



Centre for Transport Studies

S T O C K H O L M

Dynamiska trängselindex

Erik Jenelius, Institutionen för Transportvetenskap, KTH, erik.jenelius@abe.kth.se

Ida Kristoffersson, Trafikanalys och Logistik, VTI, ida.kristoffersson@vti.se

Magnus Fransson, Trafikanalys, Sweco Society AB, magnus.fransson@sweco.se

CTS Working Paper 2017:X

Slutrapportering av forskningsprojektet "Dynamiska trängselindex och adaptiva trängselavgifter" som har genomförts på uppdrag av Trafikverket (TRV 2015/5784)

Keywords: Macroscopic fundamental diagram; congestion indices; transport models; validation;

JEL Codes: R41, R48

Förkortningar

DTA	Dynamic traffic assignment
GPS	Global positioning system
FCD	Floating car data
MFD	Macroscopic fundamental diagram - makroskopiskt fundamentaldiagram
OD-mönster	Origin-destination-mönster - resmönster mellan olika start- och målzoner
TTD	Total travelled distance - total reslängd
TTS	Total time spent - total restid
VHT	Vehicle hours travelled - antal fordonstimmar
VKT	Vehicle kilometers travelled - antal fordonskilometer
VMS	Variable message sign - variabel informationsskylt

Sammanfattning

Dynamiska trängselindex

av Erik Jenelius (KTH), Ida Kristoffersson (VTI) och Magnus Fransson (Sweco)

Under det senaste decenniet har nya datakällor, så som GPS-data från taxibilar och storskaliga system av fasta detektorer, gett betydligt större möjligheter att kartlägga hur trängseln varierar i en stad, d.v.s. variation mellan gator och områden, olika tidpunkter på dagen och mellan olika månader eller år.

På den teoretiska sidan har det, under ungefär samma tidsperiod, upptäckts ett samband mellan fordonstäthet och hastighet på områdesnivå, vilket kallas det makroskopiska fundamentaldiagrammet (MFD). Tidigare har detta samband uppmätts på länknivå och kallas då fundamentaldiagram (FD). MFD kopplar samman antalet fordon i ett område med den genomsnittliga hastigheten eller flödet i området. Man har också visat att MFD under ideala förhållanden är en egenskap hos nätverket i sig (infrastruktur och trafikstyrning), d.v.s. det beror inte på efterfrågan.

I denna rapport använder vi dessa nya trafikmätningmetoder och teoretiska framsteg inom MFD för två syften. För det första beskriver vi hur trängseln varierar över dagen på Södermalm och i City-området i Stockholm genom att titta på MFD från empiriska datakällor så som GPS-data från taxi-bilar, slangmätningar och restidskameror. För det andra jämför vi simulerat MFD för City-området med empiriskt MFD för samma område. Detta för att validera hur väl City-modellen framtagen med simuleringsverktyget Transmodeller kan återskapa trängselsituationen på områdesnivå.

Rapporten visar att väldefinierade MFD existerar både för Södermalm och City-området. MFD visar att hastigheten sjunker och fordonstätheten ökar under morgonens och eftermiddagens rusningstimmar, men trängselnivåerna når inte den punkt där flödet börjar avta trots att fordonstätheten ökar (hyperträngsel). Det är således trångt i innerstaden under rusningstimmarna, men kapaciteten i nätverket räcker ändå till. De två stora lederna Stadsgårdsleden och Sveavägen visar dock tecken på hyperträngsel om fundamentaldiagram skapas separat för dessa leder.

Vidare visar rapporten att MFD har stor potential som verktyg för att validera en simuleringsmodell. I rapporten jämförs MFD från City-området i Transmodeller med empirisk MFD för samma område. Simuleringsmodellen överskattar flöde och hastighet vid låg densitet. Vid hög densitet ändras dock bilden och simuleringsresultaten underskattar flöde och hastighet. Det verkar som att kapaciteten i nätverket underskattas, vilket ger högre trängsel i modellen än i mätdata. MFD från Transmodeller visar lägre flöden under avvecklingen av rusningen än under uppbyggnaden, både under förmiddag och eftermiddag, vilket inte syns i de empiriska data. Detta tyder på att det finns stora kö-problem i simuleringsmodellen, vilket man inte ser tecken på i empiriskt MFD.

Summary

Dynamic congestion indices

by Erik Jenelius (KTH), Ida Kristoffersson (VTI) and Magnus Fransson (Sweco)

Over the last decade, new data sources, such as GPS data from taxis and large-scale systems of fixed sensors, have created new opportunities to understand how congestion varies in a city, i.e. variation between streets and areas, different times of the day and between months or years.

On the theoretical side, a relationship between vehicle density and speed at area level has been discovered around the same point in time. This relationship is known as the macroscopic fundamental diagram (MFD). Previously, this relationship has been measured at link level and is then simply called the fundamental diagram (FD). MFD connects the number of vehicles in an area with the average speed or flow in that area. It has also been shown that under ideal conditions MFD is a property of the network itself (infrastructure and traffic management), i.e. it does not depend on demand.

In this report, we use these new traffic measurement methods and theoretical advances in MFD for two purposes. First, we describe how congestion varies over the day at Södermalm and in the City area of Stockholm by looking at MFD from empirical data sources such as GPS data from taxis, tube measurements and travel time cameras. Secondly, we compare the simulated MFD for the City area with the empirical MFD for the same area. This is done to validate how well the City model developed with the Transmodeller software simulation tool can reproduce the congestion situation at area level.

The report shows that well-defined MFD exist for both Södermalm and the City area. These MFD show that speed decreases and vehicle density increases during rush hour of the morning and afternoon, but that congestion levels do not reach the point where flow begins to decrease despite the increase in vehicle density (hypercongestion). It is thus crowded in the inner city during peak hours, but capacity of the network is still enough. The two major arterials Stadsgårdsleden and Sveavägen show however signs of hypercongestion when fundamental diagrams are created separately for these arterials.

Furthermore, the report shows that MFD has great potential as a tool for validating simulation models. The report compares MFD from the City area of Transmodeller with empirical MFD for the same area. The simulation model overestimates flow and speed at low density. However, at high density, the picture changes and simulation results underestimate flow and speed. It seems as if the capacity of the network is underestimated in the simulation model, resulting in higher congestion in the model than in measurement data. MFD from Transmodeller shows lower flows during the dissipation of the queues at rush hour than during the build-up, both in the morning and afternoon, which is not reflected in the empirical data. This indicates that there are major queuing problems in the simulation model, which cannot be seen in the empirical MFD.

Innehåll

1	Introduktion	6
1.1	Bakgrund.....	6
1.2	Syfte.....	6
1.3	Genomförande och metod	7
2	Litteraturstudie	8
2.1	Inledning	8
2.2	Litteraturstudiens syfte.....	8
2.3	Teori och empiri för MFD	9
2.4	Användning av MFD för trafikstyrning i urbana nätverk... 22	
3	Empirisk analys av MFD	33
3.1	Södermalm	33
3.2	City-området	41
4	Diskussion: Potentialen hos MFD för trafikledning i Stockholm.....	48
4.1	MFD för nivåsättning av trängselavgifter	48
4.2	MFD för zonreglering av trafik.....	48
4.3	MFD för beslutsstöd och information.....	49
5	Validering av Transmodeller för City-området.....	50
5.1	Simuleringsmodellen.....	50
5.2	Nätverket	50
5.3	Efterfrågan	51
5.4	Jämförelse av simuleringsresultat mot mätningar	52
6	Validering av Transmodeller för Södermalm	55
6.1	Simuleringsmodellen och nätverket.....	55
6.2	Efterfrågan	55
6.3	Jämförelse av simuleringsresultat mot mätningar	56
7	Slutsatser.....	58
7.1	Framtida arbete	58
	Referenser.....	60

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Många städer, däribland Stockholm, står inför stora trängsel- och luftkvalitetsproblem. Även om trafiksignaler länge har använts för att reglera trafiken lokalt så har det traditionellt saknats medel för att styra trafiken och trängseln på systemnivå. En anledning har varit praktisk: bara begränsade mätningar av trafikförhållanden fanns tillgängliga. En annan anledning var teoretisk: det saknades robusta metoder för att prediktera hur olika styrplaner skulle påverka trafiken på systemnivå.

På senare år har framsteg gjorts inom trafikdatainsamling och modellering. Ett viktigt tillskott till tidigare datakällor är GPS-data från fordon, som kan ge mycket bättre täckning av gatunätet till en bråkdel av kostnaden för stationära sensorer. GPS-sändare ger hastighetsdata (och möjligtvis flödesdata) från alla delar av nätet där utrustade fordon rör sig, även små sidogator. Floating car-data kombinerade med andra datakällor ger helt nya möjligheter för att dynamiskt övervaka trängselnivåerna i hela staden. Det är nu möjligt att studera hur trängseln varierar över dagen, mellan dagar, månader och till och med år i olika delar av staden som följd av förändringar i reseefterfrågan, infrastrukturprojekt, framkomlighetssatsningar osv.

På den teoretiska sidan har det nyligen upptäckts att sambandet mellan fordonstäthet och hastighet, som normalt mäts på länknivå, under vissa förhållanden även existerar för större områden som kvarter och stadsdelar. Det så kallade makroskopiska fundamentaldiagrammet (MFD) kopplar samman antalet fordon i ett område med den genomsnittliga hastigheten eller flödet i området. Dessutom finns det ett robust linjärt samband mellan det genomsnittliga flödet i området och det totala utflödet, liksom takten i vilken fordonen når sina destinationer.

Man har också visat att MFD under ideala förhållanden är en egenskap hos nätverket i sig (infrastruktur och trafikstyrning), d.v.s. det beror inte på efterfrågan. Det genomsnittliga flödet når till exempel sitt maximum vid samma fordonstäthet eller medelhastighet oberoende av origin-destination-mönstren (OD-mönstren). Med hjälp av MFD skulle trängselnivåerna kunna regleras genom att kontrollera flödet av fordon inne i, in i eller ut ur staden. Man har visat att MFD kan estimeras precis med hjälp av de mätmetoder som finns tillgängliga i Stockholm och Göteborg, som trafikräkningar, restidskameror och floating car-data (Geroliminis och Daganzo, 2008).

1.2 Syfte

Projektet har två syften: dels att undersöka om det går att identifiera empiriska MFD för två områden i Stockholm – City och Södermalm, och dels att undersöka möjligheten att använda MFD som ett sätt att validera trafikmodeller för storstäder. Utvärderingen av MFD som valideringsmetod kommer ske genom att testa validering av Transmodeller som en del i utvecklingen av en storstadsmodell för Stockholm. Genom att undersöka hur väl Transmodeller kan

återspegla empiriska MFD för City-området kan modellens förmåga att representera nätverkets egenskaper på en makroskopisk nivå utvärderas.

1.3 Genomförande och metod

Projektet har delats in i två arbetspaket: arbetspaket 1 – Litteraturstudie och identifiering av empiriska makroskopiska fundamentaldiagram för Stockholm, samt arbetspaket 2 – Validering av Transmodeller som storstadsmodell mot empiriskt MFD.

I det första arbetspaketet genomfördes först en litteraturstudie kring både teori och tillämpningar av MFD (se avsnitt 2). Detta för att se vad som har gjorts internationellt innan MFD tillämpas för svenska förhållanden.

Vidare har empiriska MFD för Södermalm och City-området i Stockholm beräknats och analyserats (se avsnitt 3). Tre olika datakällor har använts för att beräkna MFD: slang-mätningar (City), restidskameror (Södermalm) och floating-car-data från taxibilar (City och Södermalm). MFD har jämförts mellan de olika områdena i Stockholm och mellan de olika datakällorna. MFD talar om hur nära sin kapacitet stadstrafiken ligger i olika delar och vid olika tidpunkter. Det belyser också hur mycket genomströmningen och medelhastigheten skulle kunna ökas genom att reglera trafiken med trafikledningsstrategier.

I det andra arbetspaketet har vi undersökt hur MFD kan användas för validering av trafikmodeller för storstäder. Projektet har byggt vidare på pågående arbete med att ta fram och kalibrera en storstadsmodell för Stockholm i Transmodeller. Traditionellt valideras trafikmodeller genom att jämföra till exempel beräknade och simulerade flöden och restider på utvalda länkar och rutter. Det är dock välkänt att kalibrering av trafikmodeller är ett underbestämt problem, dvs. antalet fria parametrar överstiger antalet observationer ("frihetsgrader"). Det innebär att många olika parameteruppsättningar skulle kunna ge ungefär lika goda resultat i kalibrering och validering. Det finns alltså behov av att validera modellerna i fler avseenden.

2 Litteraturstudie

2.1 Inledning

Modern trafikledning och trafikplanering i storstadsregioner handlar i allt större utsträckning om att styra resandet så att den befintliga infrastrukturen används så effektivt som möjligt. Ett effektivt transportsystem klarar av att hantera en hög efterfrågan så att restider hålls inom en rimlig nivå och att höga flöden upprätthålls.

