduce the amount of stationary equipment. When you reduce the proportion of detectors, you lose some information, which means that the variable speed limits are not lowered with the same precision. Despite this, it can be concluded that as long as the estimation succeeds in capturing the traffic states during the most congested periods, the algorithms are robust with regard to delay, ie. no significant differences in delay have been observed for different proportion of detectors. On the other hand, the choice of control algorithm is of greater importance, since a significant reduction in the delay is observed when comparing the control algorithm with the aim to increase traffic safety with the control algorithm with the aim to increase traffic efficiency.

The simple predictive control strategy does not show any major effects on traffic efficiency. However, more advanced predictive control strategies with the MMS system should be investigated.

Laws and regulations could limit the choice of variable speed limit to be displayed on the variable message signs at different times. This has not been taken into account in this study. More studies are needed to investigate how such restrictions affect the control strategy and thus traffic efficiency.

1. Inledning

Efterfrågan på resor i Stockholm under rusningstid överstiger kraftigt den tillgängliga kapaciteten i vägnätet. Detta gör att motorvägsnätet i Stockholm är hårt belastat med långa restider och miljöpåverkan som följd. Detta gör även att trafiksystemet blir väldigt känsligt för störningar där mindre incidenter kan ge långa köer som följd.

För att förbättra framkomligheten och öka trafiksäkerheten har Trafikverket investerat stora medel i ett system som bygger på kövarning och styrning med hjälp av variabla hastighetsgränser, ett så kallat Motorway Control System (MCS) (van Toorenburg och de Kok, 1999). Den algoritm som bestämmer vilken hastighet som ska visas på vägen har idag som främsta mål att öka trafiksäkerheten. Forskning om effekter av variabla hastighetsgränser visar dock på att alternativa styralgoritmer i MCS kan ge stora positiva framkomlighetseffekter i termer av reducerade restider och ökade medelhastigheter (Grumert, 2014). Grumert (2014) och Li m.fl. (2014) har även kunnat visa på en positiv påverkan på trafiksäkerhet för styralgoritmer som är fokuserade på ökad framkomlighet i trafiken. Det finns idag också planer på att ta fram bättre centraliserade styralgoritmer i MCS för att bättre kunna utnyttja både väg- och trafikstyrningsinfrastrukturen.

Som input till styralgoritmen används idag data från fasta detektorer som är placerade i nära anslutning till portalerna som visar de variabla hastighetsgränserna. Man kan dock tänka sig andra datakällor som input till styralgoritmen. Under de senaste åren har ett system för estimering och prediktering av trafikillståndet på Stockholms motorvägsnät byggts upp ”Mobile Millennium Stockholm (MMS)” (Allström m.fl., 2011). Systemet bygger på en makroskopisk trafiksimuleringsmodell och Kalman filtrering. Genom att utnyttja MMS vid styrning med variabla hastighetsgränser ges möjlighet till styrning baserat på ett predikterat eller estimerat trafikillstånd. Därigenom finns en potential till proaktiv ändring av variabla hastighetsgränser samt ökad robusthet i det variabla hastighetsstyrningssystemet då data från systemets detektorer kan ersättas med modellberäknade värden från MMS.

Den här rapporten redovisar resultat från Center for Traffic Research (CTR) -projektet ”Trafikstyrning Stockholms motorvägsnät” som genomförts av VTI och LiU under perioden 2016–2017. Projektet har haft två syften: (1) Undersöka potentialen att öka framkomligheten på Stockholms motorvägsnät genom användning av olika styralgoritmer i variabla hastighetsstyrningssystem och därmed identifiera hur olika egenskaper i trafikförhållandena påverkar valet av styralgoritm och (2) utvärdera hur ett estimerat eller predikterat trafikillstånd kan användas i variabla hastighetsstyrningssystem. För att uppnå projektets syfte har ett simuleringsbaserat utvärderingsramverk byggts upp som kombinerar mikroskopisk trafiksimulering med MMS-systemet. Ramverket har sedan tillämpats för att analysera effekter av variabla hastighetsgränser och styralgoritmer samt möjligheter till hastighetsstyrning baserat på ett predikterat trafikillstånd och för utvärdering av användningen av ett estimerat trafikillstånd som komplement till fasta detektorer.

Rapporten är organiserad på följande sätt. Kapitel 2 ger en bakgrund till system för variabla hastighetsgränser och MMS-systemet. Det simuleringsbaserade utvärderingsramverket presenteras sedan i kapitel 3. Därefter följer, i kapitel 4, en analys av variabla hastighetsgränser jämfört med infrastrukturåtgärder för förbättrad framkomlighet på E4 förbi Stora Wäsby. Kapitel 5 fortsätter sedan med en jämförelse av olika algoritmer för styrning genom variabla hastighetsgränser på sträckan Häggvik–Eugeniattunneln på E4 samt en utvärdering av en enklare prediktiv styrningsstrategi. I kapitel 6 utvärderas hur styrningen med variabla hastighetsgränser påverkas av användningen av estimerade trafikillstånd som ersättning till saknade detektordata. Rapporten avslutas därefter med generella slutsatser och förslag till fortsatt arbete.

2. Bakgrund

Det här kapitlet ger en bakgrund till variabla hastighetsstyrningssystem, tre styralgoritmer som analyseras och tillämpas i senare kapitel, samt MMS-systemet.

2.1. Variabla hastighetsstyrningssystem

Variabla hastighetsstyrningssystem bygger på en estimering av trafiktillståndet och en styralgoritm för att kunna bestämma vilken hastighet som ska tillämpas på vägen. Målet är oftast något av följande: (1) öka säkerheten genom att sänka hastigheten markant när en trafikstockning har inträffat och på så sätt reducera risken för följdolyckor (incidentdetekteringssystem) eller (2) minska risken för trafiksammanbrott genom att sänka hastigheten i relation till trafikflödet/medelhastigheten på vägen (homogeniseringssystem). Trafiktillståndet, såsom hastighet och flöde, mäts med hjälp av detektorer placerade med jämna mellanrum längs med den utrustade sträckan. Variabla meddelandeskyltar visar den hastighet som är tillämpbar. Styralgoritmen tillämpas för att kunna avgöra vilken hastighet som ska visas, dvs. val av hastighet sker automatiskt baserat på beräkningar utifrån förutbestämda styrstrategier och utan handpåläggning. Det finns en mängd olika algoritmer i litteraturen med olika grad av komplexitet.

Implementerade variabla hastighetsstyrningssystem bygger ofta på incidentdetektering, dvs. de är klassificerade som incidentdetekteringssystem, och hastigheten sänks mycket och då trafikstockning redan har inträffat. Trafikstockningen kan ha många orsaker, som till exempel en olycka, hinder på vägen, långsamtgående fordon, höga påfartsflöden. Vid så stora hastighetssänkningar kan man oftast inte uppnå ökad framkomlighet utan målet är främst att öka hastigheten (Maunsell och Parkman, 2007, Nissan och Koutsopoulos, 2011, van den Hoogen och Smulders, 1994).

En förutsättning för att ett variabelt hastighetsstyrningssystem ska kunna ha en positiv påverkan på framkomligheten är att kapaciteten åtminstone kan bibehållas vid mindre hastighetsnedsättningar, samtidigt som brytpunkten för trafiksammanbrott (kritisk densitet) förskjuts mot högre densitetsområden (Papageorgiou m.fl., 2008). System som bygger på denna typ av styralgoritm har som mål att uppnå jämnare (mer homogena) hastigheter mellan fordonen i trafikflödet och kallas därför ofta för homogeniseringssystem. Antalet fordon som samtidigt kan befinna sig på en sträcka ökar då, utan att trafiksammanbrott uppstår, och på så sätt kan man upprätthålla en god framkomlighet i termer av restider och medelhastigheter och man förskjuter eller i bästa fall undviker helt att reducera framkomligheten. Tidigare publicerade resultat (Papageorgiou m.fl., 2008) tyder på att det är möjligt att i vissa fall bibehålla eller till och med öka kapaciteten (maximalt antal fordon per timme), men det finns även fall där kapaciteten sänks. Vad som sker är beroende på utformning av vägen, nivån på hastighetssänkningen samt trafiksammansättningen.

I det här projektet har vi fokuserat på algoritmer med krav på lättillgängliga data från fasta detektorer som input och där algoritmerna ska vara snabba och intuitiva. De undersökta algoritmerna summeras övergripande nedan. Mer detaljerade beskrivningar för några av algoritmerna finns i Grumert (2014) samt i litteraturen tillhörande varje algoritm i delkapiteln nedan. Härefter förkortas variabla hastighetsstyrningssystem VSL-system efter de engelska orden Variable Speed Limit.

2.1.1. Stockholmsalgoritmen (Motorway Control System (MCS))

I Sverige finns variabla hastighetsgränser som en del av det motorvägsstyrningssystem (MCS) som finns implementerat i Stockholm och Göteborg. Systemet är ett incidentdetekteringssystem, dvs. målet är främst att öka säkerheten och det är först när väldigt låga hastigheter är uppmätta och en incident antas ha inträffat som algoritmen aktiveras. Stockholmsalgoritmen (van Toorenburg och de Kok, 1999) som är den algoritm som bestämmer vilken hastighet som ska visas på vägen är en så kallad gränsvärdesbaserad algoritm. Denna typ av algoritm är vanligast förekommande för variabla hastighetsstyrningssystem som finns implementerade runt om i världen. Andra exempel, utöver

Stockholm, där gränsvärdesbaserade algoritmer finns implementerade är systemet i London (Maunsell och Parkman, 2007) och Nederländerna (van den Hoogen och Smulders, 1994). Systemet justerar hastigheten baserat på uppmätt medelhastighet. Om medelhastigheten sjunker under ett visst gränsvärde så sänks hastighetsgränsen och liknande om hastigheten överstiger ett visst gränsvärde så höjs hastighetsgränsen till den faktiska hastighetsgränsen på vägen. Fasta detektorer och variabla meddelandeskyltar sätts upp med jämna mellanrum, dvs. flera sträckor kan ha lägre hastighetsgränser samtidigt. Ett vanligt avstånd mellan de fasta detektorerna och de tillhörande variabla meddelandeskyltarna är ca 300–1 000 meter. Också hastigheter närmast uppströms sänks för att få en gradvis sänkning av hastigheten. Ett annat vanligt förekommande gränsvärde som ofta används i kombination med den uppmätta medelhastigheten är ett uppmätt medeltrafikflöde. Detta används dock inte i dagens MCS system i Stockholm och Göteborg

2.1.2. Södertäljealgoritmen

För en delsträcka söder om Stockholm (Södertälje) har en alternativ algoritm, här kallad Södertäljealgoritmen, implementerats på försök i dagens motorvägsstyrningssystem (Movea, 2015). Målet med den alternativa algoritmen är att minska spridningen i hastigheter mellan fordon då trafikflödet ligger nära kapacitetsnivåer, dvs. ett homogeniseringssystem. På så sätt kan man minska instabiliteter i trafiken, vilket kan ge upphov till trafikstockning och incidenter. Man kan därmed förskjuta eller till och med undvika att få köer med låga hastigheter som följd av det höga trafikflödet. Också denna algoritm faller under typen gränsvärdesbaserad algoritm, men hastigheten sänks innan trafikstockning uppstår och hastighetsänkningen är betydligt mindre än för Stockholmsalgoritmen. Algoritmen har implementerats för två sträckor där man har detekterat dagliga problem med trafikstockning. Hastigheten för de utvalda sträckorna sänks med 20 km/h (från 100 km/h på Södertäljevägen) då medelflödet ligger på 80 % av den uppskattade kapacitetsnivån för trafikflödet och medelhastigheten ligger under 10 km/h från den uppskattade friflödes hastigheten. Kapacitetsnivå och friflödes hastighet är uppskattat baserat på historiska data. Den här algoritmen behöver anpassas till utvald sträcka, dvs. innan den kan användas måste kapacitetsnivåer och friflödes hastighet (alt. hastighetsgräns) fastställas. Man måste också avgöra för hur långa sträckor sänkt hastighet ska användas.

2.1.3. Flaskhalsalgoritmen (Motorway Traffic Flow Control (MTFC))

Flaskhalsalgoritmen bygger också på homogenisering av hastigheter mellan fordon (Müller m.fl., 2015) men den är koncentrerad kring en på förhand känd flaskhals, dvs. algoritmen används vid en återkommande flaskhals där man har stora problem med trafikstockning. Vanliga platser där algoritmen är till nytta är vid vävningsområden pga. en reducering av antalet körfält eller vid på- och avfarter. Målet med algoritmen är att kontrollera trafikdensiteten så att man undviker att hamna i instabila trafikillstånd. Detta görs genom att använda sig av ett målvärde som motsvarar den densitet som uppnås vid det högsta trafikflödet (kapacitetstrafikflödet), dvs. den kritiska densiteten. Algoritmen är reglerteknik-baserad och målet är att försöka kontrollera densiteten genom justeringar i hastighetsgränsen så att man inte överstiger målvärdet. Detta görs genom att använda sig av en I-regulator. Om felet mellan den uppmätta densiteten och den på förhand skattade densiteten vid kapacitetsnivåer (målvärdet) är stort och den uppmätta densiteten är större än målvärdet sänks hastighetsgränsen mycket och tvärtom.

För att inte få för stora eller för små justeringar i hastighet så viktas felet. Valet av vikt görs genom kalibrering och det är då viktigt att hitta en vikt som ger stabila justeringar, dvs. inte för stora svängningar i hastighetsgräns över tid. Ligger man under målvärdet används den faktiska hastighetsgränsen. Sänkta hastighetsgränser används för ett litet område ca 300 meter uppströms om flaskhalsen. Applikationsområdet är av ungefär 300 meter långt. Algoritmen kräver kalibrering av parametern som motsvarar vikten man lägger på det uppmätta felet och likaså målvärdet, dvs. den kritiska densiteten, behöver kalibreras för att spegla den aktuella platsen. Eftersom trafikdensitet ofta

är svårt att mäta kan man istället använda sig av procentuell andel av tiden ett fordon befinner sig på detektorn, beläggning på detektorn, som målvärde.

2.2. Trafikstyrning baserat på estimerat eller predikterat trafikillstånd

Att basera trafikstyrningen på färre detektorer och därmed estimerade istället för uppmätta hastigheter på vissa platser innebär ytterligare ett lager av filtrering av hastighetsdata, utöver den medelvärdesbildning som idag sker. Filtreringen minskar risken för att felaktiga mätningar får genomslag i styralgoritmen. Det finns flera motiv till att använda estimerade istället för uppmätta hastigheter i styralgoritmer i VSL-system:

1. Systemet blir mindre känsligt för bortfall av detektordata. På kort sikt innebär detta att systemet kan fortsätta att fungera som om fullständig uppsättning data finns tillgänglig. I ett längre tidsperspektiv innebär detta att man kan senarelägga underhåll av trasiga detektorer.
2. Systemet kan sättas i drift med ett reducerat antal detektorer.
3. Systemet kan drivas helt med probe-baserade data och i en framtid med uppkopplade fordon kan hastigheter direkt kommuniceras till fordonen. Detta möjliggör exempelvis att mer dynamiska VSL-system kan utvecklas som appliceras vid incidenter utan att ytterligare infrastruktur krävs.
4. Vanligen är detektorer och variabla meddelandeskyltar samlokaliserade. Med estimerade hastighetsgränser kan styralgoritmer tillämpas som tar hänsyn till vad som händer mellan de fasta mätstationerna, exempelvis vid incidenter.

2.2.1. Förskjutning av variabla hastighetsgränser baserat på kunskap om trafikstockningens start

Givet att man kan förutse framtiden och utslaget från VSL-systemet, dvs. när lägre hastigheter aktiveras, under hur lång tid sänkta hastigheter visas och med hur mycket sänkningen sker på enskilda sträckor i nätverket, skulle man kunna få en bild av det exakta VSL-schemat, dvs. vilka variabla hastighetsgränser som visas var och när de visas, för en viss situation. Man skulle därmed kunna testa om man genom att förskjuta detta schema skulle kunna få bättre utnyttjande av VSL-systemet. Det mest intuitiva vore att endast förskjuta schemat något framåt i tiden och därmed agera mer proaktivt och på så sätt försöka förhindra trafikstockningen att växa alltför mycket. Detta skulle kunna ses som en förenklad prediktion där man endast tar hänsyn till och predikterar när trafikstockningen startar och använder det VSL-schema som man tror passar bäst för hela perioden med trafikstockning. Man bör dock notera att genom att förskjuta styrningen förändrar man trafikförhållandena på sträckan och man bör därför överväga att göra kontinuerliga uppdateringar av VSL-schemat för att anpassa det till den förändrade trafiksituationen.

2.2.2. MMS-systemet för estimering och prediktering av trafikillstånd på Stockholms motorvägsnät

Idag utgår det befintliga systemet för variabla hastighetsgränser i Stockholm från fasta radardetektorer som mäter hastighet (medelvärdesbildat över en minut) och flöde (i antal fordon per minut). Redan idag finns ytterligare data tillgänglig i Stockholm, genom upphandlade restider från probedata, dvs. fordons position vid specifika tidpunkter används för att estimerar restiden, samt restider från Bluetooth detektorer. I framtiden kan man förvänta sig att mängden trafikdata ökar ytterligare men också att heterogeniteten i data blir större, dvs. det blir en mix av olika typer av data som beskriver trafikillståndet utifrån olika dimensioner. Det finns därför ett behov av att utifrån de olika typerna av datakällor extrahera ett samstämmigt trafikillstånd. Utifrån detta behov har ett ramverk för fusionering av trafikdata utvecklats inom ramen för projektet Mobile Millennium Stockholm (Allström m.fl., 2011), som möjliggör både estimering av nuvarande trafikillstånd och prediktion av framtida

trafiktillstånd. Ramverket finns idag implementerat som ett prototypsystem (MMS-systemet) för delar av Stockholms motorvägsnät.

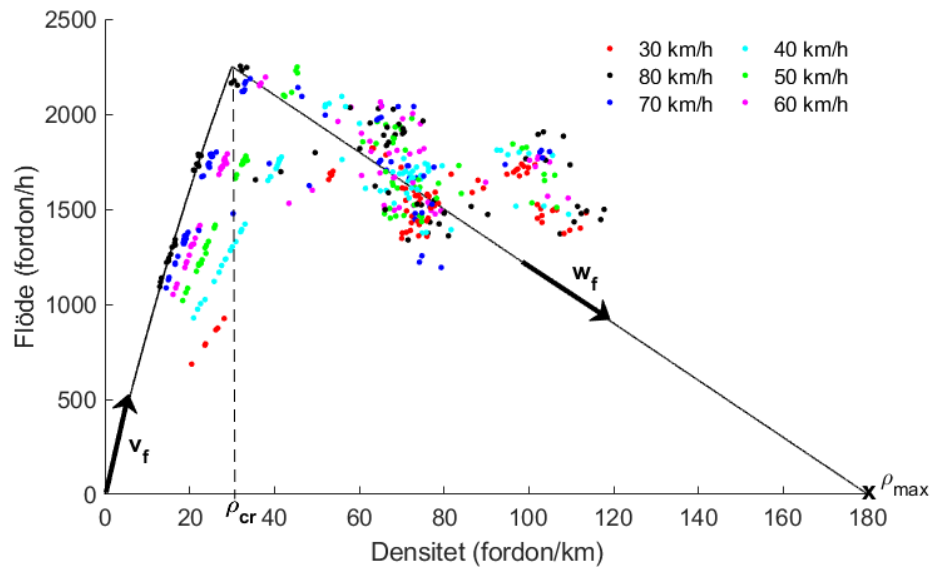
MMS-systemet bygger på en kombination av Kalmanfiltrering och en makroskopisk trafikflödesmodell. På så sätt kan olika typer av trafikmätningar användas tillsammans för att estimeras och prediktera trafiktillståndet, utan att heltäckande information från detektorer finns tillgänglig för hela vägsträckan. Fusioneringsmodellen som används har tidigare beskrivits av Antoniou m.fl. (2010) och Bayen m.fl. (2011). Systemet är utvecklat för att kunna köras i realtid, och kan utnyttja flera typer av sensordata (exempelvis fasta detektorer och olika typer av probe-data).

I MMS-systemet används en trafikflödesmodell för att propagera flödet utmed en vägsträcka. Detta möjliggör en beskrivning av trafiktillståndet på delar av vägnätet som saknar trafikdata, samt prediktering av framtida trafiktillstånd. För estimering kombineras modellens estimering med trafikdata för att ge bästa möjliga beskrivning av nuvarande trafiktillstånd. De två trafiktillstånden som modelleras i den makroskopiska trafikflödesmodellen är ”flödande” och ”trängsel”. Inflöde och utflöde beräknas för korta sektioner, så kallade celler, där mängden flöde som kan propagera är beroende på trafiktillståndet nedströms. Relationen mellan hastighet och densitet beskrivs i en sådan modell av ett så kallat fundamentaldiagram. Detta diagram innefattar en matematisk beskrivning av hur hastighet relaterar till densitet (och även flöde). Den version av makroskopisk trafikflödesmodell som används i MMS-systemet använder fundamentaldiagram som har en linjär form under friflödesförhållanden och en hyperbolisk form under trängselförhållanden. Relationen mellan hastighet v och densitet ρ ges av:

$$v(\rho) = \begin{cases} v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) & \text{om } \rho \leq \rho_{cr} \\ -w_f \left(1 - \frac{\rho_{max}}{\rho}\right) & \text{annars,} \end{cases}$$

där ρ_{cr} är den kritiska densiteten, ρ_{max} den maximala densiteten då fordon står stilla i kö, v_f friflödes hastigheten och w_f chockvågshastigheten. Kalibrering av de tre parametrarna krävs för att anpassa diagrammet till en specifik vägsektion baserat på de uppmätta sambanden. Figur 1 visar ett exempel på hur det hyperboliska fundamentala diagrammet kan se ut för hastighetsgränsen 80 km/h (heldragen linje) när det har kalibrerats gentemot tillgängliga data (punkter). Hastighets- och flödesdata har använts för att kunna skatta relationen mellan flöde och hastighet med hjälp av det hyperboliska fundamentaldiagrammet. Kritisk densitet, friflödes hastighet och chockvågshastighet finns markerat i figuren.

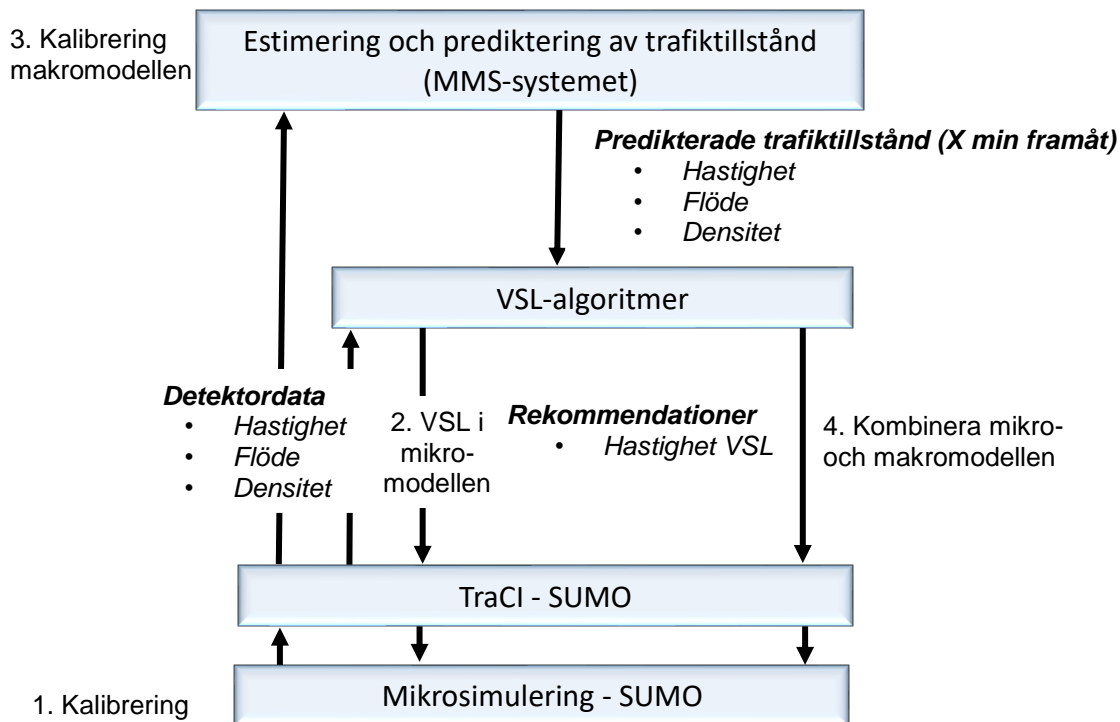
Kritisk densitet avser den densitet vid vilket flödet är som högst (dvs. kapacitetsflöde), vilket sammanfaller med den punkt där trafiktillståndet övergår från ett ”flödande” till ”trängsel”. Kritisk densitet fås därmed genom att studera densiteten vid brytpunkten mellan de två kontinuerliga funktionerna. Det är också där som kapaciteten (maximalt trafikflöde) återfås. Chockvågshastighet är den hastighet med vilken gränsen mellan två trafiktillstånd förflyttar sig, exempelvis med vilken hastighet en kö breder ut sig. Chockvågshastigheten illustreras av lutningen i trafiktillståndet med trängsel i det hyperboliska fundamentala diagrammet. Den maximala densiteten återfås då flödet är noll, dvs. då fordon på vägen står stilla. För en vägsträcka med variabla hastighetsgränser kommer en förändrad hastighet att leda till ett förändrat fundamentaldiagram, vilket också ses genom att studera mätpunkterna i Figur 1. Således behöver dessa funktionssamband finnas skattade för en samtliga förekommande hastighetsbegränsningar.



Figur 1. Exempel på mätdata för en detektorstation (punkter) och hur det skattade fundamental diagrammet för hastighetsgränsen 80 km/h kan se ut (linje).

3. Ramverk för simuleringsbaserad utvärdering av VSL-system

I detta projekt har ett ramverk för simuleringsbaserad utvärdering av VSL-system utvecklats. Ramverket bygger på mikrosimuleringsverktyget Simulation of Urban MObility (SUMO), och för estimering och prediktering av trafikillstånd används MMS-systemet. Detta möjliggör utvärdering av olika VSL-algoritmer i VSL-systemet samt att funktionalitet från MMS-systemet kan utvärderas i en simuleringsmiljö för första gången.



Figur 2. Ramverk över simulering av VSL.

Figur 2 visar hur ramverket är uppbyggt. Boxarna illustrerar de olika komponenter som ramverket är uppbyggt av och de steg som krävs för att ha ett fungerande ramverk är numrerade från 1–4. Stegen är numrerade efter den arbetsordning som är bäst lämpad. Då steg 1 och 2 är på plats finns en färdig mikroskopisk trafikmodell med möjlighet till utvärdering av de VSL-algoritmer som har implementerats. Steg 3–4 möjliggör användandet av estimering och prediktering av trafikillstånd.

Den nedersta boxen, Mikrosimulering – SUMO, utgör grunden för ramverket. Mikrosimuleringen representerar den verkliga trafiksituationen som används för att utvärdera effekten av tilltänkta åtgärder med VSL. Den mjukvara som används för simuleringen är Simulation of Urban Mobility (SUMO) (Krajzewicz m.fl., 2012, DLR and contributors, 2017).

Nätverket i mikrosimuleringen innehåller likvärdig infrastruktur gällande vägutformning och detektorportaler, som i verkligheten. Modellen är kalibrerad (Steg 1) för att i största möjliga mån återspegla den trafiksituation som råder på den berörda sträckan i dagsläget. Då data i de båda fallen är medelvärdesbaserad och i ena fallet endast baserat på glest placerade detektorer, samt endast baserat på data från ett fåtal dagar, ger de ingen heltäckande bild av hur trafiken beter sig. Det saknas dessutom data på hur individuella fordon beter sig, vilket försvårar kalibrering av detaljerat förarbeteende avseende exempelvis accelerationsbeteende och önskad hastighet. Målet med kalibreringen har därför främst varit att de båda sträckorna som har använts för utvärdering och för att beskriva verkligheten i stort ska representera en trafiksituation då problem uppstår, dvs. då trafikstockning råder och ett VSL-system har potential att förbättra trafikförhållanden på vägen. Simuleringsmodellen har främst jämförts med

data för att reflektera kö-uppbyggnad, kapacitetsnivåer (hur många fordon som maximalt kan passera en viss plats vid en viss tidpunkt), ungefärliga medelhastigheter och flödesnivåer och inte för att så exakt som möjligt representera en viss dag. Vidare har visualiseringen av simulering studerats för att säkra ett realistiskt beteende bland fordonen i simuleringen. Vid modellering av köuppbyggnad till följd av på- och avfartsramper har modelleringen av vävningsbeteendet stor betydelse och därför har störst fokus legat på att modellera köfälsbyten realistiskt. Utifrån det har sedan simuleringsmodellen representerat verkligheten och olika VSL-system har jämförts med hjälp av den simulerade verkligheten. För att kommunicera med mikromodellen används ett gränssnitt som benämns Traffic Control Interface (TraCI), se Box TraCI – SUMO i Figur 2. Gränssnittet möjliggör att hämta och skriva data från mikrosimuleringen. Via gränssnittet går det alltså att styra förutsättningarna i mikrosimuleringen, vilket i detta fall innebär att justera hastighetsgränsen för länkarna i nätverket. Data som hämtas från mikrosimuleringen är detektordata samt information om nuvarande hastighetsgräns för olika länkar, vilket används som input i VSL-algoritmen samt för predikeringen av trafikillstånd.

Boxen Estimering och prediktering av trafikillstånd (MMS-systemet) kan användas, men är inte nödvändig, för beräkning av hastigheter. Dock kan man genom att prediktera trafikillståndet få tillgång till mer information om hur framtida trafikillstånd ser ut baserat på nuvarande kunskap. Detta kan användas som en extra informationskälla för att avgöra vilken hastighet som ska visas och på så sätt möjligtvis öka nyttan av en hastighetsförändring genom mer kunskap om framtiden. Ramverket ger en möjlighet för att utvärdera denna nytta. Man kan också använda sig av estimering av trafikillstånd för att få kunskap om vad som sker mellan detektorer för att bättre anpassa hastighetsförändringarna. Makromodellen som används vid estimering och prediktering är kalibrerad gentemot verkligheten som representeras av mikromodellen, både med och utan ett VSL-system (Steg 3). För att estimeringen och predikeringen ska vara användbar och kunna användas som input i VSL-algoritmen krävs alltså att ett VSL-system finns implementerat i den simulerade verkligheten.

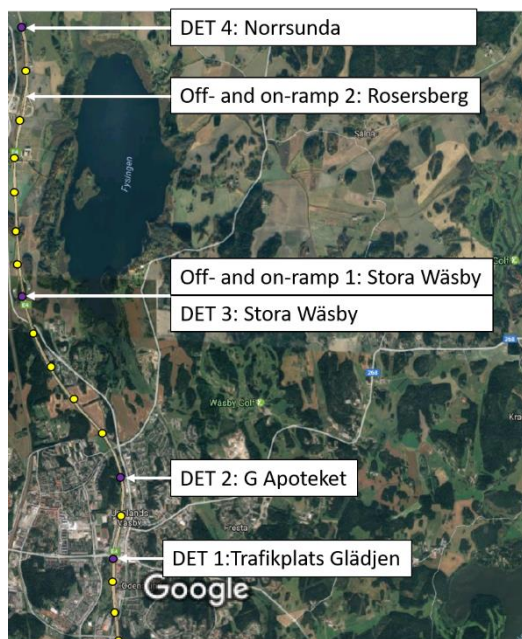
Algoritmerna som beräknar de variabla hastighetsgränserna, Box VSL-algoritmer i Figur 2 använder detektordata från mikrosimuleringen i form av hastighet, flöde samt densitet för beräkning av skyltad hastighet samt estimerat eller predikerat trafikillstånd ifall detta används som input i VSL-algoritmen. Algoritmerna är kodade i Matlab/Python och kommunicerar aktuella hastigheter samt detektordata från mikrosimuleringen via TraCI. I denna box är det viktigt att Steg 2 och eventuellt Steg 4 är på plats. I Steg 2 implementeras de VSL-algoritmer som ska utvärderas. Denna rapport inkluderar tre mer avancerade algoritmer och ett första försök till att använda sig av förhandskunskap av hur trafiksituationen ser ut genom att tidigarelägga sänkningen av hastigheten då man vet att trafikstockning snart uppstår. För mer information kring dessa algoritmer se Kapitel 2.1. I Steg 4 möjliggörs kommunikation mellan mikromodellen och makromodellen under simuleringen. Detta behövs då den simulerade verkligheten ska kunna ge detektordata som input till predikeringen och de predikerade tillstånden ska kunna kommuniceras till VSL-algoritmen för beräkning av aktuell hastighet som sedan ska kommuniceras tillbaka till mikromodellen så att hastigheterna på länkarna kan korrigeras.

4. Åtgärder för förbättrad framkomlighet förbi Stora Wäsby

Detta delkapitel beskriver en delstudie som har gjorts inom ramen för projektet. Syftet med denna studie har varit att undersöka hur och om variabla hastighetsgränser kan användas för att öka framkomlighet på en motorvägssträcka i Stockholm samt att undersöka ifall variabla hastighetsgränser kan öka framkomligheten i likhet med förändringar i väginfrastrukturen.

4.1. Bakgrund

I störningsrapporten från 2015 (Lucero och Åstrand, 2016) framkom det att en sträcka norr om Stockholm mellan Upplands Väsby och Rosersberg har stora problem med framkomlighet under rusningstrafiken, både i södergående (morgon) och norrgående (eftermiddag) riktning. Se Figur 3 för en illustration över sträckan.



Bilder ©2017 CNES / Astrium, DigitalGlobe, Kartdata ©2017 Google

Figur 3. Illustration över sträckan mellan Upplands Väsby och Rosersberg. Lila markeringar representerar de detektorer som finns på sträckan och gula markeringar representerar de detektorer som är tillagda i simuleringarna för att få mer detaljerad information över sträckan.

Tidsintervallet och omfattningen på trafikstockningen varierar mellan dagar och det finns inga uppenbara orsaker, såsom incidenter eller liknande, som förklaringar till sammanbrotten. Genom att observera data från de detektorer som finns tillgängliga på sträckan (markerade med lila i Figur 3) kan man dra slutsatsen att problemen verkar uppstå som ett resultat av vävningsbeteendet vid på- och avfarten vid Stora Wäsby och Rosersberg. Vidare verkar det som om man ligger nära kapacitetsnivåer vid sammanbrott och efter sammanbrott, dvs. åtgärder som syftar till att öka framkomligheten genom att justera hastigheten eller på annat sätt kontrollera trafikflödet har potential att förbättra framkomligheten. Ett antal åtgärder för att öka framkomligheten över sträckan finns föreslagna i Störningsrapporten 2015,

1. **Variabel hastighetsgräns** med motivationsskylt.
2. **Sänkt hastighetsgräns** på sträckan Tpl Glädjen–Tpl Rosersberg.
3. **Utökad kapacitet** Stora Wäsby–Rosersberg resp. Stora Wäsby–Glädjen.
4. **Stäng trafikplats Stora Wäsby** i båda riktningar.

Dessa åtgärder har studerats med hjälp av mikroskopisk trafiksimulering. Ytterligare två variabla hastighetsstyrningssystem, MCS (5) och MTFC (6), har studerats för att se om algoritmer som bättre speglar trafikförhållandena på vägen lyckas öka framkomligheten mer än de naiva strategierna som bygger på att man sänker hastigheten med ett fixt värde oberoende av hur trafiksituationen ser ut. Kraven på väg och teknikinfrastrukturen summeras i Tabell 1.

Tabell 1. Krav på väg- och teknikinfrastrukturen.

Åtgärd	Väggeometri	Utrustning
Sänkt hastighetsgräns	-	20 variabla meddelandeskyltar
Utökad kapacitet	2.5 km ombyggnation från 2 till 3 körfält mellan St. Wäsby och Rosersberg	-
Stäng tlp. St. Wäsby	Stänga av av- och påfart vid St. Wäsby	-
Variabel hastighetsgräns (MCS algoritm)	-	20 variabla meddelandeskyltar och 20 detektorer
Variabel hastighetsgräns (flaskhalsalgoritm)	-	1 variabla meddelandeskylt och 5 detektorer

4.2. Simuleringsupplägg

En mikrosimuleringsmodell har byggts upp över den aktuella sträckan och simuleringar har genomförts med det mikroskopiska trafiksimuleringsverktyget SUMO. Simuleringsperioden representerar trafiksituationen under eftermiddagsrusningen mellan klockan 15:00–18:30. Studien fokuserar på framkomlighet genom att studera totala restiden och medelhastighet över tid, men också variation i hastighet har studerats som en indikation på hur homogen trafiksituationen är och därmed hur stor risken är för incidenter. Vid en stor hastighetsspridning ökar risken för incidenter på grund av omkörningar, plötsliga inbromsningar, etc. Genom att minska spridningen i hastighet skulle man därmed kunna öka säkerheten. Spridningen i hastighet för segment s beräknas med måttet Coefficient of Variation in Speed (CVS) som

$$CVS_s = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{t,i}}{v_{t,i}}$$

n är antalet körfält och t är tidpunkter då medelhastigheter, $v_{t,i}$, och standardavvikelser av hastigheter, $\sigma_{t,i}$, registreras under simuleringen. Då simuleringsmodellen är en stokastisk process, tillämpades 10 upprepningar för att säkerställa att skillnader i resultat inte beror på slumpmässiga variationer.

4.3. Kalibrering

Givet hastighets och flödesdata samt fördelningen av friflödes hastigheter mellan olika fordonsklasser från fasta radardetektorer har ett grund scenario kalibrerats i det mikroskopiska trafiksimuleringsverktyget SUMO. Tabell 2 visar den data som har använts som input till modellen.

Tabell 2. Dataunderlag som har används som input till simuleringsmodellen över Stockholm Norr

Input till modellen	Type av data	Aggregering/mått
Inlödesprofiler	Stationära radardetektorer	Inflöde (fordon/15min) vid påfarter och vid starten av den simulerade sträckan
Svängandel vid avfarter	Stationära radardetektorer, samt räkning med tillfällig detektor vid specifika avfarter	Andel fordon som svänger vid avfarter (%)
Fordonssammansättning	Fordon-för-fordondata vid friflödesförhållanden för en dag från stationära radardetektorer	Andelen fordon som hör till fordons-typerna: personbil, lätt lastbil, lastbil/ bussar och lastbil med släp (% per fordonstyp)
Hastighetsfördelning per fordonstyp	Fordon-för-fordondata vid friflödesförhållanden för en dag från stationära radardetektorer	Medelhastighet (km/h) och standardavvikelse i hastighet (km/h) per fordonstyp

Fördelningen av hastigheter för olika fordonsklasser har beräknats utifrån fordon-för-fordon data och ses i Tabell 3. Den faktiska hastigheten på sträckan är 110 km/h och fordon antas följa den angivna hastighetsgränsen (variabel eller fast) utifrån de fördelningar som anges i tabellen, dvs. vissa fordon kör snabbare och andra långsammare än angiven hastighetsgräns. Den fordonssammansättning och de hastighetsfördelningar som anges i Tabell 3 används som input i simuleringsmodellen. Medelhastigheten från radardetektorerna ses i Figur 4(a).