Vägtransportsystemet i en storstad är komplext, och det är svårt att förutse vilka effekter som olika trafikledningsåtgärder får på systemets kapacitet överlag. Därmed är det också svårt att hitta de bästa strategierna för trafikledning. Fortfarande baseras trafikledning i praktiken på erfarenheten och expertisen hos trafikledarna med stöd av trafikkameror och annan information. Det pågår samtidigt en utveckling mot trafikledning med stöd av simuleringsmodeller som i realtid kalibreras mot aktuella trafikdata. Simuleringsmodellen kan sedan stegas framåt i tiden för att prediktera hur trafikläget kommer att utveckla sig de närmaste minuterna och timmarna, och för att utvärdera effekterna av olika trafikledningsåtgärder.

Trafiksimuleringsmodeller är dock relativt komplicerade och resurskrävande att använda, och måste gå igenom tids- och datakrävande kalibrering av OD-matriser och andra parametrar för att kunna ge tillförlitliga resultat. Det finns alltså ett värde i att hitta enklare modeller, som på en aggregerad nivå kan beskriva det dynamiska sambandet mellan trafikmängder och trängselnivåer i storstäder. På mikroskopisk nivå är det välkänt att storheter som flöde, densitet och hastighet hänger ihop enligt enkla matematiska samband, ett s.k. fundamentaldiagram. Teorin kring makroskopiska fundamentaldiagram (MFD) handlar om att liknande samband mellan motsvarande storheter under vissa förutsättningar kan existera även inom större områden (ungefär på stadsdelsnivå), dvs på makroskopisk nivå. Ett MFD relaterar alltså trafikmängden i ett område till områdets trängselnivå (medelhastighet), samt till takten som resor avslutas (inom området eller genom att lämna det). En av anledningarna till att MFD har rönt sådant intresse är att de antyder att mobiliteten kan optimeras dynamiskt genom att reglera in- och utflödet av fordon till stadsdelen.

2.2 Litteraturstudiens syfte

Denna litteraturstudie syftar till att beskriva state-of-the-art inom MFD vad gäller teori, empiri och tillämpning. MFD är ett relativt nytt forskningsfält och en internationell översikt behövs innan metoderna tillämpas på svenska förhållanden.

Litteraturstudien presenterades vid ett seminarium på KTH 25 maj 2015 kl. 11:30 (Teknikringen 10) och delges intresserade tjänstemän, forskare och konsulter.

2.3 Teori och empiri för MFD

2.3.1 De första studierna

Den moderna litteraturen kring MFD kan sägas starta med en serie artiklar av Daganzo och Geroliminis. Daganzo (2007) visar att trafik kan modelleras dynamiskt i större tätortsområden (stadsdelar) på en aggregerad nivå om sådana områden uppvisar två egenskaper:

Ett "makroskopiskt fundamentaldiagram" som kopplar ihop antalet fordon som kör i området (*ackumulation*) och medelhastigheten eller flödet i området, samt Ett robust samband mellan det genomsnittliga flödet i området och det totala utflödet.

Enligt denna teori bör ett MFD ha ett väldefinierat maximum och inte förändras när efterfrågan förändras över dagen och mellan dagar. Notera att ackumulation är den genomsnittliga *densiteten* av fordon multiplicerat med den totala längden väg i området (vilken är konstant).

Ett annat sätt (Geroliminis and Daganzo 2007) att uttrycka antagande (1) ovan är att om ett nätverk är ungefär homogent belastat och trängseln är ungefär jämnt utspridd över nätverket, så är i *steady-state* nätverkets totala *produktion* (dvs. antalet fordonskilometer per tidsenhet) summan av produktionen hos varje enskild länk, och kan uttryckas som en funktion av den totala ackumulationen i nätverket:

$$P = \sum_i P_i = \sum_i Q_i(n_i) \approx Q(\sum_i n_i),$$

där n_i är ackumulationen på länk i , Q_i är produktionsfunktionen (från fundamentaldiagrammet mellan flöde och densitet) för länk i och Q är en aggregerad (makroskopisk) produktionsfunktion för nätverket.

Påstående (2) ovan innebär att den totala utmatningen D (antal fordon som avslutar sina resor per tidsenhet) i steady state är en funktion av den totala ackumulationen, $D = G(\sum_i n_i)$, där G är en positiv, unimodal "utmatningsfunktion". Man kan också visa (Geroliminis and Daganzo 2007) att förhållandet mellan D och P är linjärt och ges av:

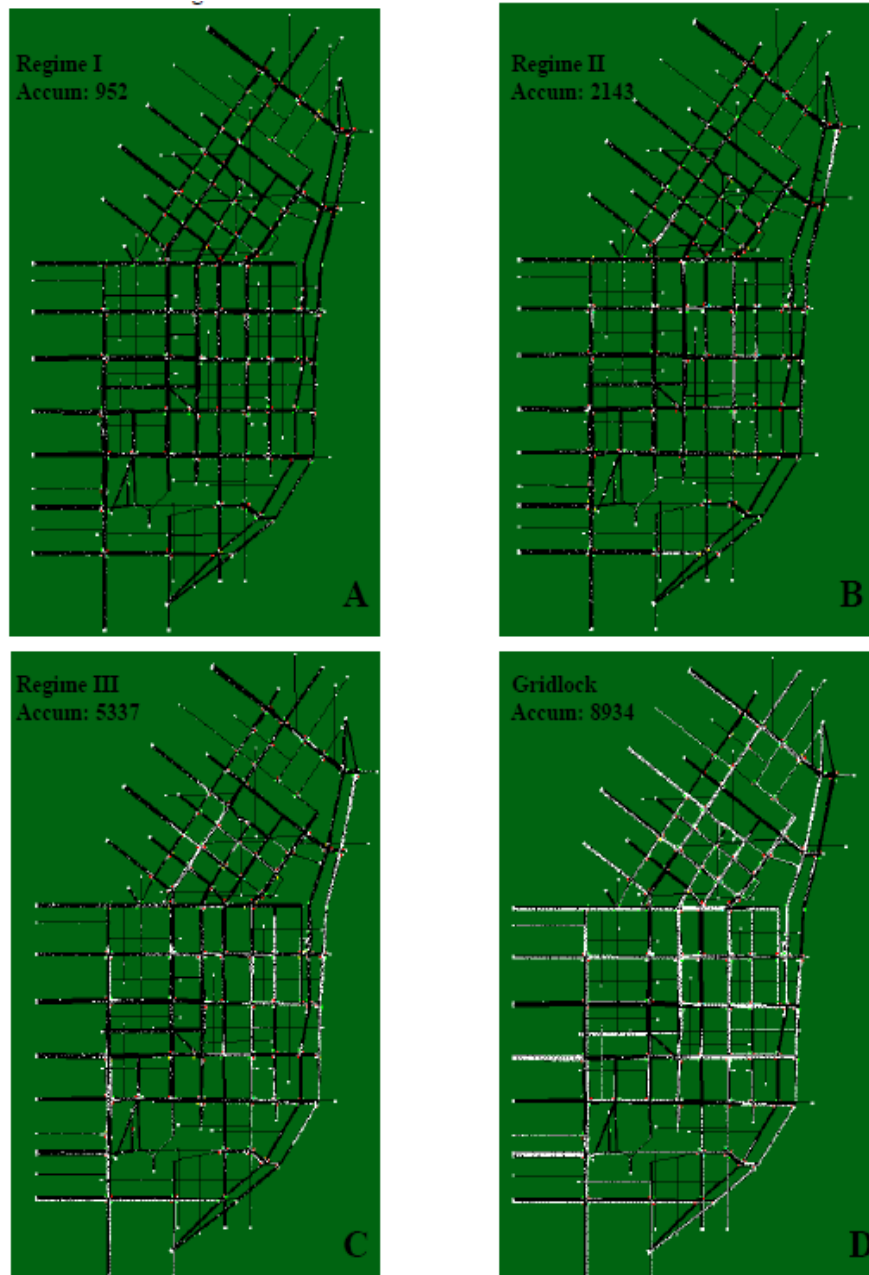
$$\frac{D}{P} = \frac{1}{L},$$

där L är den genomsnittliga reslängden för alla fordon som reser i nätverket.

Daganzo (2007) antar vidare att detta förhållande gäller både i steady-state och när förhållandena (t.ex. efterfrågan) förändras långsamt och mjukt med tiden, och härleder ordinära differentialekvationer för systemdynamiken i ett område, med ackumulation som tillståndsvariabel. Artikeln utvecklar också en optimal reglerstrategi för ett sådant system. Grundidén hos strategin är att reglera inflödet i systemet och hålla fordon utanför systemet vid behov.

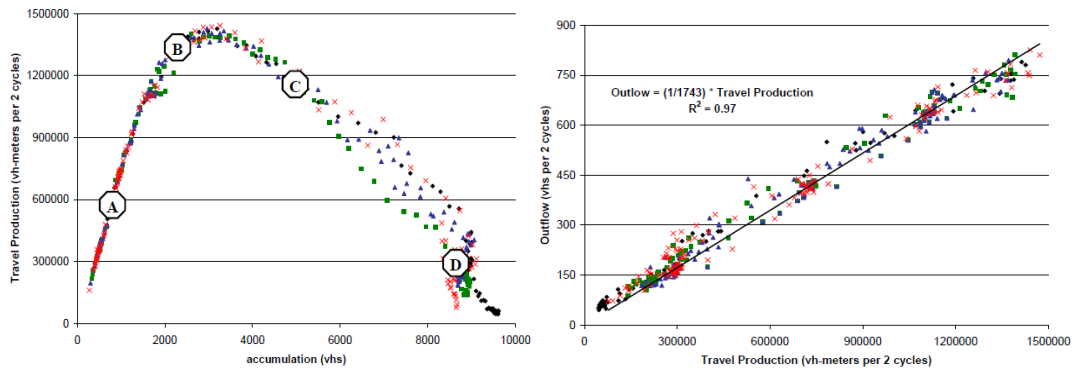
Före Daganzo (2007) fanns visst stöd för de två antagandena ovan från analyser av empiriska data och simuleringar, t.ex. Godfrey (1969) och Ardekani och

Herman (1987), men de första djuplodande dynamiska analyserna av nätverk med hög trängsel gjordes av Geroliminis och Daganzo (2007) och (2008). Geroliminis och Daganzo (2007) använder en mikrosimuleringsmodell (CORSIM) och studerar gatunätet i centrala San Francisco. Trafiken simuleras över fyra timmar och efterfrågan varieras rumsligt och dynamiskt i olika körningar. Figur 1 visar nätverket under simulering. I tillstånd A är systemet undermåttat och medelhastigheten är ca 25 km/h. När efterfrågan stiger rör sig systemet till tillstånd B där produktionen närmar sig maximum och medelhastigheten är 17 km/h. I tillstånd C är trängseln utbredd med långa köer och medelhastigheten 7 km/h. I tillstånd D är utflödet nästan noll och de flesta fordon står still.



Figur 1: Nätverket för centrala San Francisco under olika trafikregimer; vita punkter är fordon, svarta linjer är vägar (Geroliminis och Daganzo, 2007).

Figur 2a visar resproduktion mot ackumulation aggregerat över två signalcykler för hela nätverket och olika körningar. De fyra tillstånden A-D ovan har markerats för jämförelse. Ett tydligt samband kan utläsas, framför allt i de tre minst belastade tillstånden. Figur 2b visar utflöde mot resproduktion. Man kan se att utflödet, som normalt inte kan observeras, är starkt korrelerat med resproduktionen, som kan observeras, under varierande trafikförhållanden.



Figur 2: MFD för centrala San Francisco från mikrosimulering. Resproduktion mot ackumulation (a), och utflöde mot resproduktion (b), för olika körningar (Geroliminis och Daganzo, 2007).

Geroliminis och Daganzo (2008) använder empiriska data från Yokohama, Japan, för en liknande skattning av MFD och samband mellan produktion och utmatning. Studieområdet består av en ca 10 km² stort triangulärt område i centrala Yokohama (Figur 3c). Inom detta område ligger korsningarna tätt (100-300m) och är signalreglerade. Hög trängsel råder under morgon och eftermiddagsrusning med medelhastigheter under 10 km/h. Data från två typer av källor fanns tillgängliga:

Fasta sensorer: 500 ultraljuds- och induktiva slingdetektorer placerade på huvudgator ca 100 m uppströms från de flesta större korsningar, med fordonsräkningar och beläggningsmätningar (occupancy) per 5-minutersintervall.

Mobila sensorer: 140 taxibilar med GPS som rapporterar sin position och annan information med tidsangivelser. GPS-datan var inte kopplad till någon digital vägkarta för Yokohama (så kallad map-matching).