Tabell 3. Fördelning av friflödes hastighet mellan fordonsklasser

Fordonsklass	Tillåten hastighet (km/h)	Fordonslängd (m)	Medelhastighet (km/h)	Standardavvikelse av hastighet (km/h)	Fordons-sammansättning (%)
0	110	0–8	109	13.13	91
1	90	8–12.5	92	10.33	5
2	90	12.5–24	90	8.35	3
3	80	24–36.5	88	5.55	1

Dataunderlaget har använts som input till simuleringsmodellen. I simuleringsmodellen har sedan ett antal fordonsspecifika parametrar kalibrerats för att återspegla köppbyggnaden och de flaskhalsar som uppstår vid Rosersberg och St. Wäsby i enlighet med mätdata från radardetektorer. De parametrar som har kalibrerats är relaterade till car-following modellen, dvs. hur fordon anpassar sig till framförvarande fordon, samt körfältsbytesmodellen som modellerar hur fordon byter körfält. Först har standardparametrarna som reglerar beteendet vid acceleration och inbromsning justerats ner avsevärt för att ge ett mer realistiskt beteende när det gäller inbromsningar och accelerationer. Därefter kan man genom att studera flödesnivåerna och medelhastigheten från data (se Figur 4(a) för data över medelhastigheten) och jämföra det med den okalibrerade modellen (se Figur 4(b) för medelhastighet från modellen) dra slutsatsen att simuleringsmodellen med standardparametrar ger en alltför hög kapacitet, dvs. fordon kan obehindrat färdas över sträckan och trafikstockning uppstår inte för de angivna inflödena, svängandelarna, fordonssammansättningen och hastighetsfördelningen per fordonstyp. Det är därför nödvändigt att justera körfältsbytesmodellen samt parametrar som påverkar när ett fordon väljer att byta körfält, dvs. minsta gap till framförvarande fordon vid trafikstockning och önskade tidsluckor till framförvarande fordon.

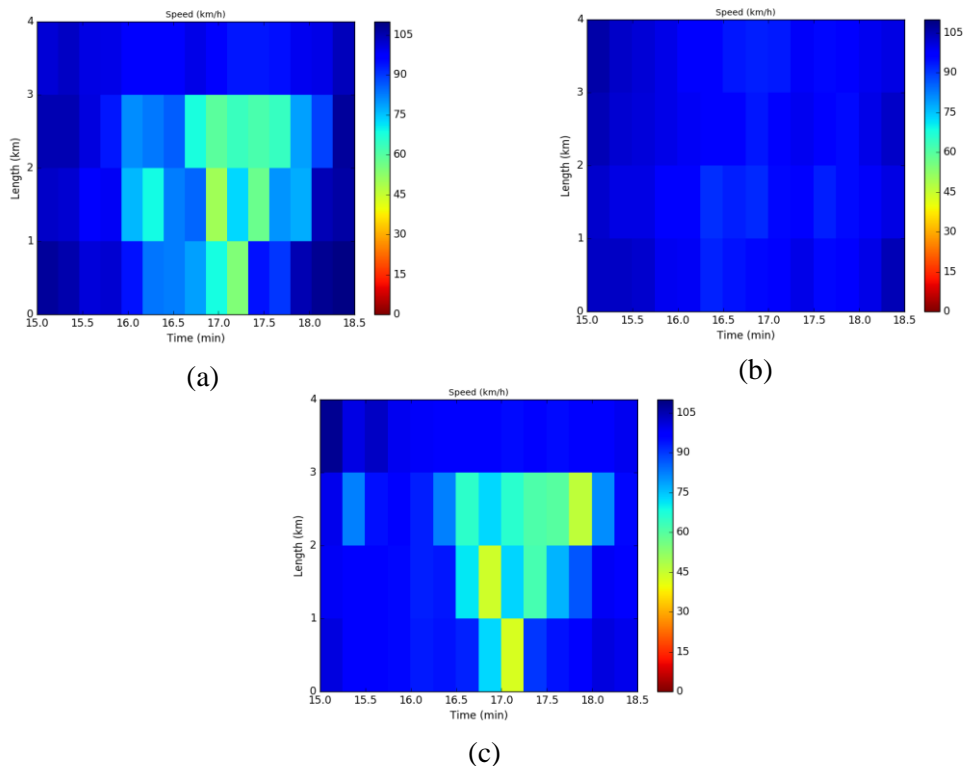
En parameter som har avsevärd påverkan på körfältsbyten är LCGainSpeed, som bestämmer hur mycket ett fordon är villigt att öka sin hastighet för att göra en omkörning då framförvarande fordon kör något saktare. Anledningen är att vid trafikstockning kör många fordon väldigt långsamt och de flesta kör med en hastighet långt under sin önskade hastighet. LCGainSpeed relaterar till skillnaden mellan de två fordonen och då båda fordon har låg hastighet och en väldigt liten hastighetsskillnad krävs ett högt värde för att undvika att fordon blir stillastående i långsamtgående köer, vilket är ett realistiskt beteende i den här typen av situationer. Övriga parametrar diskuteras inte i detalj då de har justerats inom rimliga nivåer, se (DLR and contributors, 2017) för vidare information om de olika parametrarna.

Tabell 4 visar de kalibreringsåtgärder som har genomförts i modellen. Utöver dessa parametrar har tiden då ett fordon tillåts stå still vid konflikt, s.k. deadlock-situationer minskats. Detta har gjorts för att undvika att två fordon som hamnar i konflikt vid körfältsbyten vid t.ex. avfartsramper, står stilla och blockerar alltför länge vilket inte är ett realistiskt beteende. Efter 2 minuter förflyttas fordonet med sin önskade hastighet längs med nätverket tills det uppkommer en lucka där fordonet kan fortsätta sin rutt. Den här typen av situationer modellerar ett extremt beteende som skapar en realistisk konflikt. Men skulle man sätta ned tiden till 0 minuter skulle konflikter lösas alltför enkelt och kapaciteten skulle bli för hög. Det är därför ett sätt att modellera konflikter som uppkommer under högt flöde men som inte orsakar större incidenter, vilket är ett vanligt förekommande observerat fenomen för den studerade sträckan.

Tabell 4. Fordonsparametrar för de olika fordonstyperna i simuleringsmodellen över Stockholm Norr. Standardparametrarna anger de okalibrerade parametrarna i SUMO.

Parametrar	Calibrated parameters				
	Standardparametrar i SUMO (DLR and contributors, 2017)	Personbil	Lätt lastbil	Lastbil utan släp	Lastbil med släp
Car Following-modellen	Krauss	Krauss	Krauss	Krauss	Krauss
Min. gap vid trafikstockning (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Acceleration (m/s ²)	2.6	0.8	0.8	0.6	0.6
Deceleration (m/s ²)	4.5	8.0	8.0	6.0	6.0
Förarimperfektion	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8
Önskad minsta tidslucka (s)	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4
Körfältsbytes-modellen	LC2013	LC2013	LC2013	LC2013	LC2013
LCstrategic	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
LCCooperative	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4
LCGainSpeed	1.0	45.0	45.0	45.0	45.0
LCKeepRight	1.0	1.0	1.0	10.0	10.0

Figur 4(c) visar det kalibrerade scenariot. Figur 4(a) och (c) visar att den kalibrerade modellen lyckas fånga upp det medelbeteende som uppmäts i verkligheten. Vissa skillnader ses och det beror främst på att man har väldigt aggregerade data vilket gör modellen svårkalibrerad då man inte har någon vetskap om vad som sker mellan detektorerna. Då målet har varit att återspegla ett scenario för en dag med trafikstockning i storleken som Figur 4(a) visar och inte att finkalibrera modellen efter den data som finns, p.g.a. osäkerheten i data och de få dagar som är representerade, anses den kalibrerade modellen vara tillräckligt nära för att användas för utvärdering av olika VSL-algoritmer. Man bör dock ha i åtanke att det är en simulerad verklighet efter bästa förmåga och inte den faktiska verkligheten som är representerad.



Figur 4. Medelhastighet för detektordata (a), det okalibrerade fallet (b) och det kalibrerade fallet (c). Detektorplatserna är de markerade med lila i Figur 3. Medelhastigheten varierar mellan 0 km/h (rött) och 105 km/h (blått).

Den kalibrerade simuleringsmodellen används sedan som basscenario och för applicering av de olika åtgärderna för att kunna jämföra basscenariot med de utvalda åtgärderna. Specifika parametervärden samt appliceringsområde i fallen då variabla hastighetsstyrningssystem används är summerade i Tabell 5. För mer detaljerade beskrivningar av specifika parametervärden se föreslagen litteratur till respektive algoritm i Kapitel 2.1.

Tabell 5. Specificering av parametrar och applikationsområde. För en beskrivning av parametrarna se 2.1.

Åtgärd	Sänkning (km/h)	Parametrar	Applikationsområde	Tidsperiod
Sänkt hastighetsgräns	60, 80 och 100	inga	hela sträckan	15:00-18:30
Variabel hastighetsgräns (flaskhalsalgoritm)	Variabel (avrundat till 10-tal)	Vikten för det uppmätta felet=0.005 baserat på Müller m.fl. (2015) Beläggning på detektor vid kapacitet 20% (3650 f/h)	300 meter uppströms om flaskhals 300 meter lång applikationssträcka	Uppdateringsintervall 60 sec
Variabel hastighetsgräns (MCS algoritm)	60 vid incident (80 och 100 uppströms) baserat på Lind och Strömngren (2011)	Gränsvärde för sänkning 45 km/h Gränsvärde för ökning 55 km/h	Applikationsområde om 500 meter	Uppdateringsintervall 60 sec

4.4. Resultat

Vid implementering av de olika algoritmerna tillämpas delar av det ramverk som är uppbyggt inom projektet. Vid implementering av de undersökta VSL-algoritmerna för sträckan Stockholm Norr har estimering och prediktering inte använts, dvs. det är bara mikrosimuleringen och data från detektorerna i simuleringen som ligger till grund för valet av hastighetsgräns i algoritmerna.

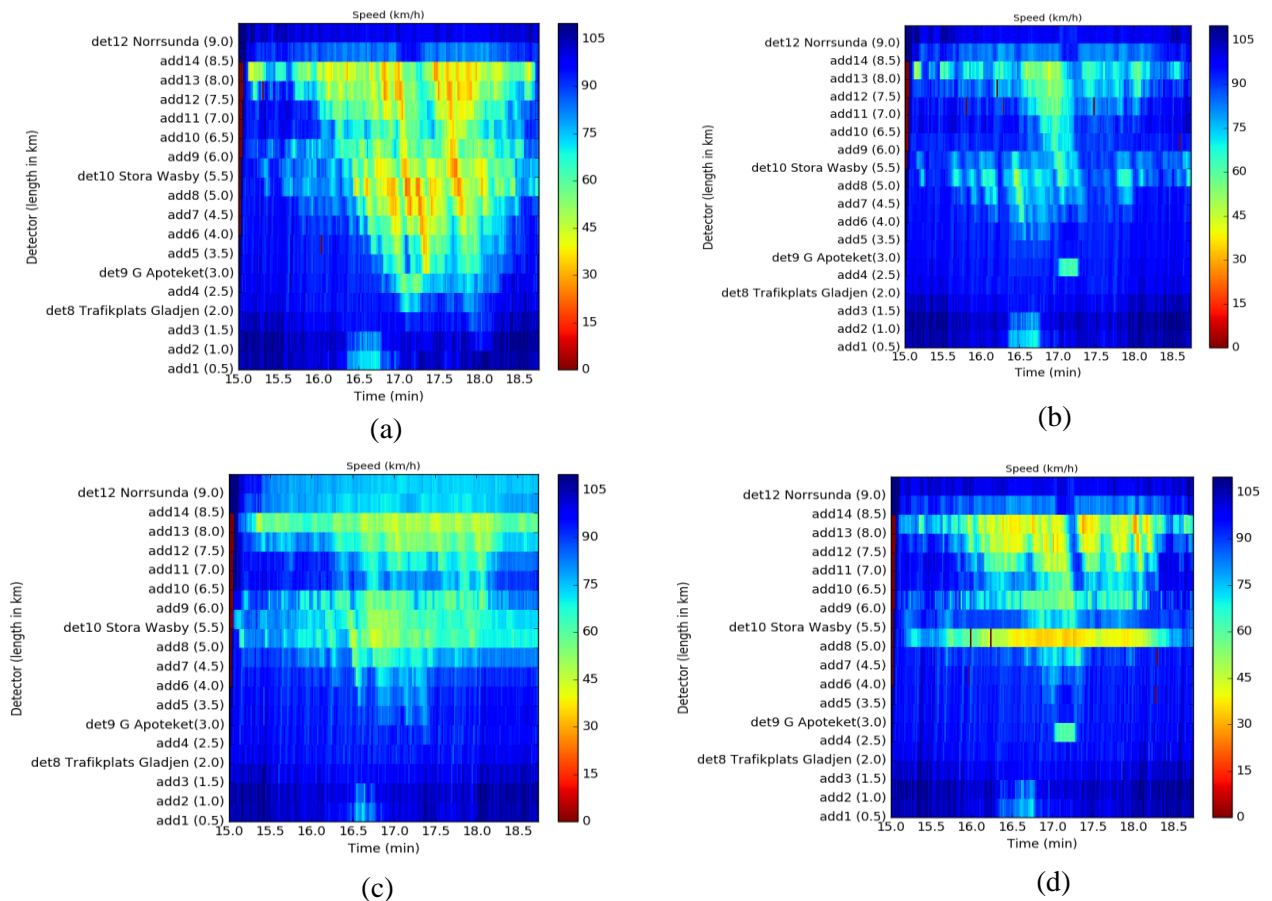
Genom att jämföra totala restiden för alla fordon i systemet för basscenariot och de valda åtgärderna får man en bild av hur mycket man kan vinna/förlora i restid för de olika metoderna. Tabell 6 visar den totala restiden för de olika åtgärderna samt den procentuella förändringen mot basscenariot. Att öka kapaciteten genom att lägga till ett körfält är, inte helt oväntat, det som ger störst effekt, då den ökade kapaciteten resulterar i längre tidsluckor mellan fordon och utrymme för att väva vid avfarten till Rosersberg. Men genom att sänka hastigheterna då trafikstockning uppstår kan man uppnå liknande nivåer, givet att man använder sig av de något mer sofistikerade algoritmerna MCS och MTFC.

Genom att sänka hastigheten med ett fixt värde under hela rusningstiden riskerar man att göra onödiga sänkningar och man kan till och med se försämringar gentemot basscenariot på grund av att man sänker hastigheten så mycket. Att stänga av St. Wäsby har positiv effekt, men denna effekt är inte signifikant. I simuleringen är det antaget att 5 % (baserat på mätningar från en tillfällig detektor vid avfarten) av trafikflödet väljer att köra av vid St. Wäsby och antingen gena eller stanna till vid mackarna. Andra antaganden skulle ge en större eller mindre påverkan vid avstängning.

Tabell 6. Medelvärdet för totala restiden för de olika åtgärderna tillsammans med ett 95% konfidensintervall som representerar osäkerheten i total restid mellan simuleringarna.

Åtgärd	Total restid (h)	Förändring (%)
Basfall	1809±198	-
Utökad kapacitet	1277±47	-30
Stäng tlp. St. Wäsby	1673±254	-8
Variabel hastighsgräns (flaskhalsalgoritm)	1378±62	-24
Variabel hastighetsgräns (MCS)	1323±84	-27
Sänkt hastighet 100	1738±169	-4
Sänkt hastighet 80	1909±131	6
Sänkt hastighet 60	1875±124	4

Kikar man på ett tid-rums diagram över medelhastigheterna ser man var problemen uppstår och var man också får förbättringar med de olika åtgärderna, se Figur 5. I fallet med flaskhalsalgoritmen blir det väldigt tydligt att den största förbättringen sker där algoritmen appliceras, dvs. vid St. Wäsby. Genom att också applicera samma algoritm vid Rosersberg skulle man eventuellt kunna förbättra framkomligheten ännu mer. Det framgår också tydligt att den största förbättringen för alla scenarier, inklusive ombyggnation av infrastrukturen, beror på att de allra lägsta hastigheterna har försvunnit. Detta är resultatet av de variabla hastighetsgränserna som är lägre än den faktiska hastighetsgränsen, vilket ökar möjligheterna för körfältsbyten utan kraftiga inbromsningar som i sin tur minskar risken för instabiliteten i trafikflödet.

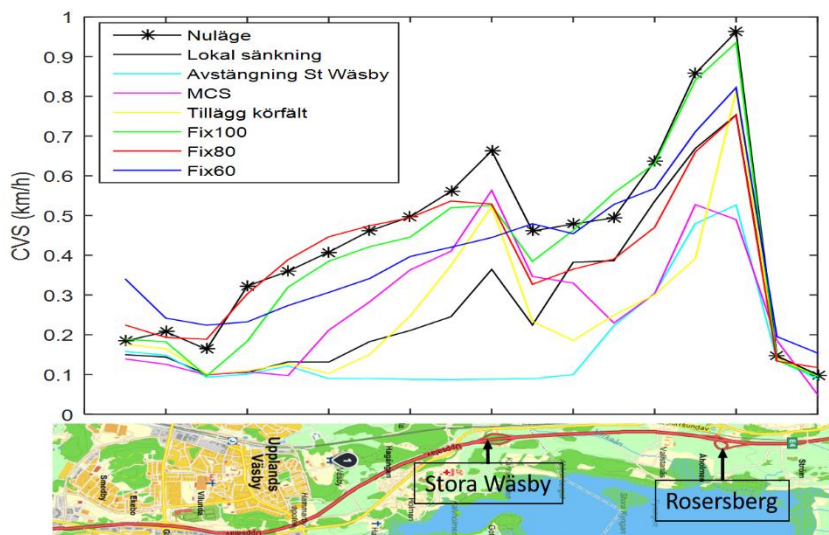


Figur 5. Medelhastighet för basscenariot (a), tillägg av körfält (b), MCS (c) och flaskhalsalgoritm (d). Detektorerna är representerade på y-axeln och tid är representerat på x-axeln. Medelhastighet varierar från 0 km/h (röd) till 110 km/h (blå).

Det är också viktigt att observera att dessa resultat sker då trafikflödet ligger omkring eller något över kapacitetsnivåer. Om trafikflödet är större riskerar man att få betydligt mer trafikstockning vilket i längden kan vara svårt att åtgärda med variabla hastighetsgränser. I bästa fall lyckas man minska köppbyggnaden avsevärt men i värsta fall skjuter man bara upp trafikstockningen till en senare tidpunkt.