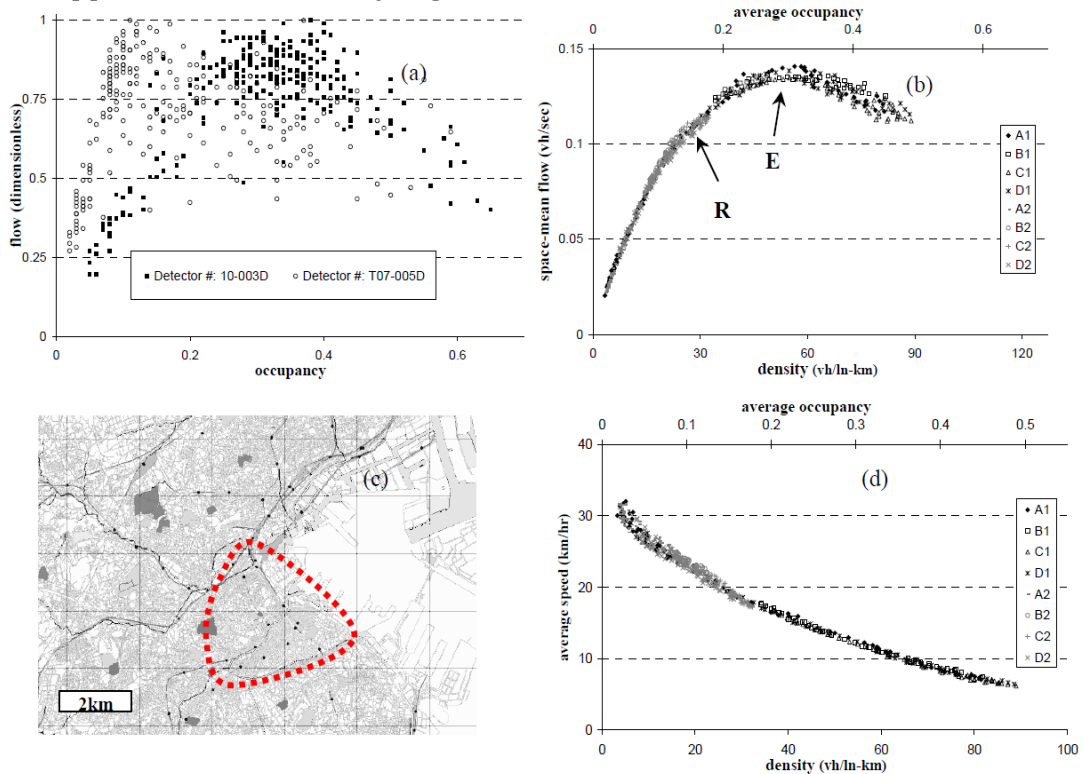
Författarna analyserar först data från de fasta sensorerna. För sensor (länk) i skattas densiteten $k_i = o_i/s$, där o_i är beläggningen (occupancy) och s är den genomsnittliga effektiva fordonslängden, ca 5,5 m. Därefter beräknas viktade och oviktade medelvärden över alla sensorer:

$$q^w = \frac{\sum_i l_i q_i}{\sum_i l_i}, q^u = \frac{\sum_i q_i}{N}$$

$$k^w = \frac{\sum_i l_i k_i}{\sum_i l_i}, k^u = \frac{\sum_i k_i}{N}$$

De oviktade medelvärdena är rumsliga medelvärden enligt Edie (1963) för just de körfältssträckor i nätverket som är täckta av sensorer. De viktade medelvärdena är rumsliga medelvärden för alla länkar med sensorer om detektorerna vore installerade på representativa platser längs varje länk. Det bör gälla för flödesmätningarna över en lång tidsskala jämfört med signalcykeln, men densiteten och hastigheten är mer känsliga för positionen (särskilt avståndet från trafiksignalen nedströms) där de mäts. Här är q^w produktionen per längdenhet längs alla länkar med sensorer.

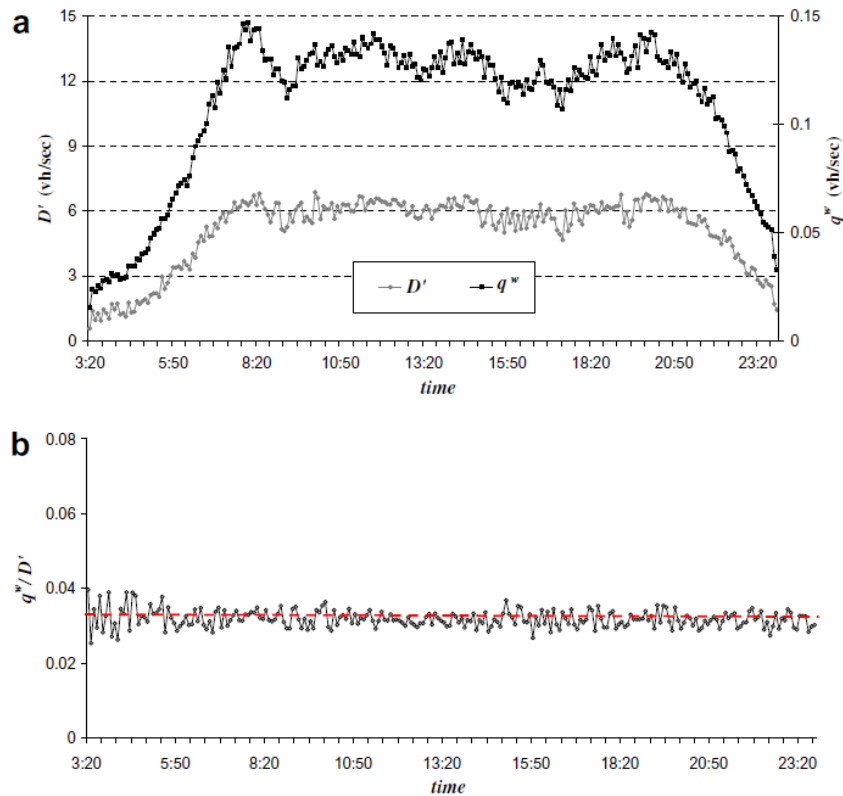
Figur 3a visar flödet (normerat mellan 0 och 1) mot beläggningen för två godtyckligt valda sensorer i området. Man kan notera att det finns stor spridning i datapunkterna och inga tydliga funktionssamband. Figur 3b och Figur 3d visar de oviktade medelvärdena av flöde respektive hastighet mot det oviktade medelvärdet av densitet över alla sensorer i området. Data kommer från två olika dagar, en vardag och en helgdag, som kan antas ha tämligen olika OD-mönster. Jämfört med Figur 3a ligger nu alla datapunkter från båda mättdagar och från olika tider på dygnet väl samlade längs en kurva. Med andra ord uppvisar nätverket ett tydligt, väldefinierat MFD.



Figur 3: MFD från fasta sensorer i centrala Yokohama (Geroliminis and Levinson 2009).

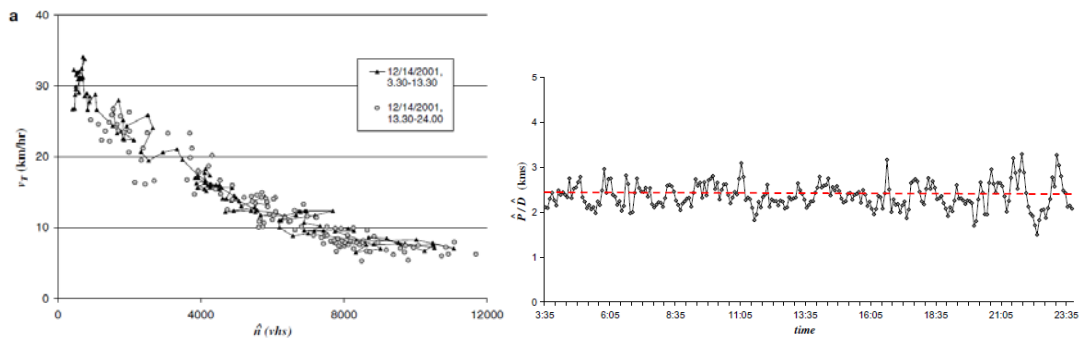
Geroliminis och Daganzo (2008) undersöker vidare sambandet mellan produktionen q^w och utmatningen D , dvs. takten med vilken resor avslutas. Författarna saknar direkta observationer av D , men approximerar D med D' , det utgående flödet över sensorer på gränsen till studieområdet. Man missar därmed resor som avslutas inne i området. Trots det visar Figur 4 att kvoten q^w/D' är i stort sett konstant över hela dygnet. Det antyder att det finns ett starkt linjärt samband mellan flödet i området och utmatningen från området.

Författarna fortsätter analysen med GPS-data från taxibilarna. De antar att taxibilarna använder liknande rutter genom nätverket som övriga fordon. Den genomsnittliga hastigheten i nätverket skattas som den totala sträckan dividerad med den totala restiden för alla taxiresor. Ackumulationen av fordon n skattas genom att skala upp antalet taxibilar i området med förhållandet mellan det totala utflödet D' och utflödet av taxiresor ur området över länkar med sensorer. Eftersom totala längden på nätverket i området inte är känd kan dock inte densiteten skattas.



Figur 4: Viktat genomsnittligt flöde och utmatning (a) och kvoten mellan dem (b) från fasta sensorer i centrala Yokohama (Geroliminis and Daganzo 2008).

Utmatningen, dvs. antalet avslutade resor i området per tidsenhet, och produktionen, dvs. antal fordonskilometer per tidsenhet, skalas upp från taxiresorna på samma sätt som för ackumulationen. Eftersom totala längden på nätverket i området inte är känd kan inte det genomsnittliga flödet skattas. Figur 5a visar ett tydligt samband mellan genomsnittlig hastighet och ackumulation, dvs. ett MFD. Figur 5b visar att kvoten mellan utmatning och produktion är i princip konstant under olika tider på dygnet, vilket tyder på ett linjärt samband mellan de två storheterna.



Figur 5: MFD från mobila sensorer i Yokohama, Japan. Genomsnittlig hastighet mot ackumulation (a) och kvoten mellan produktion och utmatning (b); Geroliminis och Daganzo (2008).

Daganzo och Geroliminis (2008) formulerar ett “regularitetsvillkor” för att ett väldefinierat MFD ska existera. Villkoret formuleras som

1. En långsamt varierande och utspridd efterfrågan
2. Ett maskat nätverk (dvs. med redundans)
3. Ett homogent nätverk med liknande länkar
4. Länkar med ett approximativt fundamentaldiagram som inte avsevärt påverkas av sväng rörelser när flödet är jämnt.

2.3.2 Betydelsen av homogena förhållanden

Studierna av San Francisco och Yokohama har följts av studier för andra städer och nätverk. I många fall har empiriska data inte visat samma starka tecken på ett väldefinierat MFD som i Yokohama, vilket har lett till fördjupade analyser i syfte att förstå förutsättningarna för att ett väldefinierat MFD ska existera, samt inflytandet från olika egenskaper hos systemet (t.ex. signalreglering och information) på formen hos MFD.

Buisson och Ladier (2009) studerar den medelstora staden Toulouse i Frankrike. Data omfattar en motorvägsring (33 km), övriga motorvägar (40 km) och stadsgator (1000 km). Stadsgatorna är i allmänhet enfiliga och har adaptiva trafiksignaler. Författarna använder data från fasta sensorer som mäter genomsnittlig beläggning och flöde i 3-minutersintervall, varav 153 sensorer finns på innerstadsgator, 330 finns i de yttre stadsdelarna och 45 finns på motorvägarna. Avståndet från sensorn till trafiksignalen nedströms på innerstadsgatorna varierar mellan 10 och 1000 meter. Data från tre olika fredagar studeras, varav den tredje kännetecknas av en särskild händelse (en protestaktion) på motorvägsringen. Det rumsligt genomsnittliga flödet och beläggningen (densiteten multiplicerat med den genomsnittliga effektiva fordonslängden) beräknas:

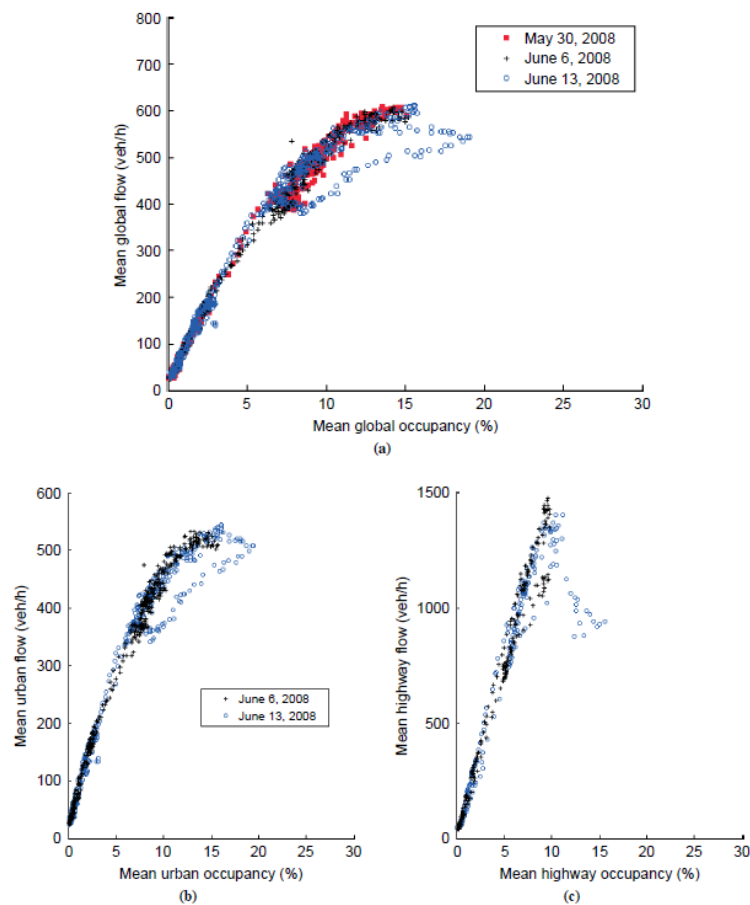
$$Q = \frac{1}{N} \sum_i \frac{q_i}{m_i}, O = \frac{1}{N} \sum_i o_i,$$

där m_i är antal körfält på länk i .

Figur 6a visar MFD för Toulouse. Buisson och Ladier (2009) noterar att det maximala flödet är i samma storleksordning som för Yokohama (Geroliminis and Daganzo 2008), men diagrammet uppvisar betydligt mer spridning. Författarnas hypotes är att den stora spridningen kan ha flera orsaker:

- Skillnader i typ av nätverk: motorvägar, innerstadsgator och ytterstadsgator.
- I motorvägsnätet är inte efterfrågan jämnt utspridd och fördelningen varierar över dagen.
- Ojämn fördelning av sensorernas avstånd till trafiksignalerna.

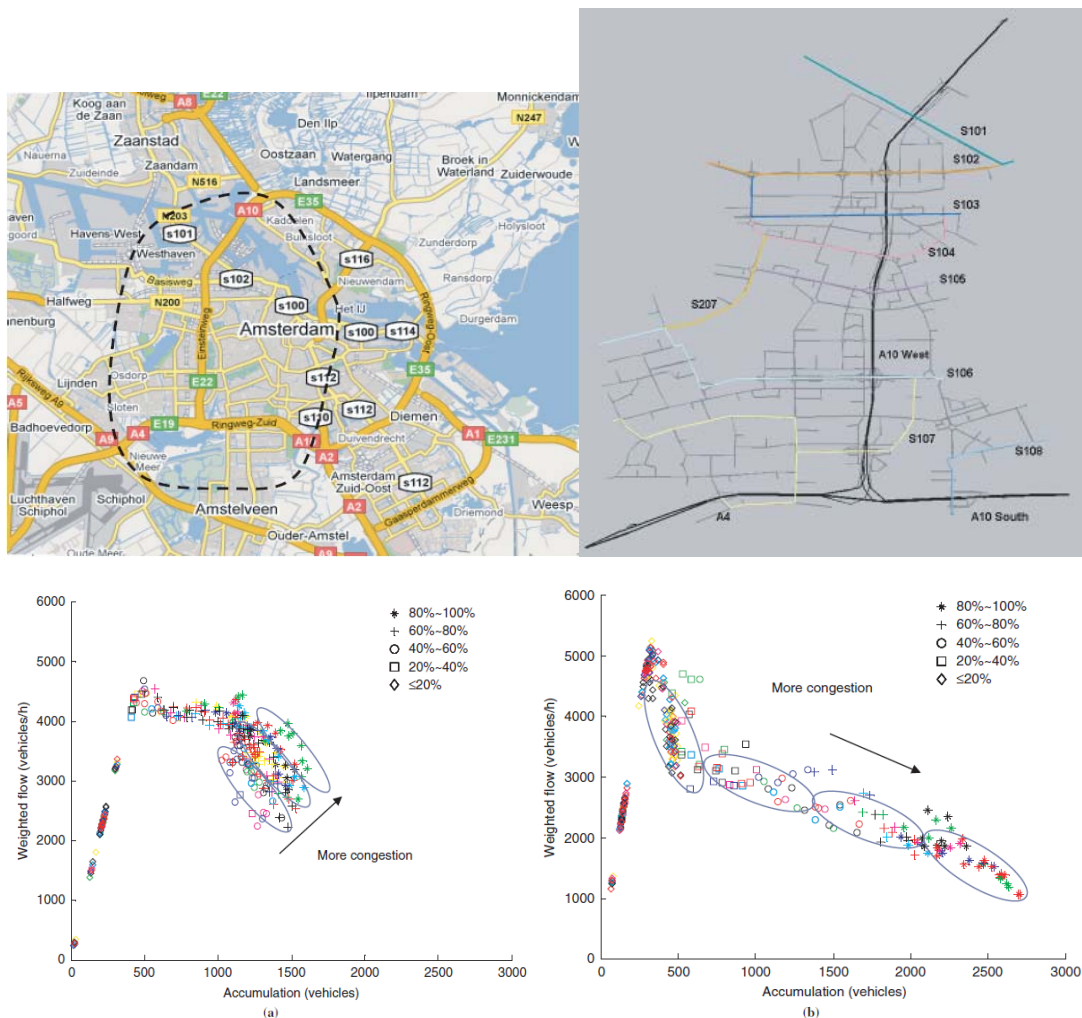
Figur 6b och Figur 6c visar MFD uppdelat på stadsgator respektive motorvägar. De två nätverken har mycket olika maximala flöden, men spridningen kvarstår i varje diagram. Den vidare analysen visar att spridningen i MFD för stadsgator till stor del kan förklaras av variationen i sensorernas avstånd till trafiksignalerna och skillnader i trafiksituationen i innerstaden jämfört med ytterstaden (i innerstaden är trängsel vanlig och återkommande, i ytterstaden uppstår den främst pga. särskilda händelser). Buisson och Ladier (2009) drar slutsatsen att resultaten i stort sett överensstämmer med de regularitetsvillkor som formuleras av Daganzo och Geroliminis (2008), men att sensorerna är enhetligt positionerade längs länkarna är ett nytt villkor.



Figur 6: MFD från fasta sensorer i Toulouse, Frankrike; (a) alla sensorer, (b) stadsgator, (c) motorvägar (Buisson och Ladier 2009).

Ji et al (2010) genomför en liknande studie av nätverket i Amsterdam, men i form av en mikrosimuleringsstudie i Vissim. Nätverket består av både motorvägar och andra gator. Figur 7 visar nätverket samt MFD för motorvägen A10 norrut (a) och söderut (b). I norrgående riktning finns ramp metering, vilket saknas i södergående riktning. Liksom Buisson och Ladier (2009) finner studien en relativt stor spridning i MFD. Författarna drar ett antal slutsatser:

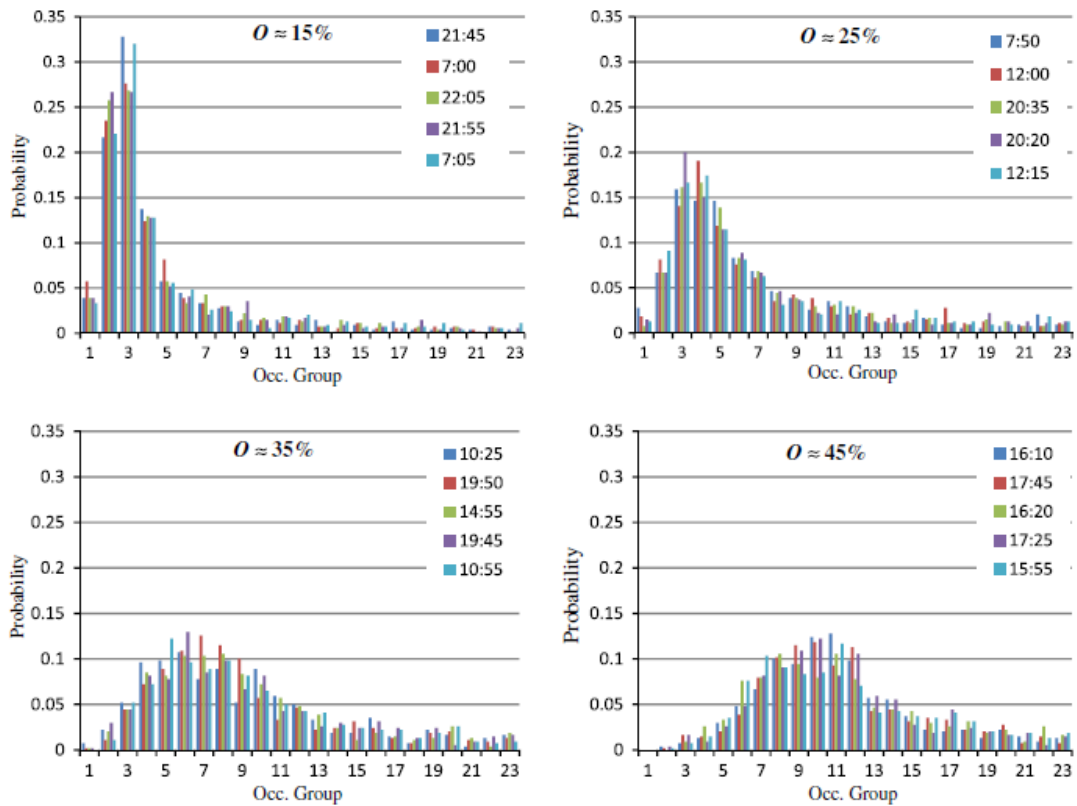
- Ramp metering har en direkt effekt på formen på MFD; ramp metering leder till högre flöden och lägre ackumulation.
- Spridningen i den trängselbelastade delen av MFD beror på ojämna tidpunkter då trängsel uppstår och avtar i olika körningar. Innan MFD beräknas bör nätverket delas upp i subnätverk som är mer homogena med avseende på när trängsel uppstår.
- Hastigt varierande efterfrågan har stark inverkan på formen på MFD.



Figur 7: MFD för motorväg A10 västgående i Amsterdam; (a) norrut med ramp metering, (b) söderut utan ramp metering (Ji et al. 2010).

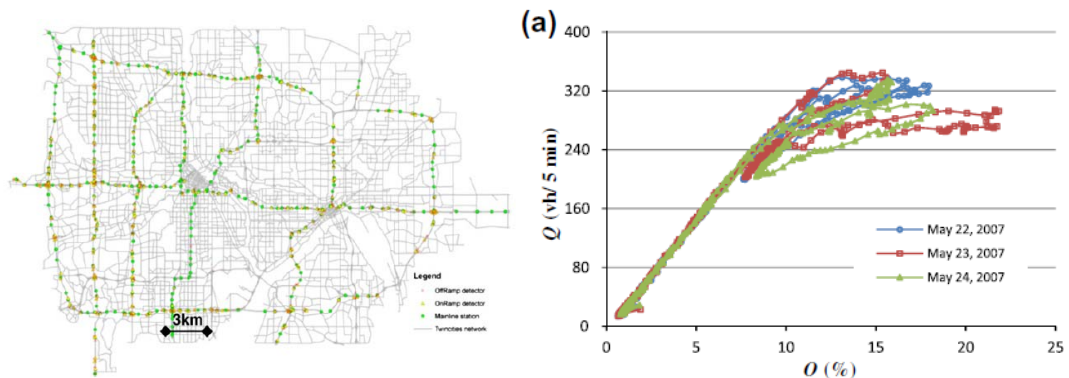
Geroliminis och Sun (2011b) återvänder till Yokohamas vägnät och går djupare i analysen av villkoren för ett väldefinierat MFD. De analyserar variationen i beläggning för olika fasta sensorer och konstaterar att fördelningen är långt ifrån jämn; för en viss genomsnittlig beläggning följer beläggningen vid enskilda

sensorer en viss fördelning som beror på den genomsnittliga beläggningen (Figur 8). Däremot är fördelningen snarlik för olika tider på dygnet med samma genomsnittliga beläggning, trots att OD-mönstren är mycket olika.



Figur 8: Histogram av beläggning för olika värden på genomsnittlig beläggning i Yokohama (Geroliminis och Sun 2011a).

Artikeln studerar också motorvägsnätet i Minneapolis, USA. Här visar analysen av data från ett stort antal fasta sensorer att ett väldefinierat MFD saknas (Figur 9). För tider på dygnet med låg trängsel kan inte olika dagar skiljas från varandra, men i den trängselutsatta delen finns stora variationer och *hysteres*-fenomen framträder, dvs. utvecklingen av trafik tillstånd följer olika vägar under uppbyggnaden och avvecklingen av morgon- och kvällsträngseltoppen. Analysen visar också att fördelningen i beläggning för olika fasta sensorer varierar mellan olika tider på dygnet för samma genomsnittliga beläggning.