Till slut är det också viktigt att observera att genom att bygga ut infrastrukturen och öka kapaciteten kan man öka efterfrågan på den ombyggda sträckan på grund av högre standard, snabbare restider och därmed högre attraktivitet. Det kan därför sluta med att man får trafikstockning inom en snar framtid igen men med ett högre trafikflöde. Det samma kan också inträffa med variabla hastighetsstyrningssystem men här är inte nyttan lika tydlig för förarna och det är inte lika självklart att efterfrågan ökar. Det är därför viktigt att utvärdera hur trafikflödet påverkas av denna typ av åtgärder och ha med det i beräkningarna när nyttan av dessa system utvärderas.

Figur 6 visar hastighetsspridningen (Coefficient of Variation of Speed (CVS)) för olika platser i nätverket, enligt beräkningar beskrivna i 4.2.



Figur 6. Hastighets-spridning för den simulerade sträckan.

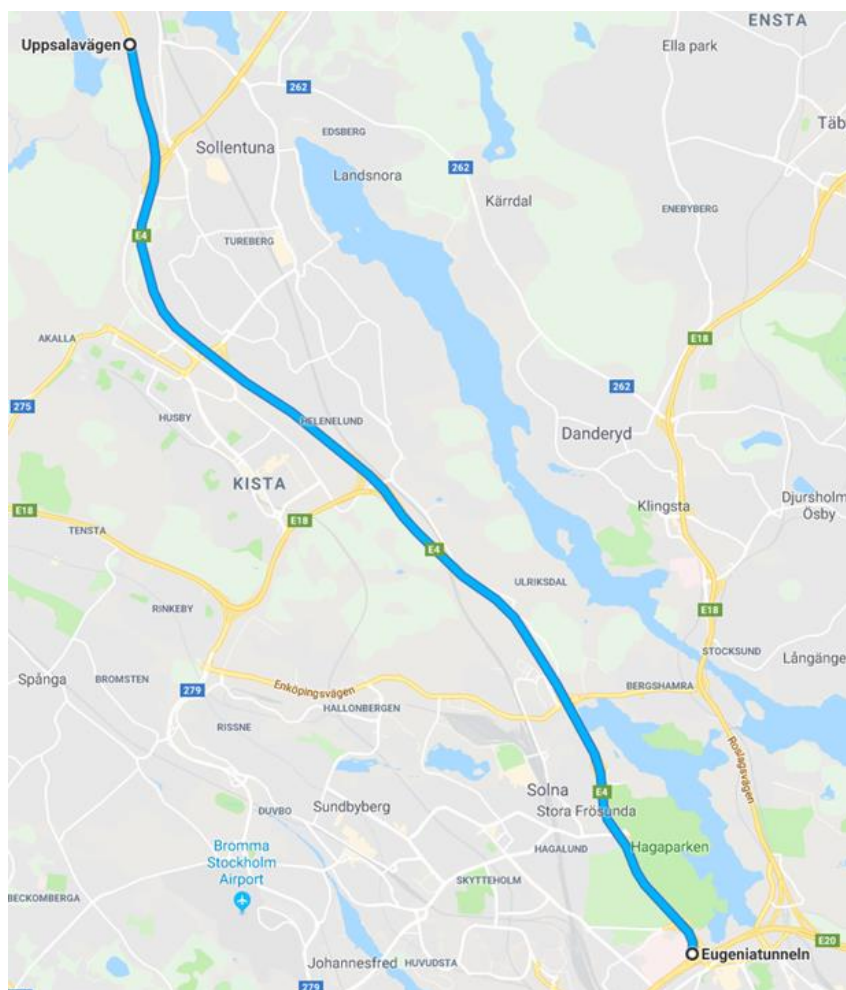
Från figuren kan man dra slutsatsen att för samtliga åtgärder kan man minska spridningen i hastighet. Minskningen är som störst om man stänger av St. Wäsby och som minst vid en sänkning av hastigheten till 100 km/h. Den stora minskningen vid St. Wäsby beror på avsevärt färre vävningar på grund av att man exkluderar av- och påfarter. Den låga minskningen vid hastighets-sänkning till 100 km/h beror på att det inte skiljer sig så mycket från basfallet och att man fortfarande har stor spridning i hastighet mellan olika fordon och fordonstyper vid så höga hastigheter. Vid utökning av kapaciteten ses också stora förbättringar då fordonen har ökad möjlighet till att hålla önskad hastighet då ett till körfält blir tillgängligt. Över lag presterar algoritmerna med variabel hastighetsgräns bättre än vid en fix sänkning i hastighetsgräns och MCS lyckas hålla nere hastighets-spridningen i likhet med en utökad kapacitet. Detta förutsätter dock att VSL-systemen är tvingande och att efterlevnaden är stor, vilket resulterar i att fordonen sänker hastigheten i relation till sin egen önskade hastighet för den aktuella hastighetsgränsen.

5. Effekter av alternativa styralgoritmer, Häggvik – Eugeniattunneln

I det här avsnittet sammanfattas resultaten från den mikroskopiska trafiksimuleringsstudie som genomförts med variabla hastighetsgränser för en del av E4:an mellan trafikplats Häggvik och Eugeniattunneln.

5.1. Bakgrund

Den simulerade sträckan är totalt ca 12 km och inkluderar enbart trafik i södergående riktning. Hastighetsgränsen varierar mellan 110, 80 och 70 km/h. Hastighetsgränser om 50 km/h förekommer på ett antal ramper. Antalet körfält på huvudvägen varierar mellan 2–5, det förekommer även busskörfält på sträckan, dessa exkluderas dock i den här studien. Längs sträckan förekommer totalt 8 avfartsramper och 8 påfartsramper, den simulerade vägsträckan illustreras i Figur 7.



Figur 7. Den berörda sträckningen som simuleras i den här studien, enbart södergående riktning.

Längs sträckan finns totalt 43 portaler på huvudvägen som mäter trafikföringen (detektor 1239-1184), dataunderlaget till kalibreringen av modellen är hämtade från dessa detektorer. För att analysera potentialen av alternativa styralgoritmer med befintlig infrastruktur används samma antal och placering av detektorerna i simuleringsmodellen som i verkligheten.

5.2. Simuleringsupplägg

För att studera trafikföringen har en mikrosimuleringsmodell i SUMO byggts upp över den aktuella sträckan. Simuleringsperioden spänner totalt över fyra timmar och återspeglar trafiksituationen under morgonrusningen mellan klockan 07:00–11:00. Studien fokuserar på framkomlighet och

simuleringsresultaten utvärderas med effektmåttet total fördröjning i nätverket. Då simuleringsmodellen är en stokastisk process, tillämpades 10 upprepningar för att säkerställa att skillnader i resultat inte beror på slumpmässiga variationer.

5.3. Kalibrering

Modellen är kalibrerad med trafikmätningar från radardetektorer längs den aktuella sträckan. Modellen har kalibrerats för att återskapa den trängsel som uppstår på grund av bakåtblockering vid trafikplats Haga Norra. Fenomenet har identifierats vid tre vardagar (13, 20 och 27 april 2016), modellen har därefter kalibrerats baserat på dessa dagar.

Utifrån tillgängligt dataunderlag har ett antal parametrar i modellen justerats. Observera att fordonsammansställningen är baserad på data från Trafikverkets trafikmätningssystem för motorvägar med hastighetsbegränsning 70 och 80 km/h (Olstam och Bernhardsson, 2017). Tabell 7 visar den data som har använts som input till modellen.

Tabell 7. Dataunderlag som har använts som input till simuleringsmodellen över Essingeleden.

Input till modellen	Type av data	Aggregering/mått
Inlödesprofiler	Stationära detektorer (MCS)	Inflöde (fordon/5min) vid påfarter och vid starten av den simulerade sträckan
Svängandel vid avfarter	Stationära detektorer (MCS)	Andel fordon som svänger vid avfarter (%)
Fordonssammansättning	Baserad på en typisk fordonssammansättning för svenska vägar (Olstam och Bernhardsson, 2017)	Andelen fordon som hör till fordonstyperna: personbil, lätt lastbil, lastbil/bussar och lastbil med släp (% per fordonstyp)
Hastighetsfördelning per fordonstyp	Baserat på typiska hastighetsfördelningar per fordonstyp för svenska vägar (Olstam och Bernhardsson, 2017)	Medelhastighet (km/h) och standardavvikelse i hastighet (km/h) per fordonstyp

I simuleringsmodellen har sedan ett antal fordonsspecifika parametrar kalibreras för att återspegla köupbyggnaden och den flaskhals som uppstår vid påfartsrampen i enlighet med mätdata från MCS-systemet. De parametrar som har kalibrerats är relaterade till car-following modellen, dvs. hur fordon anpassar sig till framförvarande fordon, samt körfältsbytesmodellen som modellerar hur fordon byter körfält. Acceleration och inbromsningsbeteendet med standardparametrarna har liknande föregående studie justerats ner avsevärt för att ge ett mer realistiskt beteende när det gäller inbromsningar och accelerationer. Genom att studera flödesnivåerna och medelhastigheten från data och jämföra det med den okalibrerade modellen så kan man dra slutsatsen att den okalibrerade modellen ger alltför hög kapacitet, dvs. fordon kan obehindrat färdas över sträckan och trängsel på grund av att vävningseffekter inte uppstår för de angivna inflödena, svängandelarna, fordonssammansättningen och hastighetsfördelningen per fordonstyp. Detta beror till stor del på att fordon byter körfält tidigt, vilket i sin tur leder till stora skillnader i hastighet mellan körfält och endast de fordon som ska svänga av vid Haga Norra kör långsamt.

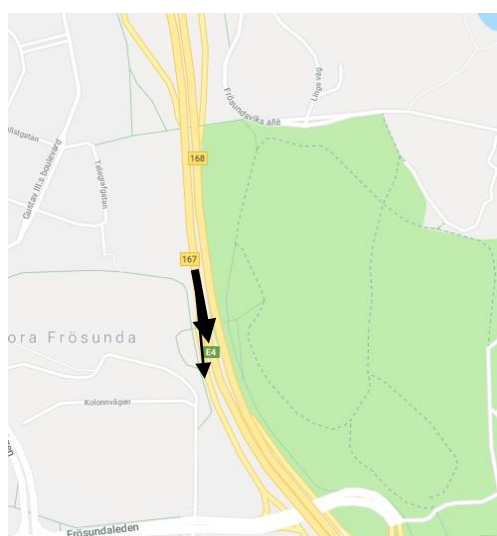
Det är därför nödvändigt att justera körfältsbytesmodellen samt parametrar som påverkar när ett fordon väljer att byta körfält, dvs. minsta gap till framförvarande fordon vid trafikstockning och önskade tidsluckor till framförvarande fordon. Också här har LCGainSpeed – som bestämmer hur mycket ett fordon är villigt att öka sin hastighet för att göra en omkörning då framförvarande fordon kör något långsammare – en avsevärd påverkan på körfältsbyten då trafikstockning råder och många fordon kör med en hastighet långt under sin önskade hastighet. Man har dessutom en komplex situation med många fler körfältsbyten och en mer stadsnära motorväg med offensiv körning och många fordon som vill vinna tid genom att köra om långsammare fordon. LCGainSpeed har därför justerats även i denna studie och pga. den offensiva körning som förekommer i den här typen av

trafiksituationer har den justerat avsevärt mer än i förra delstudien. Övriga parametrar diskuteras inte i detalj då de har justerats inom rimliga nivåer, se (DLR and contributors, 2017) för vidare information om de olika parametrarna. Tabell 8 visar de kalibreringsåtgärder som genomförts i modellen.

Tabell 8. Fordonsparametrar för de olika fordonstyperna i simuleringsmodellen över Essingeleden. Standardparametrarna anger de okalibrerade parametrarna i SUMO.

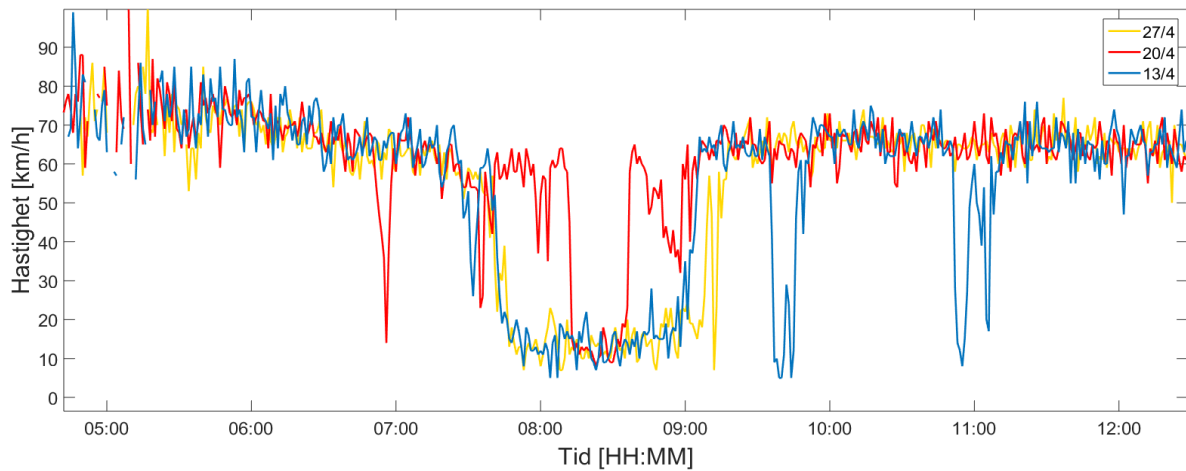
Parametrar	Calibrated parameters				
	Standardparametrar i SUMO (DLR and contributors, 2017)	Personbil	Lätt lastbil	Lastbil utan släp	Lastbil med släp
Fordonsegenskaper					
Fordonssammansättning (%)		88	8	1	3
Fordonslängd (m)	5.0	4.5	9.0	18.0	24.0
Hatighetsfaktor	1.0	1.14	1.14	1.14	1.14
Standardavvikelse i hastighetsfaktor	0.0	0.14	0.11	0.07	0.07
Max. Speed (m/s)	55.6	57.0	25.0	22.2	22.2
Car Following-modellen	Krauss	Krauss	Krauss	Krauss	Krauss
Min. gap vid trafikstockning (m)	2.5	1.6	1.6	1.6	1.6
Acceleration (m/s ²)	2.6	1.2	0.7	0.7	0.7
Deceleration (m/s ²)	4.5	7.0	5.0	5.0	5.0
Förarimperfektion	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8
Önskad minsta tidslucka (s)	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4
Körfältsbytes-modellen	LC2013	LC2013	LC2013	LC2013	LC2013
LCstrategic	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
LCCooperative	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
LCGainSpeed	1.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0
LCKeepRight	1.0	0.1	0.3	0.3	0.5

Modellen är kalibrerad för en trafiksituation som uppstår under morgonrusningen. I nätverket aktiveras en flaskhals vid trafikplats Haga Norra som en följd av bakåtblockering från avfartsrampen mot Frösundaleden. Figur 8 illustrerar flaskhalsens position i nätverket.



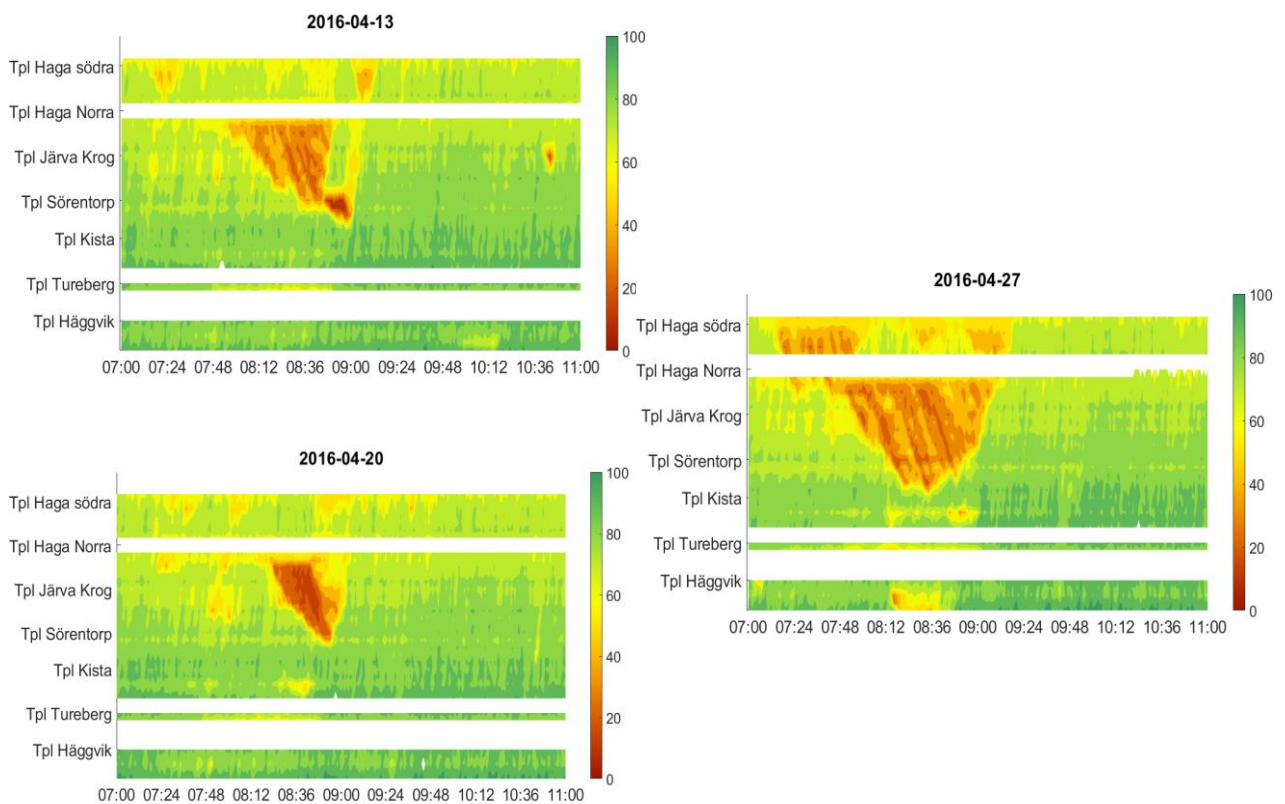
Figur 8. Flaskhalsen vid Trafikplats Haga Norra, bakåtblockeringen uppstår på avfartsrampen mot Frösundaleden.

När flaskhalsen vid trafikplats Haga Norra aktiveras sjunker hastigheten på avfartsrampen mot Frösundaleden. I Figur 9 visas hastighetsmätningar från data, dvs. data aggregerad över 1 minut, från avfartsrampen vid flaskhalsen från dagarna i kalibreringsunderlaget.



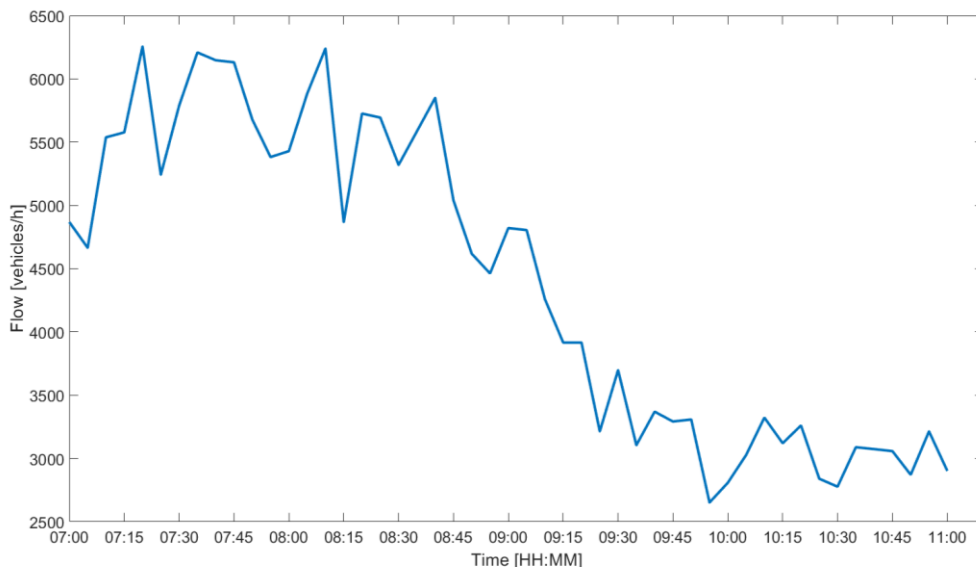
Figur 9. Observerad hastighet på rampen vid flaskhalsen (trafikplats Haga Norra).