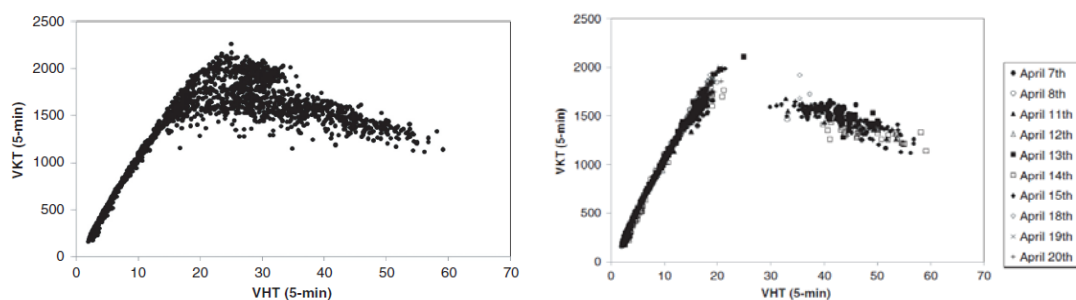
Figur 9: Genomsnittligt flöde mot genomsnittlig beläggning för Minneapolis' motorvägsnät (Geroliminis and Sun 2011b).

Artikeln reviderar Daganzo och Geroliminis (2008) regularitetsvillkor och säger att om den rumsliga fördelningen av länkdensitet är densamma (alltså inte nödvändigtvis uniform) för två olika tidsintervall med samma antal fordon i nätverket så bör de ha samma genomsnittliga flöde.

2.3.3 Fler empiriska studier av motorvägsnät

Flera studier har fokuserat på att analysera MFD för motorvägsnät. Geroliminis och Sun (2011a) fördjupar analysen av Minneapolis motorvägsnät. De visar att olika delnätverk i motorvägssystemet saknar väldefinierade MFD med låg spridning. Spridningen är inte slumpmässig, utan systemet uppvisar återkommande hysteres-effekter i MFD, där högre flöden observeras för samma genomsnittliga densitet i uppbyggnaden av trängsel och lägre i avvecklingen. Enligt artikeln visar resultaten att motorvägsnät är eftersläpande och vägberoende dynamiska system. I ett dynamiskt system utan hysteres och ett väldefinierat MFD (till exempel Yokohamas gatunät) är det möjligt att förutse systemets utmatning eller flöde vid en specifik tidpunkt enbart utifrån nätverkets densitet vid samma tidpunkt. I ett system med hysteres, å andra sidan, är detta inte möjligt utan att observera historiken i nätverksdensiteten. Det är alltså nödvändigt att känna till banan som densiteten följde innan den nådde sitt nuvarande värde.

Cassidy et al (2011) gör en liknande analys av data från motorvägar i Kalifornien. Deras MFD är uttryckt i antal fordonskilometer (VKT, genomsnittligt flöde multiplicerat med länklängd) mot antal resta fordonstimmar (VHT, genomsnittlig beläggning multiplicerad med kvoten mellan länklängd och effektiv fordonslängd). MFD från en längre sträcka visar stor spridning, men datapunkterna tycks vara begränsade uppifrån av en väldefinierad triangulär kurva (Figur 10a). När författarna filtrerar bort mätpunkter från tidpunkter då vägnätet befann sig i flera olika tillstånd samtidigt eller någon länk befann sig i ett övergångstillstånd mellan trängsel och inte trängsel finner man att punkterna samlar sig till ett mycket mer väldefinierat MFD (Figur 10b). Artikeln drar slutsatsen att MFD för motorvägar existerar om man bara betraktar tidpunkter då alla körfält och länkar befinner sig i samma regim (trängselbelastade eller inte).

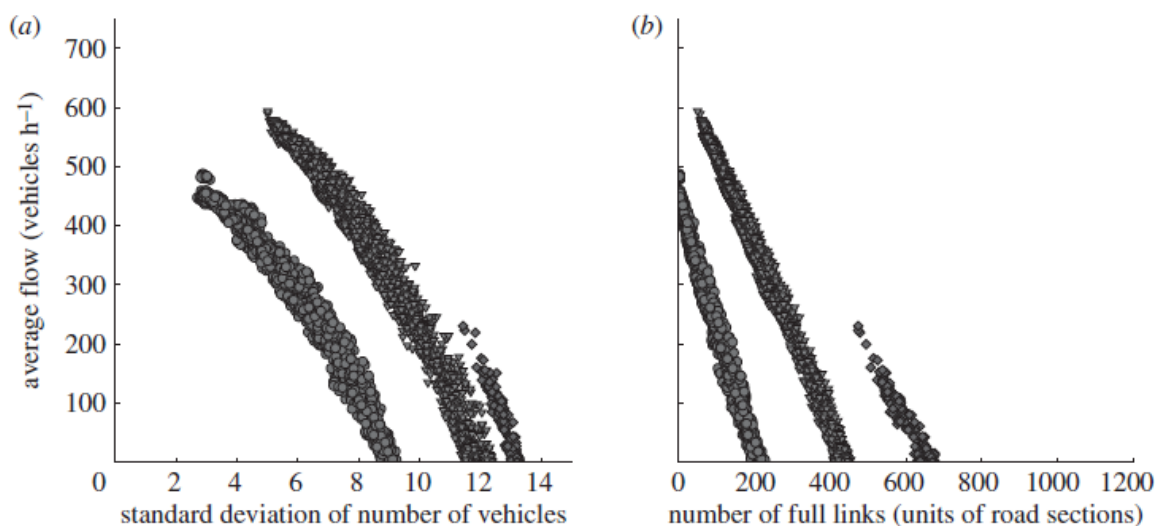


Figur 10: MFD för motorvägsnät i Kalifornien, (a) utan filtrering, (b) efter filtrering av data i olika regimer (Cassidy, Jang, and Daganzo 2011).

2.3.4 Simuleringsstudier för förståelse av villkoren för MFD

Mazloumian et al (2010) hänvisar till Buisson och Ladiers (2009) resultat och undersöker hur ojämnheter i den rumsliga fördelningen av fordonstäthet påverkar formen, spridningen och själva existensen av MFD i stadsgatunätverk. I studien används en simuleringsbaserad metod på artificiella, idealiserade rutnätverk. Simuleringarna visar att samma efterfrågemönster kan leda till mycket olika fördelningar av densitet i olika körningar beroende på fordonens slumpmässiga ruttval. Resultaten visar att en ojämna fördelning av densitet mellan olika länkar leder till ett lägre genomsnittligt flöde i nätverket. Som mått på variationen i densitet mellan länkar används standardavvikelsen. Figur 11a visar hur det genomsnittliga flödet varierar med standardavvikelsen i densitet för olika genomsnittliga densiteter. Det framgår att det finns ett tydligt funktionssamband. Figur 11b visar det genomsnittliga flödet som funktion av antalet fullbelagda länkar; länkar som är fulla av fordon påverkar trafiken i korsningen uppströms och sänker det genomsnittliga flödet. Författarna drar ett antal slutsatser från resultaten:

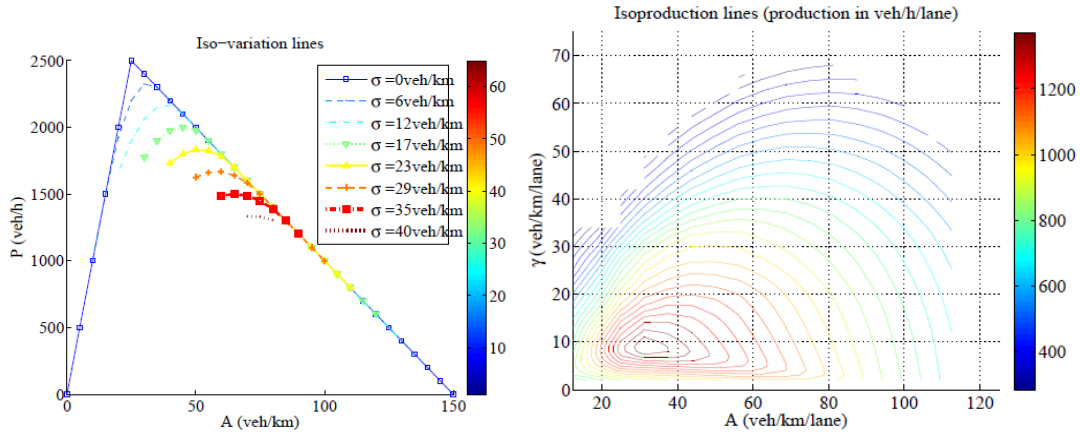
- Standardavvikelsen är en viktig variabel för ett väldefinierat MFD, och för att förklara den stora variationen av genomsnittligt flöde även för samma genomsnittliga densitet och efterfrågan
- En ojämna fördelning av fordonsdensitet ökar sannolikheten för att köer spiller bakåt vilket sänker nätverksflödet avsevärt
- Fler studier behövs för att se om dessa samband håller för mer komplexa nätverksstrukturer, och hur strategier kan utformas för att minska ojämnheter i fordonsdensitet.



Figur 11: Genomsnittligt flöde mot (a) standardavvikelsen i ackumulation bland länkar (b) antalet fulla länkar, i simuleringar på idealiserade rutnätverk (Mazloumian, Geroliminis, and Helbing 2010).

Knoop et al. (2012) studerar också hur variationer i fordonsdensiteten mellan länkar påverkar MFD. Med en enkel analytisk modell visar de hur formen på MFD (uttryckt i genomsnittlig produktion mot genomsnittlig densitet) beror på standardavvikelsen i densiteten (Figur 12). De utvecklar sedan teorin om ett Generaliserat MFD (GMFD) där produktionen är en kontinuerlig funktion av

både medelvärdet och standardavvikelsen av densiteten. Denna funktion estimeras med hjälp av simulering på ett Manhattan-liknande rutnätverk i samma stil som Mazlounian et al. (2010).



Figur 12: Nivåkurvor för generaliserat MFD: flöde mot medelvärde och standardavvikelse i densitet över länkar (Knoop et al. 2012).

Daganzo et al. (2011) noterar att de flöden som observeras för en viss densitet i nätverk med många överlappande rutter är lägre än vad som kan förväntas om rutterna var homogent trängselbelastade och inte överlappade varandra. Med hjälp av dynamiska analyser av små idealiserade nätverk visar de att symmetriska jämviktslägen med lika flöden och densiteter på alla länkar är instabila om den genomsnittliga densiteten är tillräckligt hög. De stabila jämviktslägen är assymetriska med ojämn fördelning av flöde och densitet, och därför uppvisar nätverket lägre flöde och köer bildas vid lägre densiteter än vad som skulle förväntas om trafiken var jämnt fördelad. Analysen visar också att den kritiska densiteten där instabilitet uppstår ökar om resenärer väljer rutter adaptivt, dvs. för att försöka undvika köer och låga hastigheter.

Gayah och Daganzo (2011) tar analysen i Daganzo et al. (2011) ett steg längre och visar att hysteres-fenomen som observerats av t.ex. Buisson och Ladier (2009) kan uppstå även under de mest fördelaktiga förhållanden för MFD: Även för ett symmetriskt nätverk med enhetlig efterfrågan förvärras nätverkets tendens mot en ojämn fördelning under det senare skedet av rusningstimmen då fler resor avslutas än startar, och detta skapar en medsols hysteres-loop i MFD. Fenomenet minskar då fler resenärer väljer rutter adaptivt.

2.3.5 Adaptiva ruttval och trafikreglering för stabilitet i MFD

Saberi et al. (2014) genomför simuleringsstudier för nätverket i Chicago och varierar andelen förare som anpassar ruttvalen efter trafikförhållanden. De påpekar att den typiska övergången, när densiteten ökar, från ett tillstånd med friflöde överallt i nätverket är till ett tillstånd med ojämn fördelning av densitet, dvs. trängsel uppstår inte överallt samtidigt. Därmed kan man förvänta sig att instabilitet och hysteres-fenomen uppstår i den trängselbelastade regimen av MFD; Yokohama är alltså något av ett undantag från det typiska beteendet. I enlighet med de teoretiska resultaten från Daganzo et al. (2011) och Gayah och Daganzo (2011) finner de att högre andel adaptiva rutter leder till minskade hysteres-effekter och lägre risk för gridlock. Resultaten visar också att

nätverkets kapacitet, mätt som det högsta observerade genomsnittliga flödet, eller utmatningen, ökar.

Zhang et al. (2013) studerar effekten av olika system för trafiksignaler i idealiserade rutnätverk av samma typ som Daganzo et al. (2011). De finner att valet av signalsystem är mycket viktigt för formen på MFD. Resultaten visar att ett idealiserat system med syfte att homogenisera fördelningen av nätverkets densitet alltid ger ett högre MFD, med högre nätverkskapacitet och högre flöden i den trängselbelastade regimen, än system som ofta används i praktiken (SCATS).

En liknande studie av Gayah et al. (2014) bekräftar att adaptiva trafiksignaler kan hjälpa till att motverka nätverkets naturliga tendens mot ojämn fördelning när trängseln är måttlig (dvs. vid densiteter just över den kritiska densiteten för det maximala flödet) genom att prioritera trafik från mer belastade länkar framför mindre belastade. Detta leder till högre flöden och att gridlock uppstår först vid högre densiteter. Vid mycket hög trängsel, däremot, beror flödena mer på trafiken nedströms och bakåtspillande köer, och adaptiva trafiksignaler ger ingen förbättring. Författarna föreslår att adaptiva ruttval kan vara mer effektivt i dessa situationer.

2.3.6 Metoder för estimering av MFD

Två huvudtyper av metoder för att estimerar formen på MFD finns i litteraturen: empiriska metoder och analytiska metoder. Geroliminis och Daganzo (2007) utvecklar den första empiriska metoden baserade på både fasta sensorer och fordonstrajektorier från GPS. Courbon och Leclercq (2011) och Saberli et al. (2014) utvecklar en metod för att skatta flöde, densitet och hastighet i ett nätverk genom att generalisera Edies definitioner av dessa storheter till tvådimensionella områden så att identiteten $q = k * v$ fortfarande gäller på makroskopisk nivå.

Daganzo och Geroliminis (2008) presenterar en analytisk metod för att skatta en övre begränsning för MFD i homogena nätverk (symmetrisk geometri och jämnt fördelad trängsel) utifrån faktorer som länklängd, antal körfält, signalcykellängder etc. Metoden bygger på antagandet att trafikdynamiken på lokal nivå kan beskrivas med kinematisk vågteori och ett triangulärt fundamentaldiagram. Leclercq och Geroliminis (2013) utvecklar metoden genom att lätta på regularitetsvillkoren.

Leclercq et al. (2014) utvärderar olika metoder för att skatta MFD för ett visst nätverk. Deras referensmetod är att tillämpa Edies definitioner på en komplett uppsättning fordonstrajektorier. De drar slutsatsen att skattning enbart med hjälp av fasta sensorer inte är lämpligt eftersom punktmätningar inte kan fånga den rumsliga variationen av hastighet och densitet längs en länk. Skattningen kan förbättras avsevärt genom att skatta hastigheten med hjälp av prob-data medan flödet skattas med de fasta sensorerna.

2.4 Användning av MFD för trafikstyrning i urbana nätverk

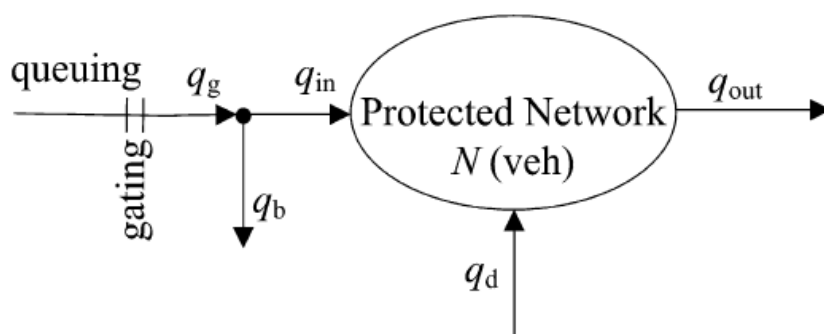
Trots att teorin bakom och egenskaperna hos MFD inte är färdigutredda, finns det redan flera studier som tittat på hur MFD kan användas för att styra trafiken i ett område. Målet är att utveckla effektiva metoder för trafikstyrning som inte kräver tillgång till vare sig OD-matriser eller detaljerad trafiksimulering.

Daganzo (2007) beskriver hur MFD kan användas för trafikstyrning. Den första tillämpningen gällde strategier för ramp-metering vid motorvägar (Geroliminis, Srivastava, and Michalopoulos 2011) och Tu et al. (2014) fortsatte på detta spår genom att undersöka vid vilken tidpunkt ramp-metering ska införas. Tillämpningar har även gjorts för urbana nätverk. När det gäller urbana nätverk handlar det om att identifiera lämpliga, relativt homogena, områden där inflödet kan kontrolleras så att önskad trängselnivå nås i området. Inflödet kan t.ex. kontrolleras med hjälp av signalreglering, trängselavgifter eller information/rutt-guidning.

2.4.1 Trafikstyrning med signalreglering

Keyvan-Ekbatani et al. (2012) och (2013) tillämpar MFD på det urbana närverket i Chania. Chania är den näst största staden på ön Kreta i Grekland och har ca 65 000 invånare. Keyvan-Ekbatani et al. (2012) visar i mikrosimuleringsmiljö på en möjlig förbättring av medelhastigheten i nätverket med 40 % genom så kallad "feedback gating".

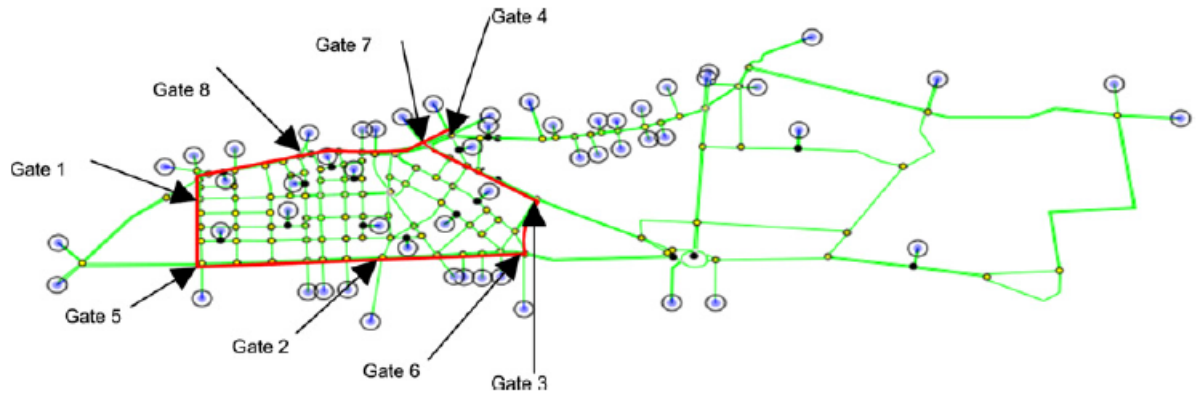
Gating innebär att inflödet hålls tillbaka in till den del av nätverket där man vill undvika höga trängselnivåer (det så kallade "skyddade nätverket"), t.ex. genom förlängd röd-tid vid en signalreglerad korsning uppströms. Detta förfarande skapar en kö vid gaten som inte skulle funnits annars, men i ett fungerande gating-system är den extra kö-tid som adderas vid gaten mindre än kö-tiden som sparas i det skyddade nätverket. Flödet q_b (Figur 13) passerar gaten men viker av innan det skyddade nätverket. Detta innebär att bilisterna får extra kö-tid utan att få någon tidsvinst inne i det skyddade nätverket. För att minska antalet bilar som drabbas på detta sätt bör gaten placeras så nära gränsen till det skyddade nätverket som möjligt.



Figur 13: Schematisk bild över hur trängselnivåer hålls nere i ett skyddat område genom gating (Keyvan-Ekbatani et al. 2012).

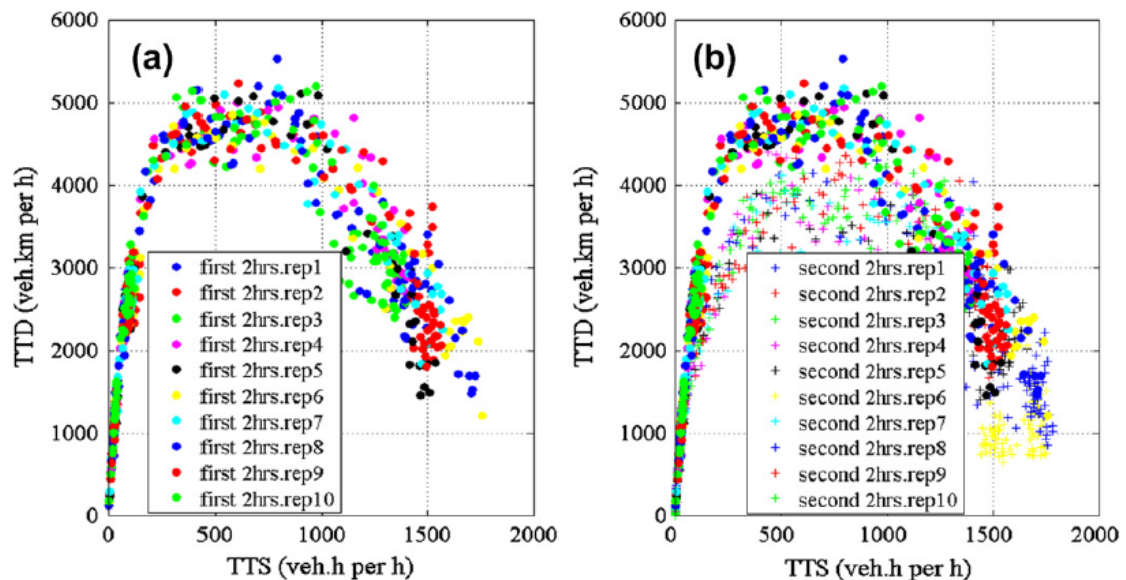
Det är viktigt att det finns plats för en kö bakom gaten, så att påverkan är liten på korsningar längre uppströms. Vid val av länkar för gating är det också viktigt

att ta med i beräkningen om det finns alternativa rutter som bilisterna kan tänkas använda för att undvika kön skapad av gaten, och hur attraktiva dessa rutter är. Köminskningen som eftersträvas i det skyddade nätverket kan utebli om det finns alternativa rutter utan gater nära till hands. Keyvan-Ekbatani et al. (2012) använder AIMSUN mikrosimulering för att ta hänsyn till denna typ av ruttval.



Figur 14: Mikrosimulering av feedback gating med 8 gater kring centrala Chania (Keyvan-Ekbatani et al. 2012).

Åtta gating-länkar definieras precis vid gränsen till Chania centrum (röd gräns i Figur 14), vilket utgör det skyddade området i denna tillämpning. Det skyddade nätverket i Chania centrum består av 165 länkar. Det antas att alla länkar i det skyddade nätverket är utrustade med slangar för att mäta trafikflödet.



Figur 15: MFD för Chania centrum för de första två timmarna av simulering (a) och för timme 3-4 (b) (Keyvan-Ekbatani et al. 2012).

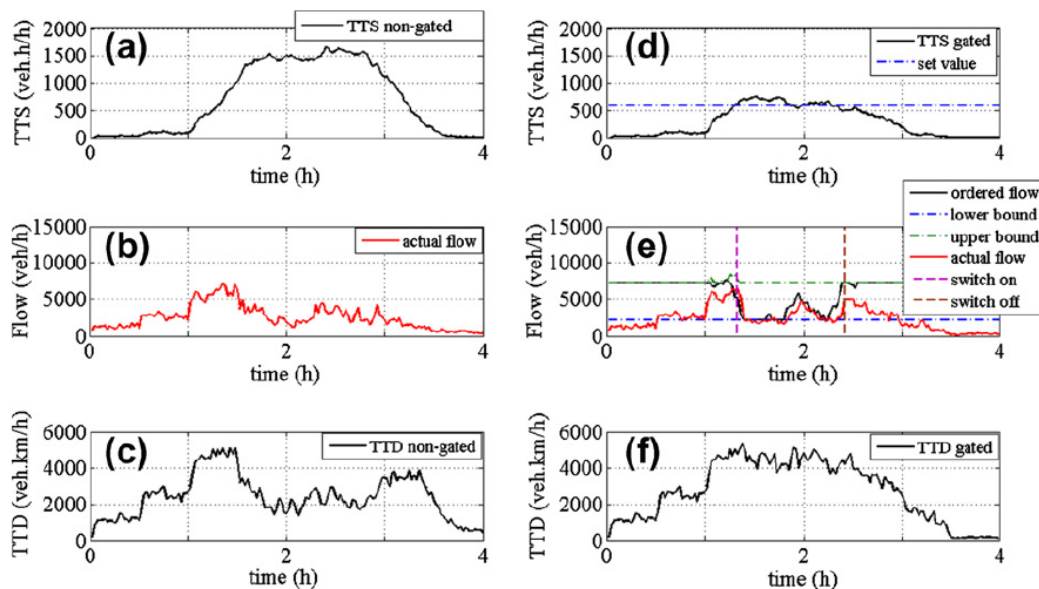
Figur 15 visar MFD för tio replikeringar av mikrosimuleringen av Chania för de första två timmarna av simulering då nätverket fylls med bilar (a) och de två sista timmarna av simulering när det töms på bilar (b). Resultaten visar en typisk MFD-kurva med asymmetrisk invers-U-form där tre regimer kan identifieras: i regim I finns få bilar och lite trängsel i nätverket, i regim II har

nätverket fyllts på med bilar men trängseln är fortfarande hanterbar och genomströmningen har ännu inte börjat minska, medan regim III är en hyperträngsel-regim där totala restiden ökar trots att totala reslängden i nätverket minskar. Figur 15b visar på hysteres-fenomen, dvs. att MFD-kurvan är lägre när nätverket töms på bilar än under uppbyggnadsfasen. MFD-kurvan har dock liknande form i båda fallen och TTD (totala reslängden) når sitt maximum vid ungefär samma värde på TTS (totala restide) - 600-800 bil-h/h.