Eftersom det finns en påfartsramp i nära anslutning uppströms till flaskhalsen, kompliceras vävningsbeteendet vid trafikplats Haga Norra. Konsekvensen blir omfattande trängsel och köbildning som sträcker sig förbi trafikplats Sörentorp. Trängseln uppstår vanligtvis mellan klockan 08:00 och klockan 09:30, mätdata från dagarna i kalibreringsunderlaget illustreras i Figur 10.



Figur 10. Uppmätta hastigheter för de tre dagar som använts i kalibreringen. Hastigheten varierar från 0 km/h (rött) till 100 km/h (grönt).

Trängseln i Figur 10 varierar i omfattning mellan olika dagar, i förekommande fall aktiveras även andra flaskhalsar i samband med vävningar (exempelvis den 13 april förekommer en flaskhals vid Sörentorp). Trängseln är också till viss del relaterad till den faktiska trafikefterfrågan, men det måste samtidigt betonas att trängselns omfattning även beror på andra förklaringsvariabler relaterade till vävningsprocessen (exempelvis hur stor andel av förarna som känner till sträckan). Inflödesprofilen som använts vid simuleringen har kalibrerats efter den uppmätta trafikefterfrågan den 27 april 2016. Istället för att skapa en genomsnittlig profil från flera dagar i underlaget, valdes den dagen med mest trängsel. Efterfrågan kalibrerades mot samtliga påfarter samt det trafikflöde som observerats i början av nätverket. Efterfrågeprofilen vid början av nätverket illustreras i Figur 11 (och inkluderar 3-körfält).



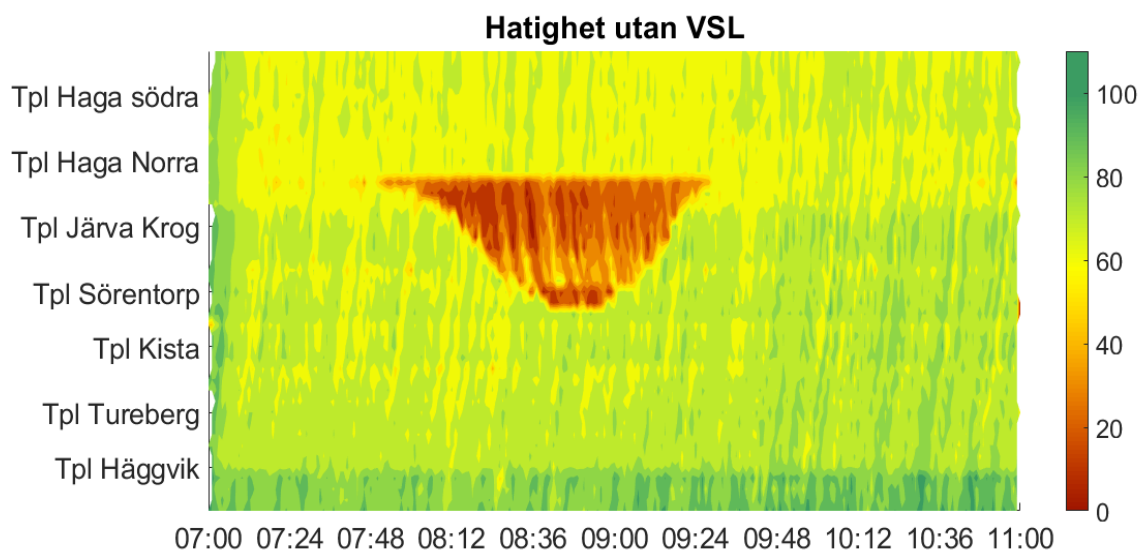
Figur 11. Total efterfrågan vid nätverkets början (hämtad från detektor 1239, länkID82037).

5.4. Resultat variabla hastighetsgränser

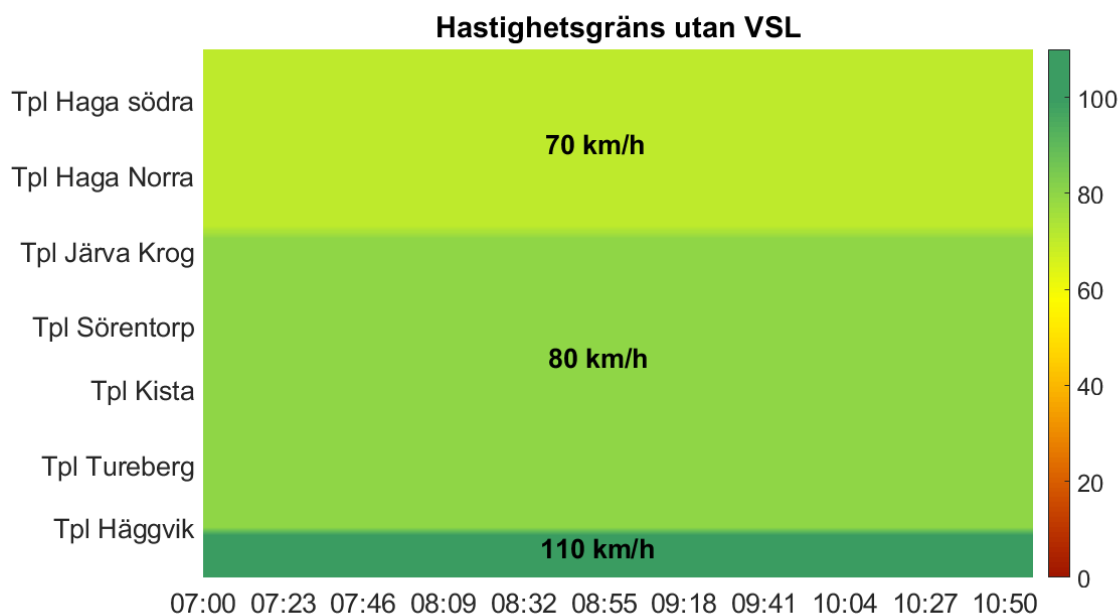
I detta avsnitt redovisas resultat från trafiksimuleringar med användning av olika algoritmer för val av variabla hastighetsgränser. Resultat från simuleringarna redovisas i form av observerade hastigheter i tid och rum samt framkomlighet, vilket har kvantifierats med effektmåttet total fördröjning. Den totala fördröjningen motsvarar skillnaden i restid för alla förare i simuleringen jämfört med om de hade kört hela sträckan med sin önskade hastighet. Vid implementering av de undersökta VSL-algoritmerna för sträckan Essingeleden har estimering och prediktering inte använts, dvs. det är bara mikrosimuleringen och data från detektorerna i simuleringen som ligger till grund för val av hastighet i algoritmerna.

5.4.1. Kalibrerat nuläge utan variabla hastighetsgränser

I nuläget finns ett MCS-system på den berörda sträckan vi kalibrerat mot, men då dagens system inte är tvingande utan endast förser förare med rekommenderade hastigheter antas att det kalibrerade nuläget motsvarar en motorväg utan variabla hastighetsgränser. Detta beror på att tidigare studier (Nissan och Koutsopoulos, 2011) indikerar på att efterlevnaden av rekommendationerna från systemet är mycket låg, varför det anses rimligt att bortse från effekter av systemet. Observerade hastigheter från det kalibrerade nuläget i mikromodellen illustreras i Figur 12 och tillhörande hastighetsgränser utan VSL illustreras i Figur 13.



Figur 12. Observerade hastigheter från simuleringen i kalibrerat nuläge, utan VSL. Replikation 1.

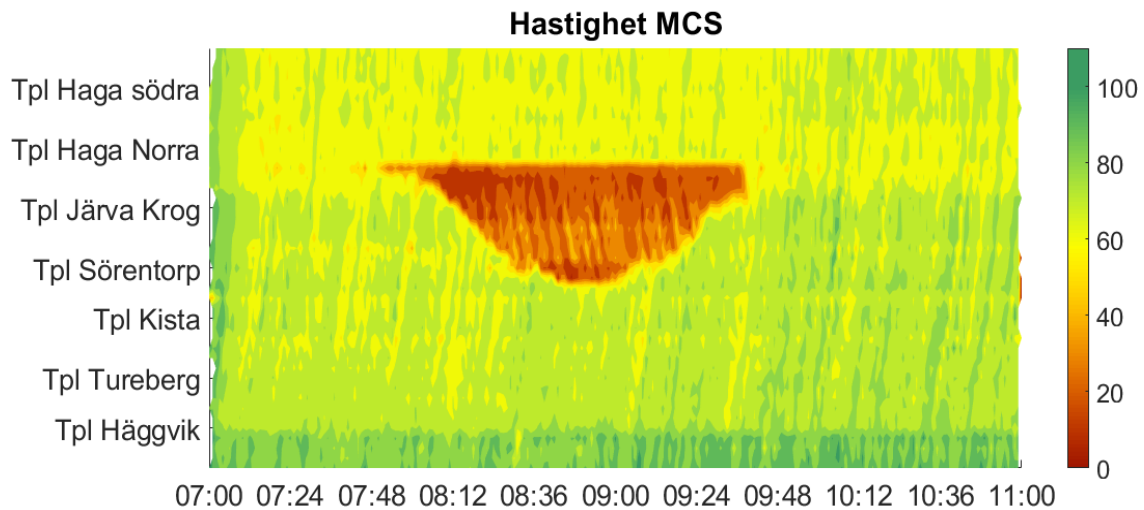


Figur 13 Hastighetsgränser i kalibrerat nuläge, utan VSL. Replikation 1.

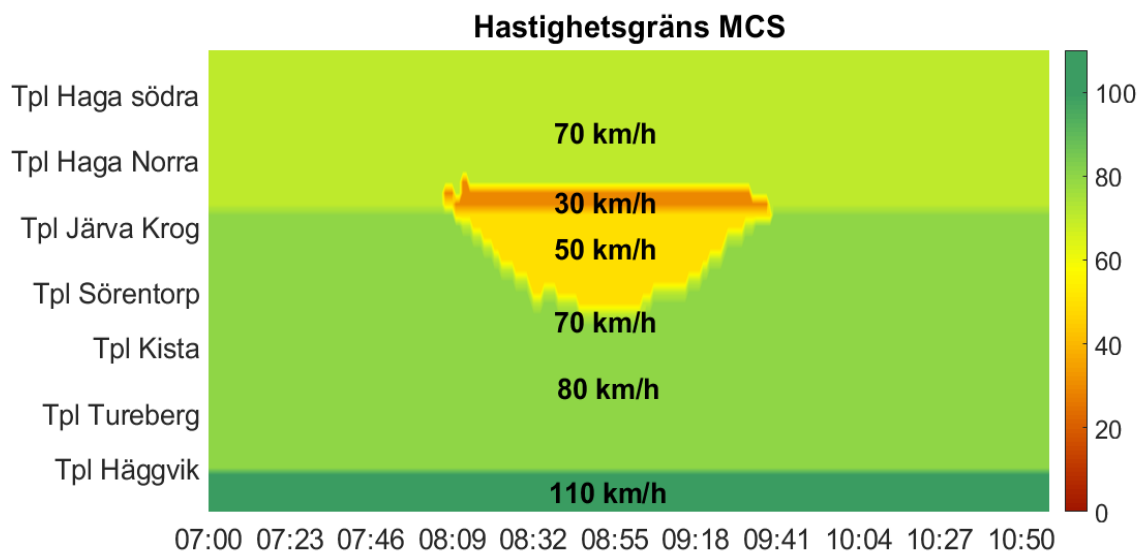
Resultaten i Figur 12 representerar endast data från en enskild replikation med mikromodellen. De slumpmässiga variationerna i modellen redovisas i 5.4.5.

5.4.2. Nuvarande MCS-systemet (tvingande)

Effekten av simuleringar med styralgoritmen från det nuvarande MCS-systemet, givet en tvingande hastighetsgräns, illustreras i Figur 14. Därmed skiljer sig simuleringarna väsentligt från hur systemet används i praktiken (med rekommenderade hastigheter) genom att förarna antas följa de variabla hastighetsgränserna. De justeringar av hastighetsgränsen som genomförs illustreras i Figur 15.



Figur 14. Observerade hastigheter från simuleringen, med nuvarande MCS-systemet (tvingande). Replikation 1.

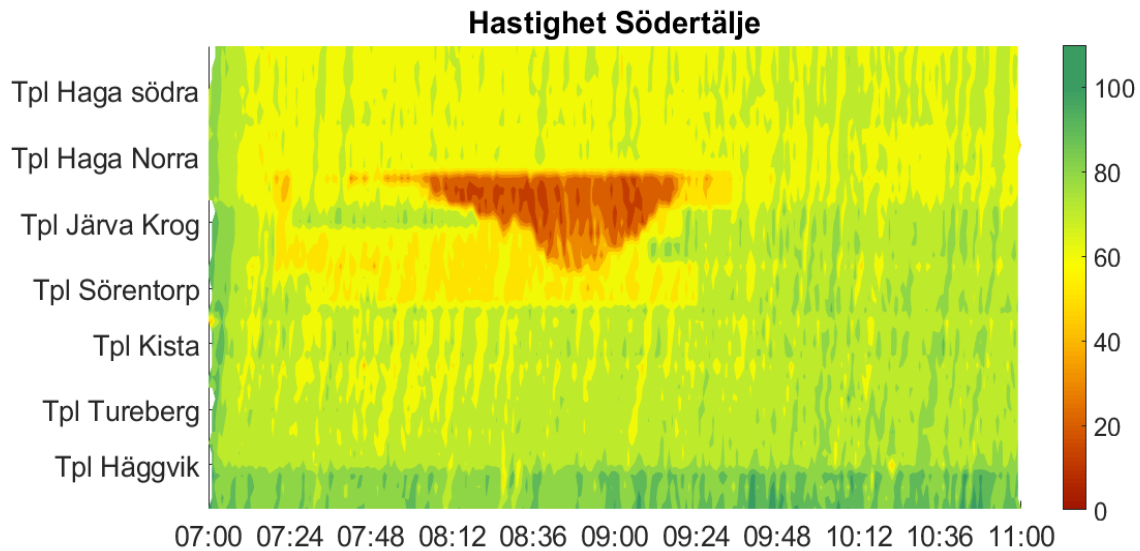


Figur 15. Hastighetsgränser med nuvarande MCS-systemet (tvingande). Replikation 1.

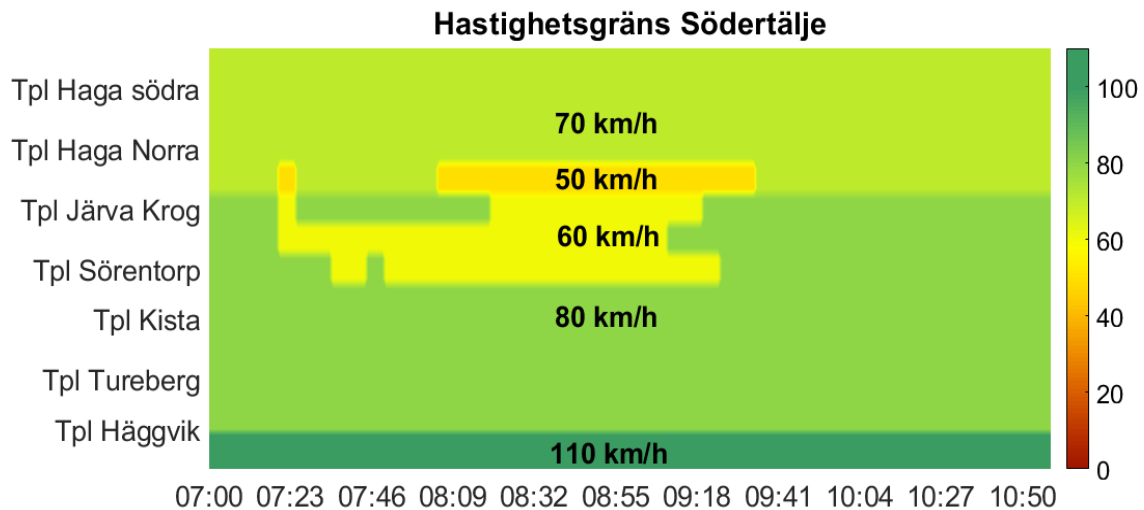
Baserat på resultaten från simuleringen blir det uppenbart att en högre efterlevnadsgrad på grund av tvingande VSL skulle innebära försämrade framkomlighet jämfört med från det nuvarande MCS-systemet med rekommenderade VSL.

5.4.3. Södertäljealgoritmen (tvingande)

Genom att tillämpa Södertäljealgoritmen i mikrosimuleringsmodellen, observerades hastigheter enligt Figur 16. Skyltade hastighetsgränser justerade av algoritmen redovisas i Figur 17.



Figur 16. Observerade hastigheter från simuleringen, med Södertäljealgoritmen (tvingande). Replikation 1.

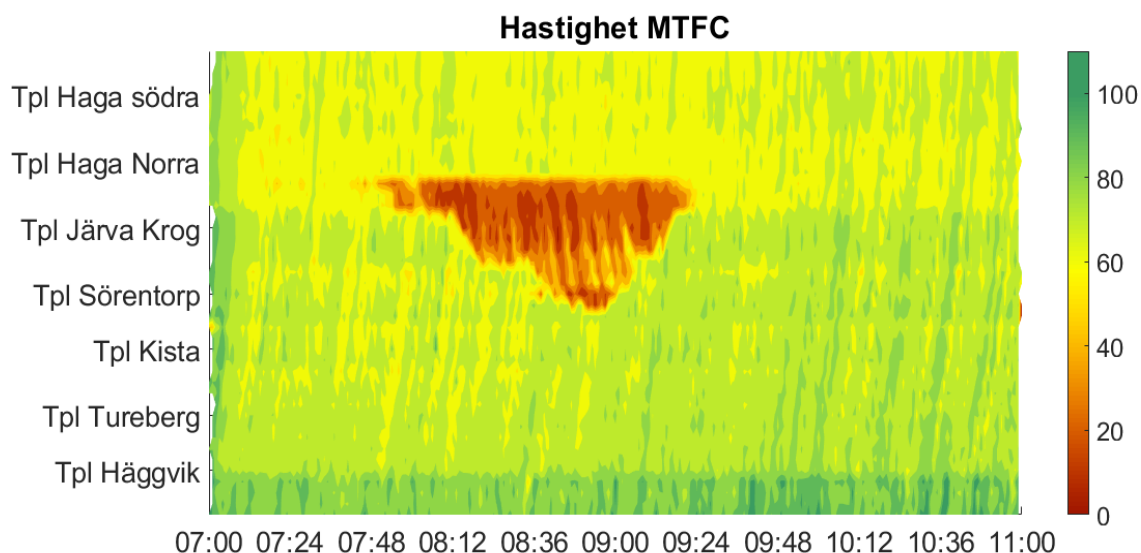


Figur 17. Hastighetsgränser med Södertäljealgoritmen (tvingande). Replikation 1.