Målet med feedback-gating är reglera inflödet så att man inte hamnar i regim III (hyperträngsel) i Figur 15 där totala reslängden (TTD) i det skyddade nätverket minskar medan totala restiden (TTS) ökar, vilket sker ungefär när totala restiden i nätverket passerar 600-800 bil-h/h. För att göra detta inför man en regulator vars mål är att hålla nätverkstillståndet i det skyddade nätverket kring det kritiska värdet på TTS så att TTD maximeras och nätverket inte går in i den hyperträngselsituation som karaktäriserar regim III. Ekvation (1) visar hur denna regulator beräknas.

$$q_{in}(k) = q_{in}(k - 1) - K_p [TTS(k) - TTS(k - 1)] + K_I [\widehat{TTS} - TTS(k)] \quad (1)$$

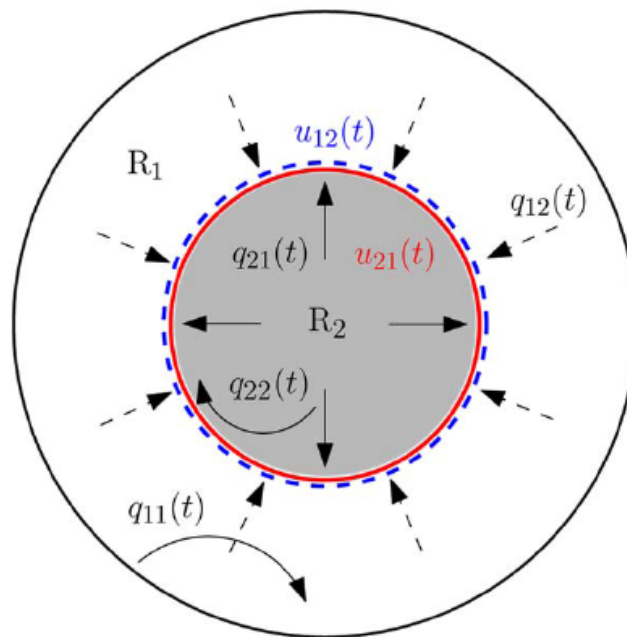
I Ekvation (1) är $q_{in}(k)$ totalt inflöde vid alla gater i tidssteg k , \widehat{TTS} den kritiska totala restiden, samt K_p och K_I icke-negativa konstanter. Eftersom det finns åtta gater behöver det totala inflödet beräknat av regulatorn delas upp i inflöde per gate. Hur detta görs har inte stor effekt på kötid-minskningen i hela området. Däremot påverkas självklart kölängderna vid de individuella gaterna av hur totala inflödet delas upp.



Figur 16: Simulerade resultat av feedback gating (Keyvan-Ekbatani et al. 2012).

Figur 16 visar de resultat Keyvan-Ekbatani et al. (2012) får med och utan feedback gating. Vid jämförelse av (c) och (f) syns tydligt att degraderingen av flöde i nätverket på grund av att nätverket går in i regim III undviks så att genomströmningen kan hållas på en hög nivå under hela peaken.

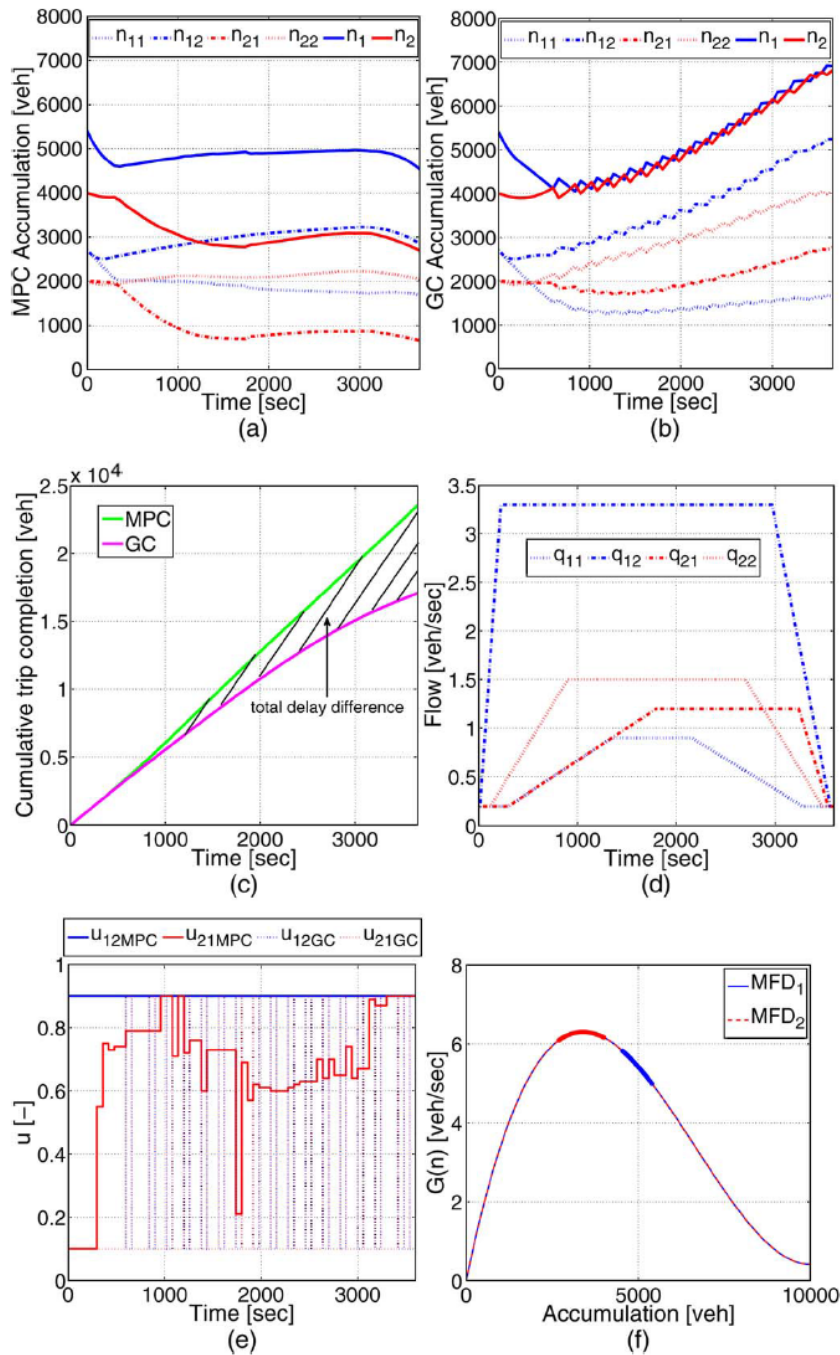
I tillämpningen ovan regleras inflödet till *ett* område som antas homogent avseende trängselnivå. En del urbana områden där man vill styra trafiken klarar dock inte homogenitets-kravet och behöver delas upp i flera regioner. Geroliminis et al. (2013) utvecklar en trafikstyrningsmetod genom att använda "model predictive control" (MPC) för fallet där det urbana området delas in i två regioner med olika trängselnivåer. De två regionerna R_1 (utanför centrum) och R_2 (centrum) visas i Figur 17. Hur regionerna är placerade har inte betydelse, det skulle kunna vara två regioner bredvid varandra. Flödet mellan regionerna regleras av kontrollerna $u_{12}(t)$ och $u_{21}(t)$ så att totala antalet bilar som når sina destinationer inom de två regionerna maximeras.



Figur 17: Område indelat i två regioner R_1 och R_2

Geroliminis et al. (2013) testar metoden med en MFD-kurva konsistent med den som observerats i Yokohama (Geroliminis and Daganzo 2008). Resultatet visas i Figur 18 där man kan se att MPC fungerar bättre än en enklare form av styrning (Greedy Controller, GC).

Metoden ovan generaliseras i Ramezani et al. (2015) till fler än två regioner. Ramezani et al. (2015) utvecklar även en hierarkisk styrningsstrategi inom vilken MPC-controllern verkar på en högre nivå och en feedback-controller verkar på en lägre nivå för att homogenisera kritiska regioner.



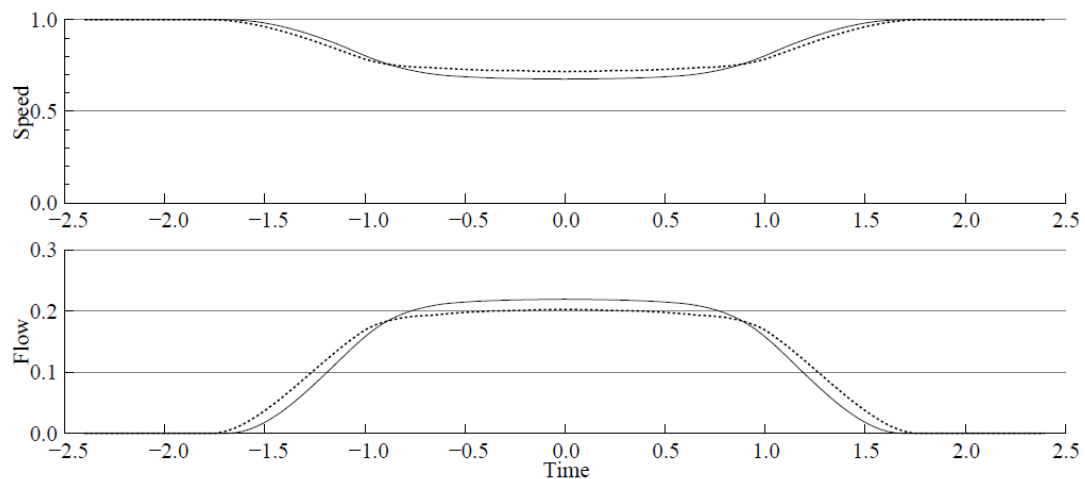
Figur 18: MPC- och GC-styrning av flödet mellan två regioner (Geroliminis, Haddad, and Ramezani 2013).

2.4.2 Trafikstyrning med trängselavgifter

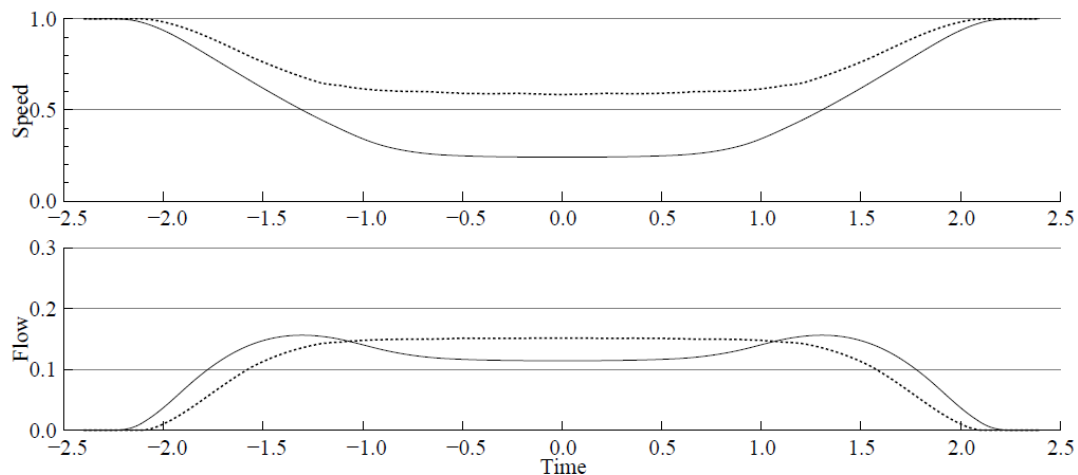
Traditionellt har trängsel i storstäder och effekten av trängselavgifter analyserats med hjälp av en så kallad flaskhals-modell (Vickrey 1969). I flaskhals-modellen (bottleneck model) inträffar dock aldrig hyperträngsel, utan när flaskhalsens kapacitet är nådd fortsätter flödet på samma konstanta nivå. För att överkomma denna brist utvecklar Fosgerau (2015) en badkars-modell (bathtub model) som tillåter hyperträngselsituationer. Badkars-modellen ger en realistisk beskrivning av trängseldynamiken i ett urbant område där det finns ett makroskopiskt samband mellan hastighet och densitet. I badkars-modellen är trängselnivån – och därmed hastigheten – konstant i hela badkaret och beror

inte av var i badkaret man befinner sig. Anledningen till att detta är en bra beskrivning av trängselsituationen i urbana områden är att bilisterna kontinuerligt anpassar sina rutter för att undvika rutter med hög trängsel vilket gör att trängselnivån hålls ungefär konstant i området.

Slutsatserna från analyserna med badkars-modellen är nya på flera områden, vilket visar hur viktigt det är att ta hänsyn till hyperträngsel. T.ex. visar analyserna att nyttan av trängselavgifter beror mycket starkt på trängselnivån i nätverket innan införandet av trängselavgifter. Fosgerau (2015) visar att nyttan av trängselavgifter är betydligt större om hyperträngsel råder innan införandet av trängselavgifter än om trängseln är låg (Figur 19 jämfört med Figur 20).



Figur 19: Trängselavgifts påverkan på flöde och hastighet med låg trängsel innan införandet (Fosgerau 2015).