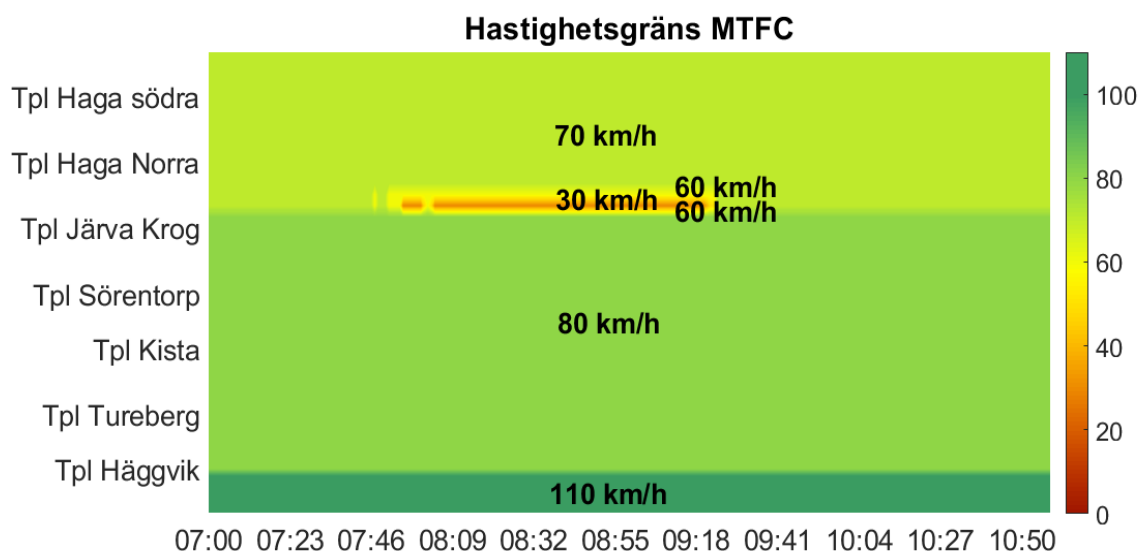
Baserat på resultaten från mikrosimuleringen förbättras framkomligheten på den aktuella sträckan med Södertäljealgoritmen, jämfört med nuläget (utan VSL). Skyltningen från algoritmen justerar ned hastighetsgränsen under tidsperioder även utanför det mest belastade tidsfönstret under morgonrusningen. Restiden för de resenärer som reser utanför den mest belastade tidsperioden riskerar att öka, men på totalen förbättras framkomligheten på sträckan eftersom skyltningen från algoritmen medför att köppbyggnaden minskar i omfattning.

5.4.4. Mainstream Traffic flow Control (tvingande)

Tillämpning av algoritmen Mainstream Traffic Flow Control på den aktuella sträckan ger hastighetsobservationer från mikrosimuleringen enligt Figur 18. De hastighetsgränser som tillämpas i anslutning till flaskhalsen vid trafikplats Haga Norra beräknas av styralgoritmen, övriga hastighetsgränser är fixa. Figur 19 illustrerar hur hastighetsgränserna i hela nätverket varierar över tid.



Figur 18. Observerade hastigheter från simuleringen, med Mainstream Traffic Flow Control (tvingande). Replikation 1.

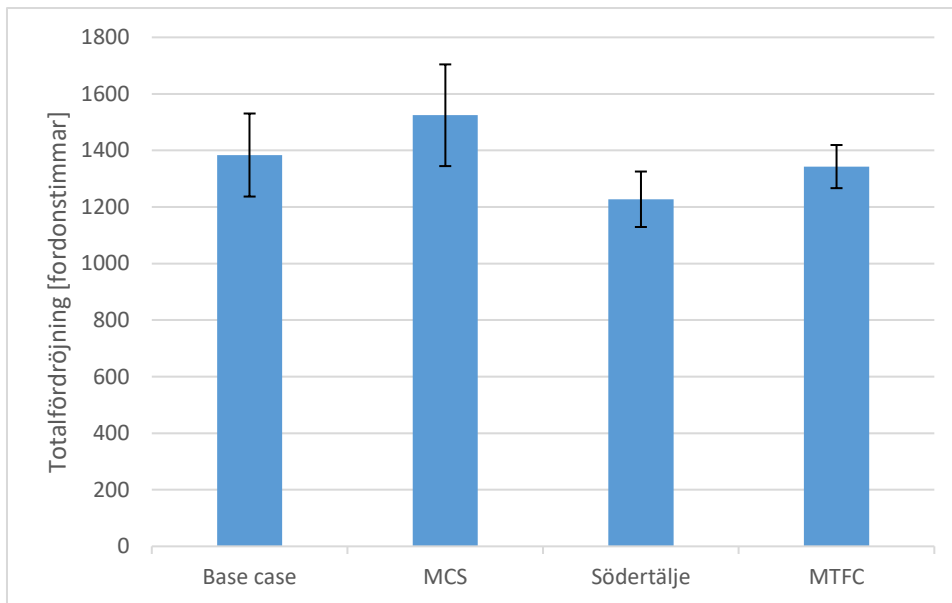


Figur 19. Hastighetsgränser med Mainstream Traffic Flow Control (tvingande). Replikation 1.

Eftersom justeringen av hastighetsgränsen med algoritmen Mainstream Traffic Flow Control endast sker lokalt vid flaskhalsen, bidrar inte algoritmen med någon tydlig förbättrad framkomlighet jämfört med nuläget (utan VSL).

5.4.5. Sammanställning av resultat från styralgoritmerna

Simuleringen av de olika algoritmerna indikerar på att det finns potential att förbättra framkomligheten på den berörda sträckan med hjälp av VSL. Potentialen för de olika algoritmerna varierar, Figur 20 illustrerar en jämförelse av total fördröjning för samtliga algoritmer i simuleringsstudien. De slumpmässiga variationerna mellan simuleringarna har inverkan på omfattningen av trängseln i simuleringen och därför har konfidensintervall för de tio replikationerna redovisats i varje figur.



Figur 20. Total fördröjning i fordonstimmar samt standardavvikelse mellan replikationerna, för samtliga fall i simuleringsstudien.

Följande observationer har gjorts baserat på resultaten från de olika algoritmerna:

- Det nuvarande MCS-systemet tycks förlänga restiden (förutsatt att rekommenderad hastighet följs). Detta beror huvudsakligen på att justeringen av hastigheten sker när trafiksammanbrott redan skett samt att sänkningen av rekommenderad hastighet är så långt under ordinarie hastighetsgräns att det medför extra fördröjning.
- Södertäljealgoritmen indikerar på bäst resultat ur ett framkomlighetsperspektiv. Den totala fördröjningen och köutbredningen minskar. Dock skulle algoritmen behöva anpassas till den unika sträckan för att fungera i praktiken. Det korta avståndet mellan ramperna gör att vägens karaktär skiljer en del från den sträcka där algoritmen testats tidigare.
- MTFC appliceras endast på en begränsad sträcka vilket får mindre effekt. Systemet kan ha större potential än vad simuleringsresultaten indikerar, men är kanske inte lämpad för detta unika fall eftersom trängseln är av så omfattande karaktär och kräver större åtgärder.

Simuleringen är behäftade med viss osäkerhet, nedan listas ett antal orsaker/egenskaper som kan påverka modellresultaten:

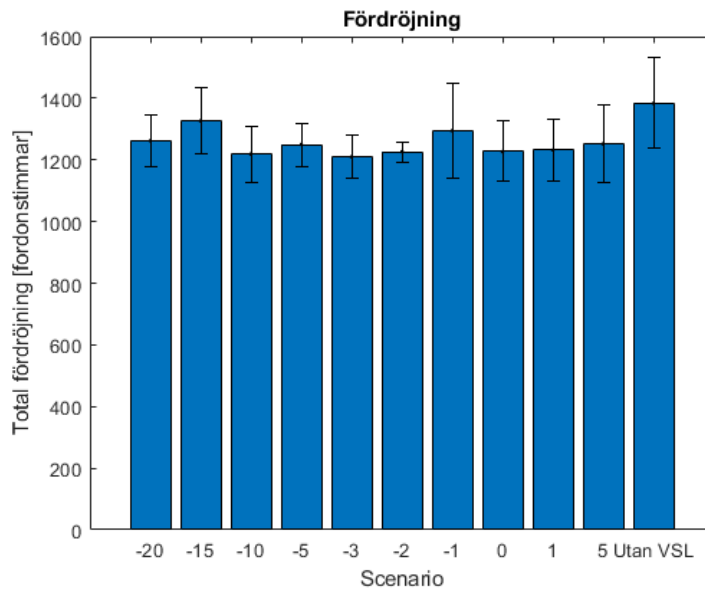
- Indata: Modellen är kalibrerad med aggregerade mätdata i form av hastighet och flöde. Möjliga brister är varierande hastighetsanspråk och fordonsammansättning, vilket hade krävt data från enskilda fordon samt mätdata uppdelat per fordonstyp.
- Kalibreringen av nuläget är utförd mot mätdata där det förekommer rekommendationer från MCS-systemet, vi har dock antagit att den rekommenderade hastigheten inte påverkar förarnas beteende nämnvärt. Därigenom kan kalibreringen antas vara gjord mot mätdata utan variabla hastighetsgränser, men hur förarnas beteende påverkas av det nuvarande MCS-systemet är inte helt tydligt.

5.5. Effekt av förskjutning av variabla hastighetsgränser

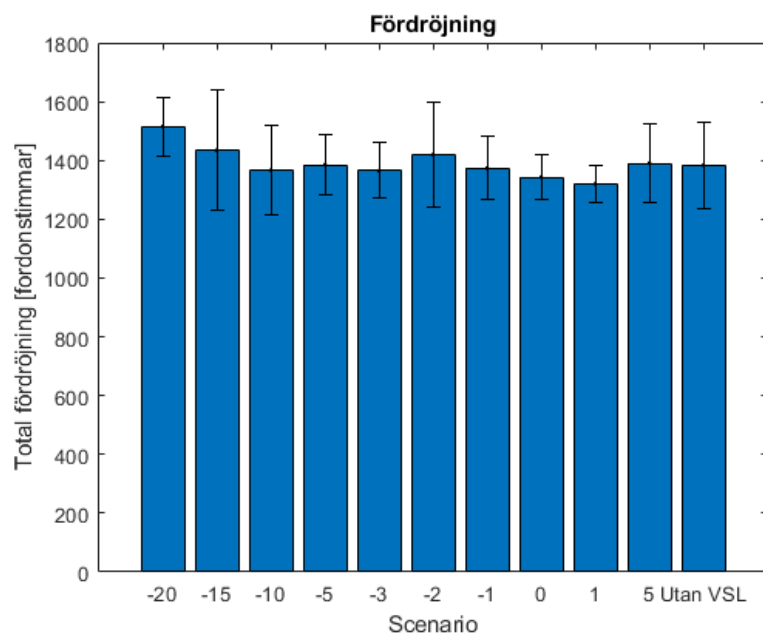
Utifrån resultaten av den genomförda simuleringsstudien är det också intressant att undersöka huruvida effekten av variabla hastighetsgränser kan förbättras genom att tillämpa prediktiv trafikstyrning. Ett enkelt sätt att testa detta är att använda kunskap om trafiksituationen, t.ex. tidpunkten då trafikstockningen först observeras, tillsammans med den faktiska skyltningen från en simulering och

tidigarelägga sekvensen av skyltningen. Detta görs lämpligast genom att köra två iterationer av exakt samma simuleringsupplägg (baserat på samma slumpstal) och tillämpa den beräknade skyltningen från den första simuleringen, i den andra simuleringen med en förskjutning i tid. På det sättet har man använt en predikterad tid för när trafikstockningen startar eftersom simuleringen kommer ha exakt samma beteende vid den andra iterationen innan VSL-algoritmen är aktiverad. Men därefter används ingen prediktering och så fort man väljer att aktivera VSL vid en annan tidpunkt kommer trafikförhållanden att skilja mellan de två iterationerna, dvs. genom att endast förskjuta de variabla hastighetsgränserna tas ingen hänsyn till några förändringar som förekommer på grund av att skyltningen förskjuts. Man skulle därför behöva köra mikrosimuleringen upprepade gånger för kortare tidsintervall för att få en prediktion över tid. I denna förenklade metod saknas länkningen mellan mikromodellen och MMS-systemet.

Eftersom det nuvarande MCS-systemet inte gav någon potentiell förbättrad framkomlighet, undersöks endast effekten av förskjutning för Södertäljealgoritmen samt Mainstream Traffic Flow Control. För att undersöka hur förskjutningen påverkar framkomligheten undersöktes olika tidshorisonter, från tidigareläggning 20 minuter till senareläggning 5 minuter. Resultaten från förskjutning med Södertäljealgoritmen redovisas i Figur 21 och förskjutningar med Mainstream Traffic Flow Control redovisas i Figur 22. Noll förskjutning motsvarar identiska resultat som för simuleringarna i föregående avsnitt.



Figur 21. Total fördröjning samt standardavvikelse mellan replikationerna med förskjutning av skyltningen baserad på Södertäljealgoritmen (tvingande)



Figur 22. Total fördröjning samt standardavvikelse mellan replikationerna med förskjutning av skyltningen baserad på Mainstream Traffic Flow Control (tvingande).

Enligt resultaten från Figur 21 samt Figur 22 identifieras ingen uppenbar vinst med den förenklade prediktion som antas genom att använda kunskap från mikrosimuleringen, dvs. förskjutning av användandet av VSL. Att döma av resultaten uppnås ingen förbättrad framkomlighet av att använda lägre hastighetsgränser innan trängseln uppstår för att på så vis kunna förskjuta ett sammanbrott. Framkomligheten påverkas inte heller tydligt negativt av att senarelägga skyltningen.

Det måste dock återigen påpekas att prediktion endast antas innan VSL-algoritmen är aktiverad och prediktion bör också övervägas för det förändrade trafikillstånd som uppstår på grund av de nedsatta hastigheterna. En mer sofistikerad modell för prediktering krävs för att ge svar på huruvida prediktiv styrning kan förbättra resultaten, rimligtvis genom prediktering av de framtida trafikförhållandena med MMS-systemet.

6. Styrning med begränsad tillgång till detektordata

I detta delkapitel redovisas resultat från den utvärdering som gjorts av VSL-styrning med reducerat antal detektorer. Utvärderingen är baserad på den metodik som presenterades i kapitel 3.

6.1. Bakgrund

Den simulerade sträckan som har undersökts är den simulerade vägsträckan av E4:an mellan Häggvik och Eugeniattunneln som presenterades i kapitel 5. De två styralgoritmer som har utvärderats är MCS-algoritmen och Södertälje-algoritmen. Anledningen till detta är att dessa två algoritmer används över en längre vägsträcka varför man får större nytta av att ersätta icke-fungerande eller saknade detektorer. För flaskhalsalgoritmen är man beroende av ett fåtal närliggande detektorer vilket gör att fasta detektorer behövs.

6.2. Simuleringsupplägg

Den kalibrerade simuleringsmodellen från kapitel 5 används för att utvärdera hur icke-fungerande eller saknade detektorer påverkar algoritmens funktion. Utvärderingen sker kvalitativt genom att styrscheman jämförs visuellt, samt kvantitativt genom att total fördröjning jämförs för simuleringar baserade på samma slumpfrö, samt för genomsnittlig fördröjning. Totalt har den delsträcka som berörs av variabla hastighetsgränser 20 detektorer. Tre fall har därför jämförts:

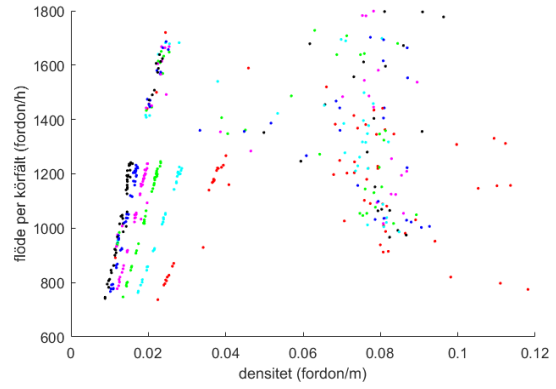
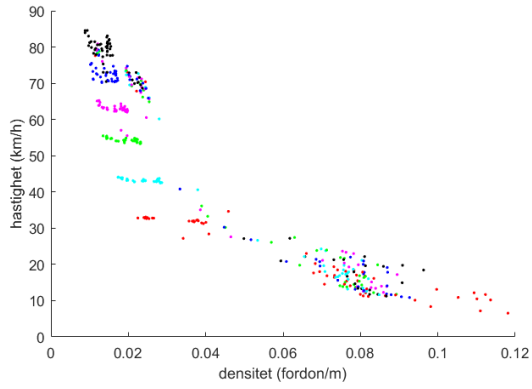
1. data från samtliga detektorer används
2. data från 10 detektorer används
3. data från 5 detektorer används.

6.3. Kalibrering

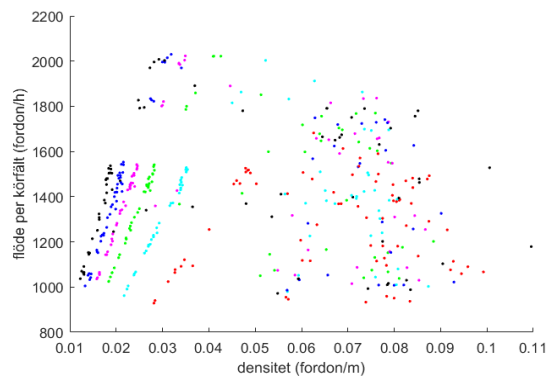
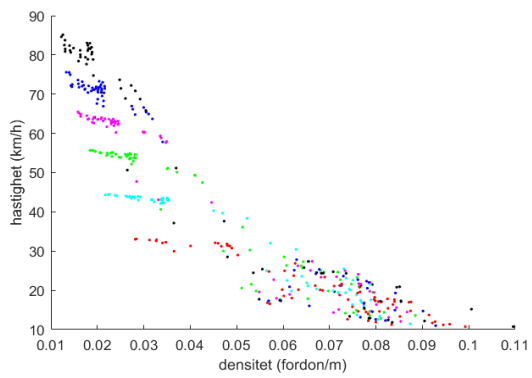
De ingående parametrarna i fundamentaldiagrammet i MMS-modellen, beskrivet i 2.2.1 måste för varje sektion kalibreras så att fundamentaldiagrammet anpassas mot mätningarna, givet olika hastighetsgränser, för att kunna modellera trafiksituationen med MMS-modellen då hastighetsgränserna ändras. Detta görs genom att undersöka hur förändrad skyltad hastighet på den simulerade vägsträckan av E4:an mellan Häggvik och Eugeniattunneln (som presenterades i kapitel 5) påverkar relationen mellan hastighet, flöde och densitet. Vi har här begränsat oss till de vägvagnsnitt där vi förväntar oss att ett VSL-system aktiverar hastighetsnedsättning. SUMO har körts för sträckan Häggvik till Eugeniattunneln med hastighetsnedsättningar i steg om 10 km/h för den delsträcka som börjar vid Trafikplats Kista och slutar vid Trafikplats Haga Norra. För att vara säkra på att få datapunkter även vid hög densitet har SUMO även körts med 30 % ökat inflöde. Data över flöde, densitet och hastighet har samlats från SUMOs virtuella detektorer, som kan liknas vid de befintliga radardetektorerna som finns i Stockholm.

Viss försiktighet måste beaktas vid denna typ av analys. Det är inte säkert att data genereras för hela densitetsområdet. Om en vägsträcka exempelvis bakåtblockeras av en kö, före kapacitetsflöde uppnås, kommer inte den kritiska densiteten samt kapacitet att kunna bestämmas.

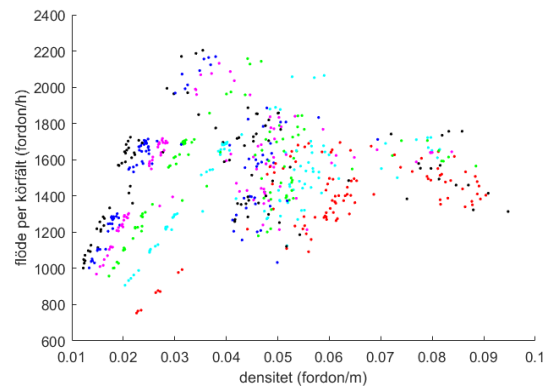
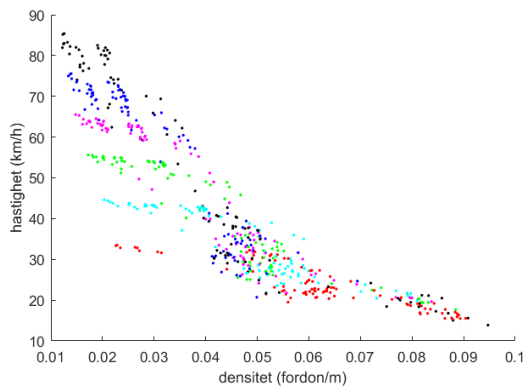
I Figur 23–27 presenteras hastighets-, densitets- samt flöde-densitets samband för de fem sektionerna, för hastighetsgränserna 80 (svart), 70 (blå), 60 (magenta), 50 (grön), 40 (ljusblå) och 30 (röd) km/h.



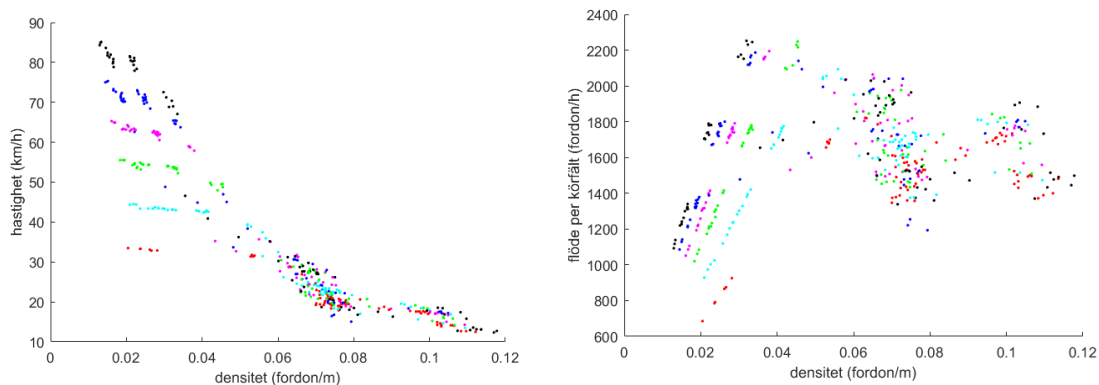
Figur 23. Sträcka 1 – Trafikplats Kista.



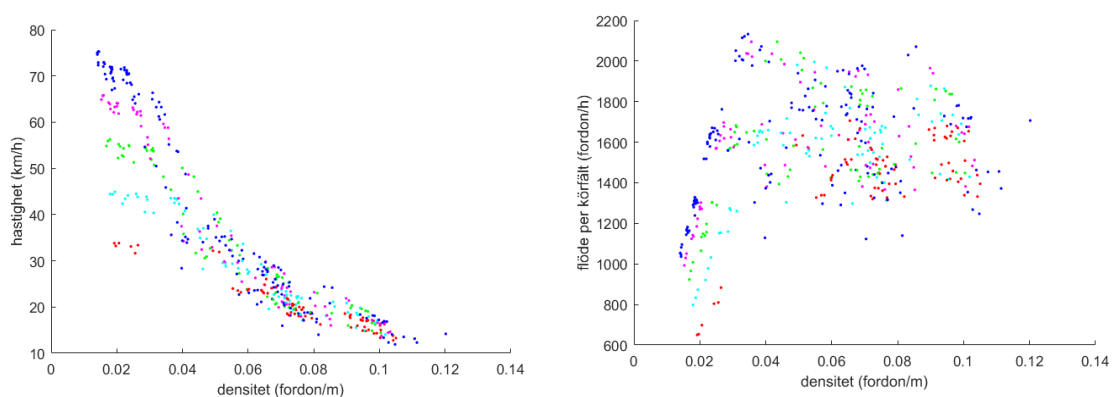
Figur 24. Sträcka 2 – Trafikplats Sörentorp.



Figur 25. Sträcka 3 – Trafikplats Järva krog.



Figur 26. Sträcka 4 – Trafikplats Frösunda.



Figur 27. Sträcka 5 – Trafikplats Haga norra.

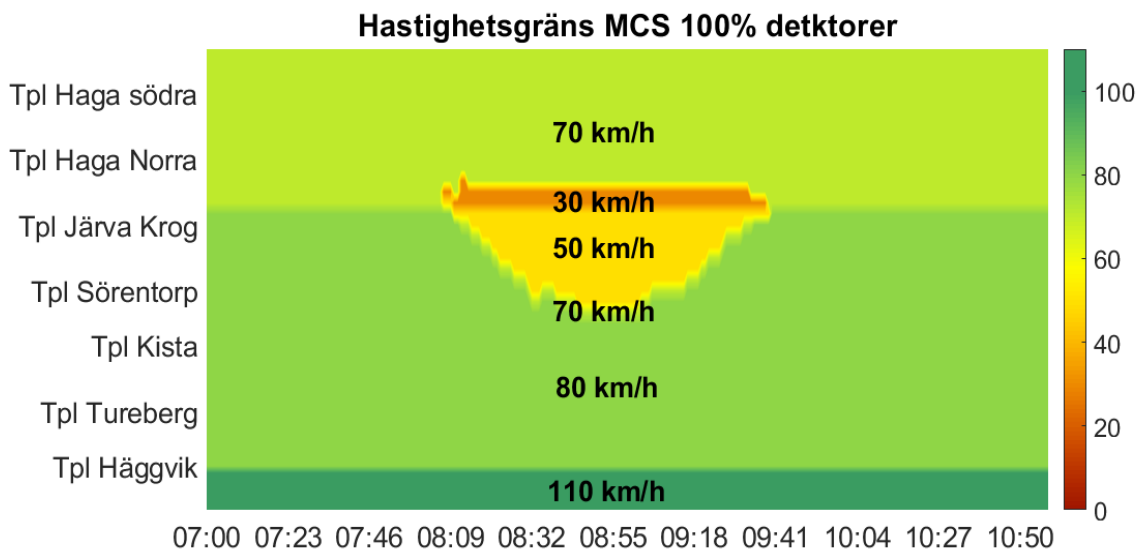
För sträcka 1 nås inte kapacitetstaket under den studerade perioden, utan det överbelastade fallet som ses i Figur 23 är en följd av bakåtblokering. Jämfört med övriga sträckor är också det högsta uppnådda flödet avsevärt lägre. Därför är det svårt att uttala sig om hur kritisk densitet och kapacitet påverkas av förändringar i skyltad hastighet. För övriga sträckor är det tydligt från hastighetsdensitetsplottarna att punkten för kritisk densitet ökar med lägre hastighet. För en illustration av hur kritisk densitet identifieras se Figur 1. Det är också tydligt att skillnaderna i hastighet blir avsevärt mindre i det överbelastade fallet, dvs. vid densiteter över kritisk densitet. För sträcka 2, 3 och 4 ser man tydligt att kapaciteten är liknande för hastigheterna 80, 70, 60 och 50 km/h, och för sträcka 5 är kapaciteten liknande för hastigheterna 70, 60 och 50 km/h. Figurerna 23–27 används för att kalibrera fundamentaldiagrammen för de olika sträckorna. Från figurerna kan man se att kalibreringen till mätpunkterna är avsevärt svårare att göra för högre densiteter då mätpunkter ofta saknas för detta område. För friflödesdelen kan en god kalibrering uppnås. För att kunna använda MMS-systemet som input till mikrosimuleringen har kalibrering gjorts individuellt för alla berörda sträckor. Rimliga resultat har uppnåtts för samtliga sträckor.

6.4. Resultat

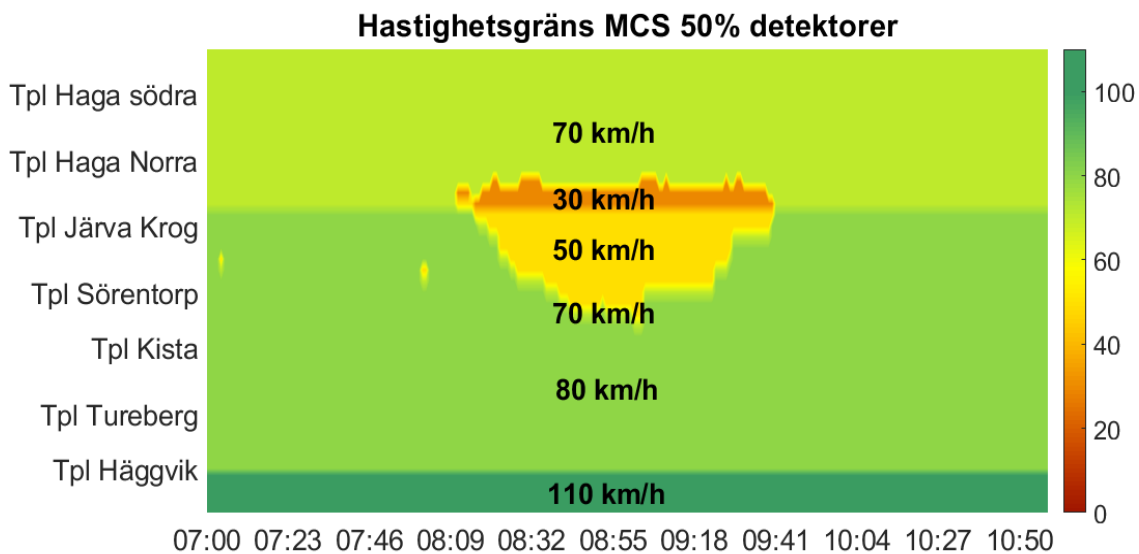
Olika andelar detektorer har inkluderats vid estimering av trafikillståndet. Trafikillståndet har använts som input för att avgöra vilken styrstrategi som ska tillämpas. VSL-schema för olika andelar detektorer har sedan jämförts för att avgöra om man med färre antal detektorer kan reproducera ett acceptabelt VSL-schema jämfört med basfallet då man använder sig av fler detektorer. Också fördröjning har studerats för att undersöka hur andelen detektorer som används vid estimering av trafikillståndet påverkar utfallet av styrningen.

6.4.1. MCS-algoritmen

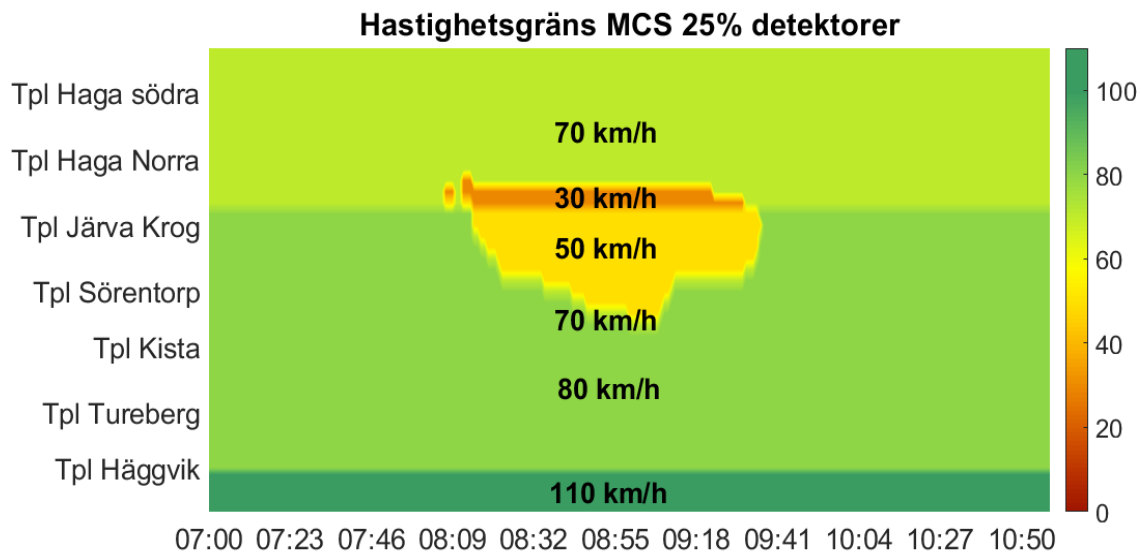
I Figur 28–Figur 30 presenteras hastighetsgränserna som MCS algoritmen sätter, för replikation 1, för de tre olika fallen med olika antal detektorer. Även om det finns vissa variationer mellan fallen, så sker hastighetsnedsättning och återgång till ursprunglig hastighet vid liknande tidpunkter.



Figur 28. Hastigheter med MCS algoritmen och samtliga detektorer. Hastigheten varierar från 0 (rött) till 100 (grönt) km/h.

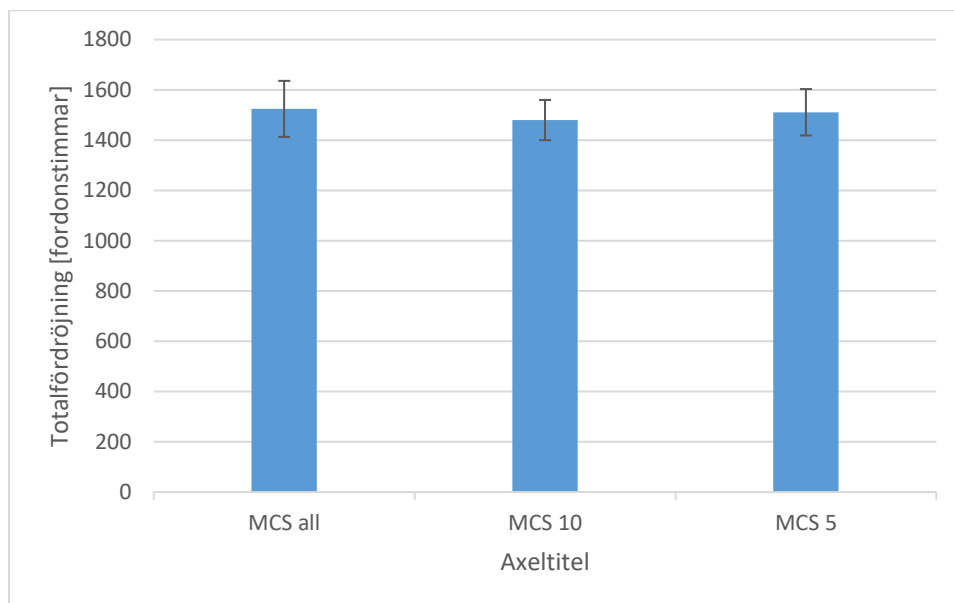


Figur 29. Hastigheter med MCS algoritmen och 10 detektorer. Hastigheten varierar från 0 (rött) till 100 (grönt) km/h.



Figur 30. Hastigheter med MCS algoritmen och 5 detektorer. Hastigheten varierar från 0 (rött) till 100 (grönt) km/h.

Figur 31 visar den totala fördröjningen i minuter för samtliga replikationer och med ett 95-procentigt konfidensintervall. Inga stora skillnader finns här mellan fallen och dessa skillnader är inte heller signifikanta. Man kan därför dra slutsatsen att dessa resultat tyder på att estimerade hastigheter kan användas som ersättning till uppmätta hastigheter utan att i alltför stor utsträckning påverka hur styralgoritmen beter sig.

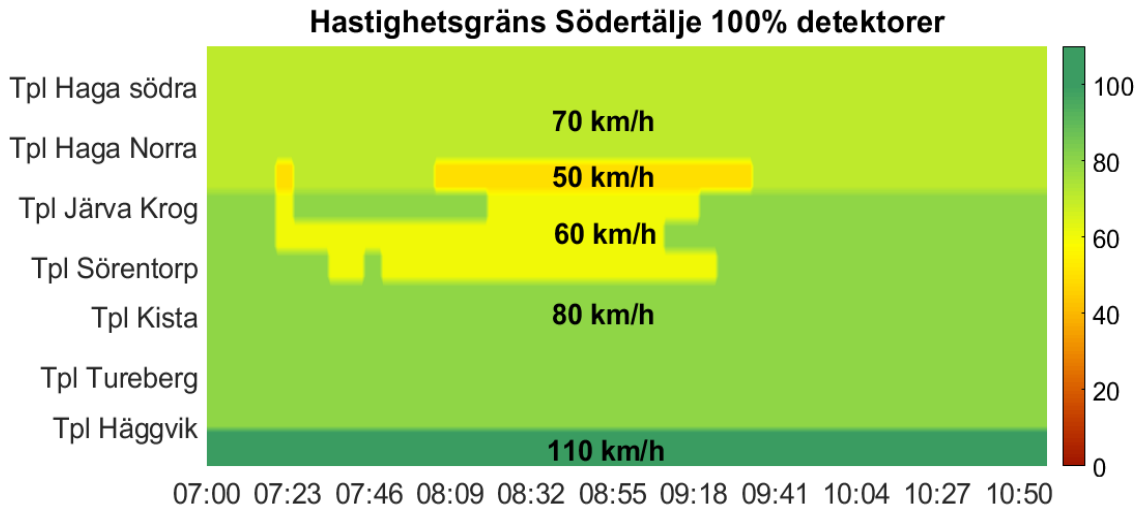


Figur 31. Total fördröjning i minuter, med MCS algoritmen, för de tre olika fallen, och med ett 95-procentigt konfidensintervall.

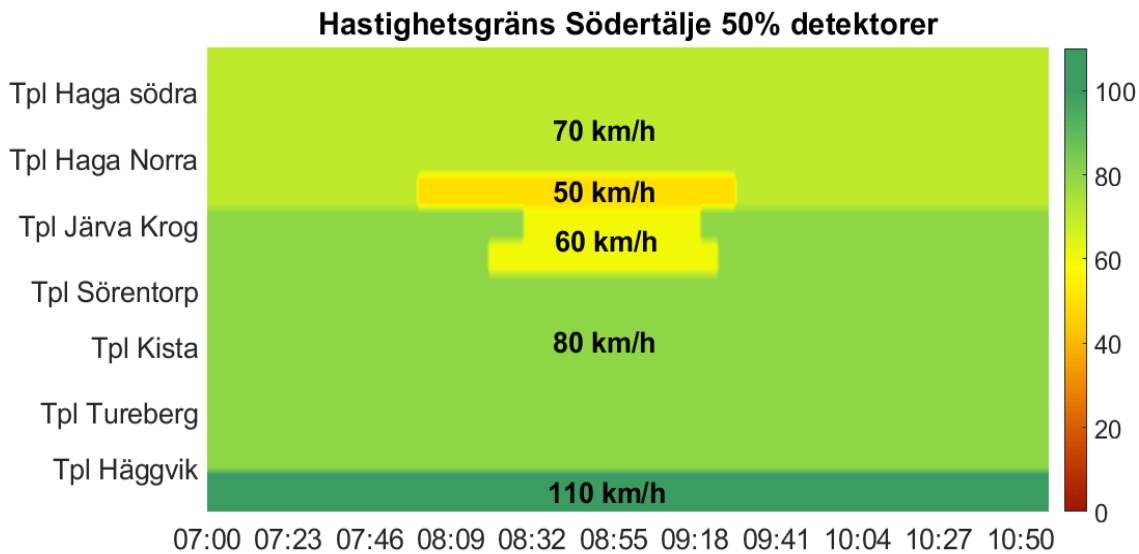
6.4.2. Södertäljealgoritmen

I Figur 32–Figur 34 presenteras hastighetsgränserna som Södertäljealgoritmen sätter, för replikation 1, för de tre olika fallen med olika antal detektorer. Hastighetsnedsättning sker under en kortare period, när färre antal detektorer används. Detta kan förklaras med att Södertäljealgoritmen aktiverar hastighetsnedsättning även vid små förändringar i trafikförhållandet, och detta har inte estimeringsmetoden lyckats fånga. Ytterligare kalibrering av styralgoritmen skulle kunna avhjälpa detta genom att hastighetsnedsättning undviks vid små förändringar i trafikförhållanden. Man bör dock

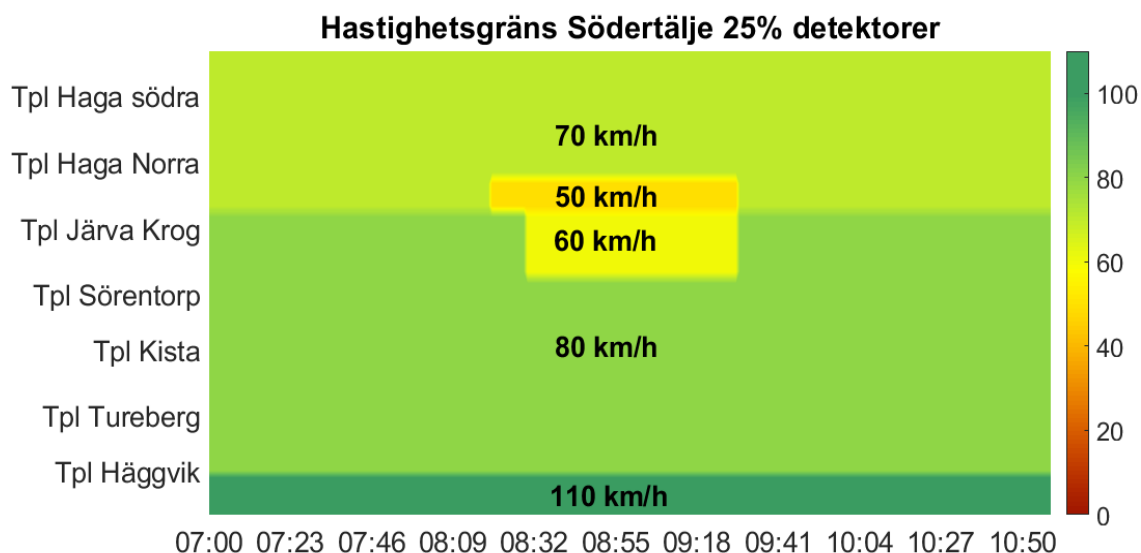
ta hänsyn till att algoritmen bör aktiveras innan sammanbrott för att uppnå önskad effekt. Det finns därför två svårigheter som bör beaktas. För det första krävs noggrann kalibrering av kapaciteten, vilket påverkar hur algoritmen presterar med eller utan estimering och för det andra krävs att estimeringen lyckas fånga även mindre förändringar för att kunna agera som substitut för icke-fungerande och saknade detektorer.



Figur 32. Hastigheter med Södertäljealgoritmen och samtliga detektorer. Hastigheten varierar från 0 (rött) till 100 (grönt) km/h.

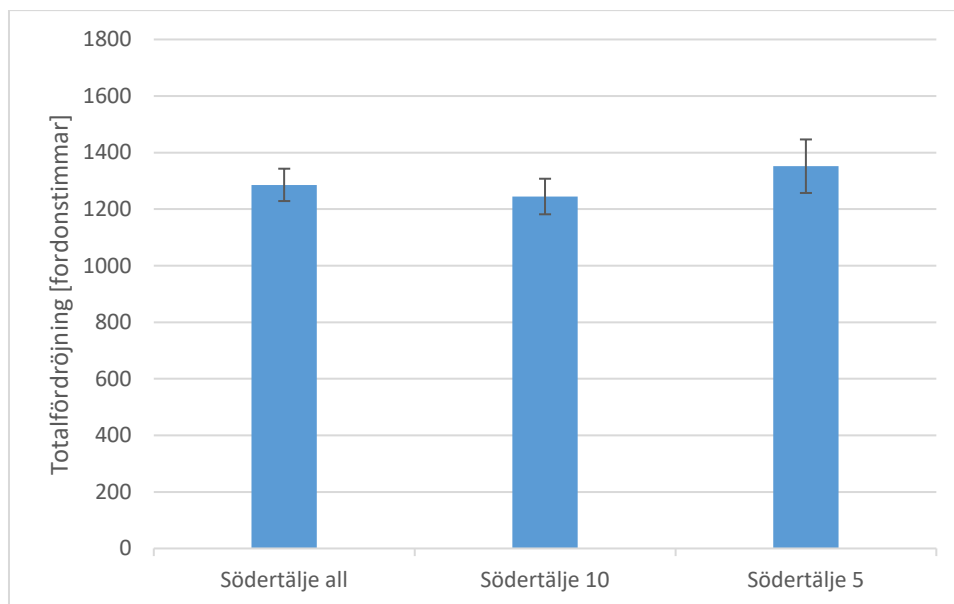


Figur 33. Hastigheter med Södertäljealgoritmen och 10 detektorer. Hastigheten varierar från 0 (rött) till 100 (grönt) km/h.



Figur 34. Hastigheter med Södertäljealgoritmen och 5 detektorer. Hastigheten varierar från 0 (rött) till 100 (grönt) km/h.

I Figur 35 jämförs den totala fördröjningen för de olika fallen tillsammans med ett 95-procentigt konfidensintervall. Det är där tydligt att fallet med endast fem detektorer ger en högre fördröjning. Skillnaderna mellan fallen är också överlag större jämfört med MCS algoritmen, även om skillnaderna fortfarande inte är signifikanta. Att en större fördröjning ses i fallet med endast fem detektorer kan man tolka som att fler detektorer behövs för att Södertäljealgoritmen ska prestera bra med hänsyn till framkomlighet. Detta innebär att med för få detektorer aktiva förlorar algoritmen sitt syfte och då speciellt eftersom små förändringar inte detekteras lika effektivt under estimeringen av trafikillstånd.



Figur 35. Total fördröjning i minuter, med Södertäljealgoritmen, för de tre olika fallen, och med ett 95-procentigt konfidensintervall.

7. Slutsatser och fortsatt arbete

Variabla hastighetsgränser kan öka framkomligheten på urbana motorvägar. Störst effekt fås då VSL-systemen används för vägsträckor där man ligger nära eller bara något över kapacitetsnivåer. Det finns också större framkomlighetsvinster då bashastigheten på vägen är hög, dvs. på vägsträckor med 100 km/h eller mer som bashastighet. Detta beror på att spridningen i hastighet mellan olika fordon och fordonstyper är störst på dessa sträckor och vinsten med ett mer homogent trafikflöde är därmed stor.

Att belastningsgraden har stor påverkan på resultatet blir tydligt då man jämför mikrosimuleringsstudien för Stora Wäsby med den för Häggvik-Eugenia tunneln. Vid trafikflöden högt över kapacitetsnivåer, vilket är fallet för Häggvik-Eugenia tunneln scenariot, ger VSL-systemet mindre effekt. Detta gäller för alla algoritmer, även om man kan visa att en homogeniseringsalgoritm som Södertäljealgoritmen kan ge något förbättrad trafiksituation (en icke-signifikant förbättring på 11 % i totala restiden). Detta beror främst på ett tidigare agerande då man närmar sig ett instabilt trafik tillstånd och att hastigheten inte sänks lika mycket som då MCS-algoritmen används. Detta kan jämföras med Stora Wäsby scenariot då man ligger nära och strax över kapacitetsnivåer och dessutom har en högre bashastighet. I detta fall ses större vinster med användningen av ett VSL-system.

En annan viktig sak som påverkar möjligheten till ett effektivt VSL-system är hur komplext nätverket är. Också här skiljer sig scenariot för Häggvik-Eugenia tunneln och scenariot för Stora Wäsby åt. För Stora Wäsby är vägen mer homogen och flaskhalsarna är lättidentifierade medan Häggvik-Eugenia tunneln består av ett väldigt komplext nätverk. Det visar att det är svårare att få bra effekt av enbart VSL-system för mer komplexa nätverk.

I den här studien antas ett tvingande system och förarna antas följa hastighetsskyltningarna utifrån sin egen önskade fördelning. Detta är viktigt för att uppnå effekt av VSL-systemen. I annat fall är risken stor att förare ignorerar rekommendationerna. Det kan till och med bli så att vissa väljer att följa rekommendationerna medan andra inte gör det, vilket kan öka instabiliteten i trafikflödet och därmed försämra både framkomlighet och säkerhet.

I den här rapporten har fokus varit på framkomlighet. Det kan därför vara så att de VSL-system som har undersöks kan ha positiva effekter på säkerhet och miljö. Ett exempel är MCS-algoritmen som troligtvis har positiva effekter med hänsyn till säkerhet då hastigheten sänks avsevärt vid instabila trafikflöden och när incidenter har inträffat, vilket leder till minskad risk för följdincidenter.

De effektsamband som studerats för olika hastigheter i kapitel 6 är i linje med resultat från liknande undersökningar. Då man kan minska hastigheten utan att avsevärt minska kapaciteten, dvs. det maximala flödet av fordon för hastigheter över 50 km/h, tyder det på att det är möjligt att förbättra framkomligheten på den simulerade vägsträckan med hjälp av VSL. Effektsambanden är också användbara vid kalibrering av den makromodell som ligger till grund för MMS-systemet.

Estimerade trafik tillstånd från MMS-systemet har visat sig användbara som input till MCS algoritmen. De variabla hastighetsgränser som beräknas med estimerade trafik tillstånd då avståndet mellan detektorer ökar avsevärt stämmer väl överens med de variabla hastighetsgränser som beräknas utifrån enbart detektordata. För Södertäljealgoritmen ses en del skillnader mellan de variabla hastighetsgränser som beräknas utifrån det estimerade trafik tillståndet och de variabla hastighetsgränser som fås då alla detektorer används. Det beror främst på att VSL-algoritmen styrs utifrån kapacitetsnivåer och är därmed kritisk för hur dessa har kalibrerats både i MMS-modellen och i VSL-algoritmen. Det är därför viktigt att göra en noggrann skattning av den kritiska densiteten och kanske även använda olika kritisk densitet för olika platser i VSL-algoritmen.

Man bör dock observera att även om VSL-scheman skiljer sig för Södertäljealgoritmen vid olika andelar detektorer så påverkar det inte fördröjningen så mycket (inga signifikanta skillnader har observerats), givet att man fortfarande har en så pass bra estimering av trafik tillståndet att man fångar

upp den mest överbelastade tidsperioden. Däremot har valet av styralgorithm större effekt på hur stor fördröjningen blir. Det är därför viktigt att i förväg definiera målet med VSL-algoritmen och vara medveten om att en algorithm med fokus på att förbättra trafiksäkerheten kanske inte förbättrar eller till och med försämrar framkomligheten.

Det finns en hel del intressanta områden att studera vidare. Vid implementeringen av nya VSL-algoritmer måste hänsyn tas till att metodiken ska kunna formuleras som en trafikföreskrift. Detta begränsar hur algoritmerna kan användas, vilket i sin tur kan leda till minskad effektivitet av de nya algoritmerna. Dessa föreskrifter kan tas i beaktande i simuleringarna för att utvärdera vad dessa begränsningar skulle innebära för framkomligheten.

En kombination av VSL-system och ytterligare en kontrollstrategi, som t.ex. påfartsreglering där man begränsar på-flödet från påfarter, skulle kunna öka nyttan av VSL-systemet, givet att man lyckas öka kapaciteten på den berörda sträckan eller begränsa mängden trafik som befinner sig på den berörda sträckan. Exempelvis kan körfältskontroll och ramp-metering användas som komplement. Det är då viktigt att förstå vad trafikstockningen beror på för att kunna sätta in rätt typ av åtgärd. Detta medför att olika åtgärder kan lämpa sig olika bra beroende sträcka.

Körfältsbyten vid på- och avfarter och incidenter har en stor effekt på kapaciteten. Genom att med enkla metoder dirigera om trafik i god tid innan på- och avfarter kan man minska mängden onödiga körfältsbyten vilket kan leda till ökad kapacitet och man kan på så sätt se till att endast de som ska köra av och på motorvägen finns i de berörda körfälten, s.k. körfältskontroll. Detta kan till exempel göras med hjälp av nedsatta hastigheter för vissa körfält där man vill få bort trafik, dirigering av trafik genom variabla meddelandeskyltar i god tid före av- och påfarter samt incidenter, etc. Detta har visat sig effektivt i tidigare simuleringsstudier av Zhang och Ioannou (2016).

I dagens system är fasta detektorer den huvudsakliga datakällan som används som input till VSL-algoritmen. Nya typer av datakällor som ger tillgång till data från "fordon-för-fordon" skulle kunna ge möjligheter till effektivare motorvägsstyrning, både för VSL-system men också för andra typer av system såsom körfältskontroll och ramp metering.

En förenklad prediktiv styrning verkar inte ha någon effekt på de VSL-algoritmer som har undersökts. En naturlig utvidgning av VSL-algoritmerna är att använda MMS-systemet för prediktering, och jämföra mer avancerad prediktiv styrning, såsom "model predictive control", utifrån ett fördröjningsperspektiv. Kraven på kalibrering och skattning av in- och utflöden kommer dock vara avsevärt högre än vid estimering. Exempel på model predictive control i VSL-system ges av Hegyi m.fl. (2005), Zegeye m.fl. (2009), Frejo m.fl. (2014) och Han m.fl. (2017).

Referenser

- Allström, A., Archer, J., Bayen, A. M., Blandin, S., Butler, J., Gundlegård, D., Koutsopoulos, H., Lundgren, J., Rahmani, M. & Tossavainen, O. P. Mobile Millennium Stockholm. Proceedings of the 2nd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, June 2011 Leuven, Belgium.
- Antoniou, C., Ben-Akiva, M. & Koutsopoulos, H. N. 2010. Kalman filter applications for traffic management. In: KORDIC, V. (ed.) *Kalman Filter*. InTech.
- Bayen, A., Butler, J. & Patire, A. D. 2011. Mobile Millennium Final Report. California Center for Innovative Transportation Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley.
- Dlr and Contributors. 2017. *SUMO homepage* [Online]. Available: <http://sourceforge.net/>.
- Frejo, J. R. D., Núñez, A., De Schutter, B. & Camacho, E. F. 2014. Hybrid model predictive control for freeway traffic using discrete speed limit signals. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 309-325.
- Grumert, E. 2014. *Cooperative Variable Speed Limit Systems : Modeling and Evaluation using Microscopic Traffic Simulation*. Linköping University.
- Han, Y., Hegyi, A., Yuan, Y., Hoogendoorn, S., Papageorgiou, M. & Roncoli, C. 2017. Resolving freeway jam waves by discrete first-order model-based predictive control of variable speed limits. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 405-420.
- Hegyi, A., De Schutter, B. & Hellendoorn, J. 2005. Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6, 102-112.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. & Bieker, L. 2012. Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5.
- Li, D., Ranjitkar, P. & Ceder, A. 2014. A logic tree based algorithm for variable speed limit controllers to manage recurrently congested bottlenecks.
- Lind, G. & Strömberg, P. 2011. Säkerhetseffekter av trafikledning och ITS, Litteraturinventering, v0.9. Movea.
- Lucero, R. P. & Åstrand, O. 2016. Störningsrapporten 2015, en sammanfattning av störningar i Stockholms vägtrafik under det gångna året.
- Maunsell, F. & Parkman, M. 2007. M25, Controlled Motorways, Summary Report. Bristol, UK: Highway Agency.
- Movea 2015. E4/E20 Södertäljevägen, Effekter av trafikledning, vägrensutnyttjande och nödfickor, Slutrapport
- Müller, E. R., Carlson, R. C., Kraus, W. & Papageorgiou, M. 2015. Microsimulation Analysis of Practical Aspects of Traffic Control With Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16, 512-523.
- Nissan, A. & Koutsopoulos, H. N. 2011. Evaluation of the Impact of Advisory Variable Speed Limits on Motorway Capacity and Level of Service. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, 100-109.
- Olstam, J. & Bernhardsson, V. 2017. Speed-flow relationships for Swedish rural roads – Suggestions for revised relationships based on traffic measurements from 2012–2015. *VTI report*. Linköping, Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) (commissioned by Swedish Transport Administration).

- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E. & Papamichail, I. 2008. Effects of variable speed limits on motorway traffic flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 37-48.
- Van Den Hoogen, E. & Smulders, S. Control by variable speed signs. Results of the Dutch experiment. Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 1994 London, UK. IET, 145-149.
- Van Toorenburg, J. a. C. & De Kok, M. L. 1999. Automatic incident detection in the motorway control system MTM. Gouda, Holland: Swedish National Road Administration.
- Zegeye, S. K., Schutter, B. D., Hellendoorn, H. & Breunese, E. 2009. Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control. 5392-5392.
- Zhang, Y. & Ioannou, P. A. 2016. Combined Variable Speed Limit and Lane Change Control for Highway Traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut, är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut inom transportsektorn. Huvuduppgiften är att bedriva forskning och utveckling kring infrastruktur, trafik och transporter. Kvalitetssystemet och miljöledningssystemet är ISO-certifierat enligt ISO 9001 respektive 14001. Vissa provningsmetoder är dessutom ackrediterade av Swedac. VTI har omkring 200 medarbetare och finns i Linköping (huvudkontor), Stockholm, Göteborg, Borlänge och Lund.

The Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), is an independent and internationally prominent research institute in the transport sector. Its principal task is to conduct research and development related to infrastructure, traffic and transport. The institute holds the quality management systems certificate ISO 9001 and the environmental management systems certificate ISO 14001. Some of its test methods are also certified by Swedac. VTI has about 200 employees and is located in Linköping (head office), Stockholm, Gothenburg, Borlänge and Lund.

HEAD OFFICE
LINKÖPING
SE-581 95 LINKÖPING
PHONE +46 (0)13-20 40 00

STOCKHOLM
Box 55685
SE-102 15 STOCKHOLM
PHONE +46 (0)8-555 770 20

GOTHENBURG
Box 8072
SE-402 78 GOTHENBURG
PHONE +46 (0)31-750 26 00

BORLÄNGE
Box 920
SE-781 29 BORLÄNGE
PHONE +46 (0)243-44 68 60

LUND
Bruksgatan 8
SE-222 36 LUND
PHONE +46 (0)46-540 75 00