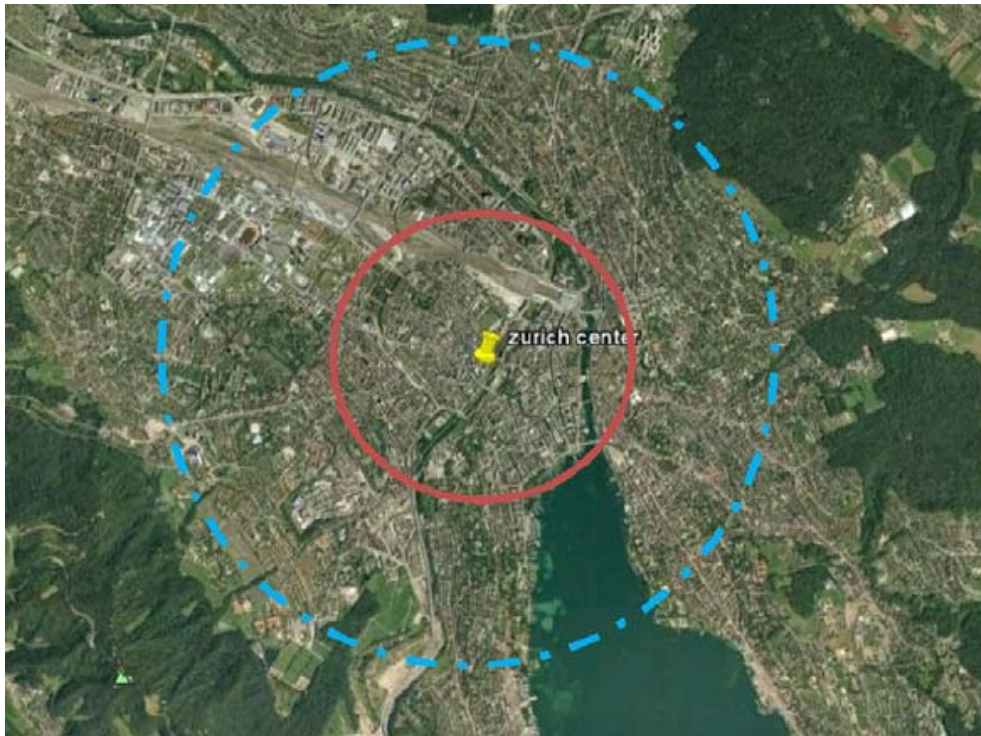


Figur 20: Trängselavgifts påverkan på flöde och hastighet med hög trängsel innan införandet (Fosgerau 2015).

Kostnaden för trängsel ökar dramatiskt när trängseln närmar sig hyperträngsel-regimen där densiteten av bilar är så hög att trafikflödet reduceras. Inte bara trängselavgifter utan även andra åtgärder kan minska denna kostnad på ett effektivt sätt, t.ex. att förlänga svängfickor på platser där köer ofta bildas som blockerar icke-svängande trafik (Fosgerau 2015).

Zheng et al. (2012) utvecklar en iterativ metod för att bestämma trängselavgiftsnivåer baserat på data från MFD och testar metoden med simulerade data för ett nätverk över Zürich. Strategin för trafikledning är i detta fall en tullring med radie 1 km kring Zürich centrum (röd cirkel i Figur 21). Målet är att bestämma trängselavgiftsnivån så att nätverket innanför tullringen når tillståndet av maximal genomströmning. Avgiftsnivån ändras iterativt till dess att densiteten i nätverket innanför tullringen är på sin kritiska nivå (k_{cr}) precis innan nätverkstillståndet går in i regim 3 (Figur 22a). För att uppnå detta justeras avgiftsnivån med en konstant proportionell mot skillnaden mellan medeldensiteten för observationer i Regim III (\bar{k}_t) och den kritiska densiteten (Ekvation 2). Tidsindex t refererar till förmiddags- eller eftermiddagspeak och olika avgifter skattas för de två tidsperioderna.

$$Tull_i = \max\left(0, Tull_{i-1} + c(\bar{k}_t - k_{cr})\right) \quad (2)$$

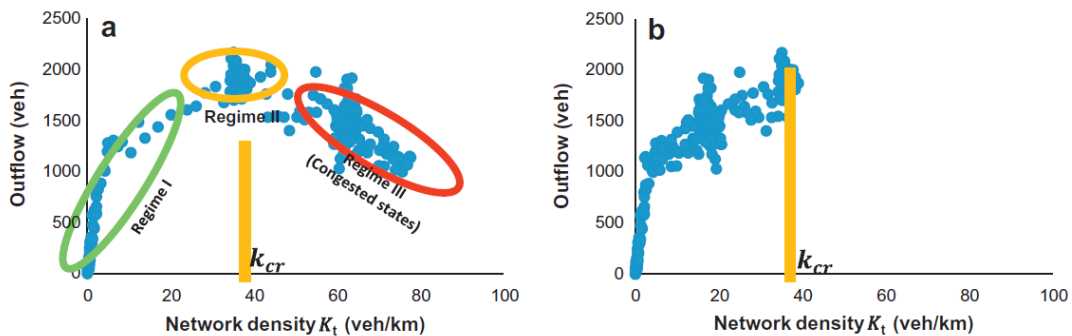


Figur 21: Tullring runt centrala Zürich (Zheng et al. 2012).

Algoritmen som bestämmer avgiftens nivå består av sex steg:

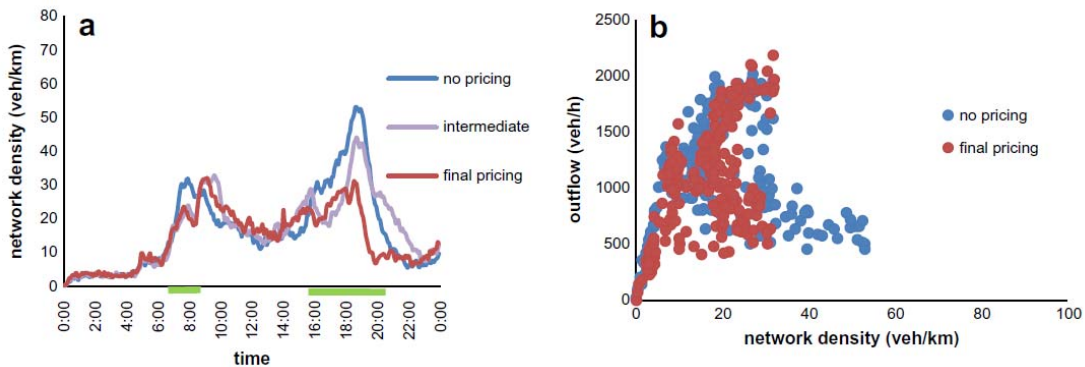
1. Definiera ett initialt trängselavgiftssystem, d.v.s. var, när och hur hög avgift som tas ut.
2. Uppdatera agenternas planer tills konvergens nås i MATSim (efter ca 40-50 iterationer).
3. Använd MFD för att identifiera tider då nätverkstillståndet är i Regim III.
4. Beräkna medeldensiteten för de observationer som befinner sig i Regim III.
5. Tillämpa den proportionella regulatorn (Ekvation XX)

6. Kör en ny simulering med MATSim med den nya trängselavgiftsnivån. Processen upprepas tills inga observationer hamnar i Regim III (Figur 22b).



Figur 22: Illustration av de tre regimerna och den kritiska densiteten k_{cr} (Zheng et al. 2012).

I tillämpningen för Zürich körs först MATSim en gång utan trängselavgift. Nätverksdensitet över tid och MFD plottas (blå kurva i Figur 23). Från dessa figurer bestäms längden på förmiddags- och eftermiddagspeaken då trängselavgift ska tillämpas (kl. 7:30-9:00 och 16:00-20:00) och värdet på den kritiska densiteten (28 bilar/km). Sedan tillämpas algoritmen ovan för att justera trängselavgiftsnivån.



Figur 23: Nätverksdensitet och MFD med och utan trängselavgift (Zheng et al. 2012).

2.4.3 Trafikstyrning via information/rutt-guidning

Horiguchi et al. (2010) genomför en fallstudie i Tokyo för att se om MFD kan användas för att generera enkla, tydliga rutnät-kartor som beskriver trafiksituationen i olika delar av staden. Man delar in Tokyo i kvadrater med sida 1 km och aggregerar data från 3000 taxibilar till timnivå. Data samlas in under tre månader – från september till november. Författarna definierar två index: flödes- och singularitets-index. Flödesindex kvantifierar hur nära nätverkstillståndet är till origin i MFD, medan Singularitetsindex kvantifierar hur annorlunda trafiksituationen är från en genomsnittlig dag. Figur 24 visar Flödes- och Singularitetsindex för en genomsnittlig vardag i Tokyo (7 oktober 2010). Trängseln börjar utanför centrum och förflyttar sig gradvis in mot city under morgonpeaken. Singularitetsindex visar att inga större avvikelser förekommer denna dag. I Figur 25 däremot visar Singularitetsindex att det inte

är en genomsnittlig dag. Mer trängsel än vanligt förekommer nord-öst om centrala Tokyo p.g.a. avstängda vägar för marathon-loppet.

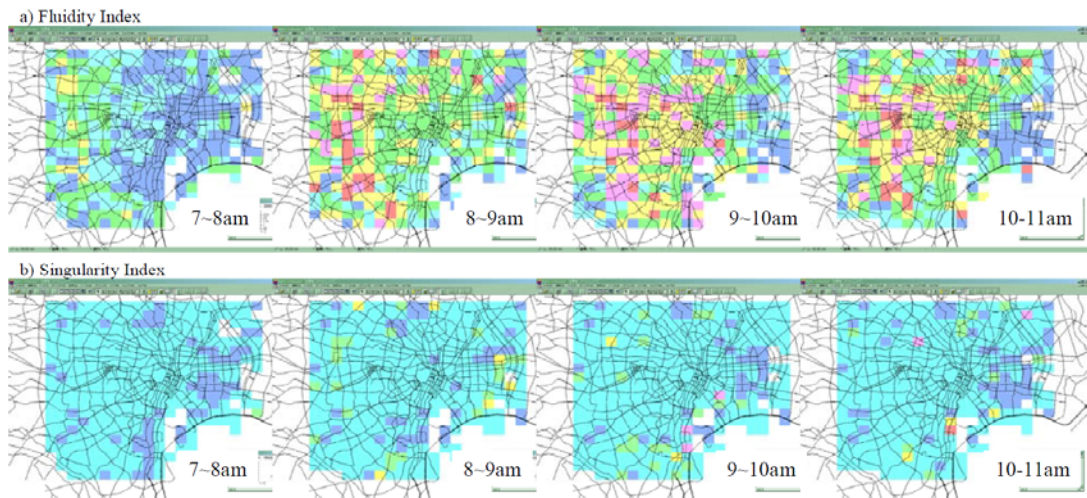
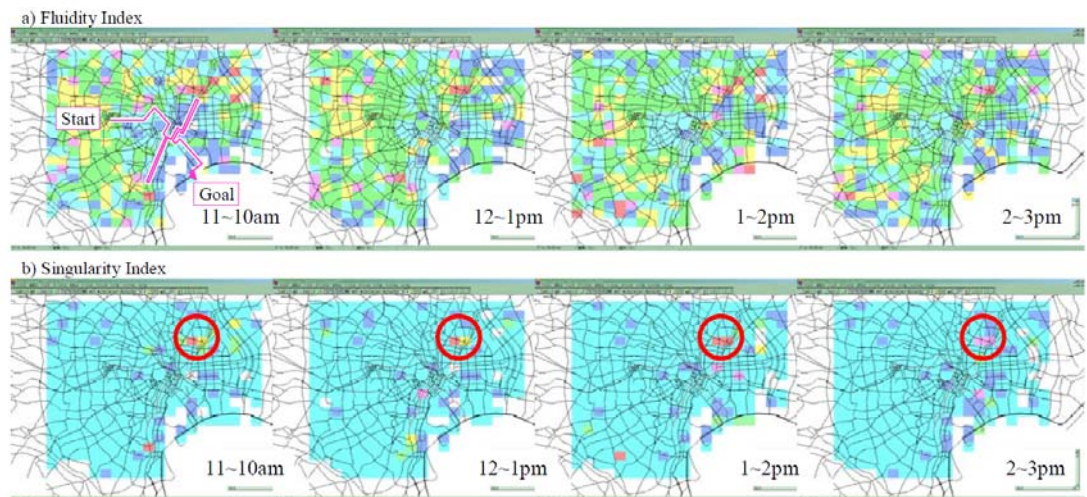


Fig. 7. The fluidity and the singularity indices for the 'ordinary' weekday (Wed., Oct. 7, 2010)

Figur 24: Flödes- och singularitetindex baserade på MFD för en genomsnittlig vardag i Tokyo (Horiguchi, Iijima, and Hanabusa 2010).



Figur 25: Flödes- och singularitetindex baserade på MFD för dagen då Tokyo City Marathon genomfördes (Horiguchi, Iijima, and Hanabusa 2010).

Xiong et al. (2015) utvärderar effekten av variabla meddelandskyltar (VMS) och deras påverkan på ruttvalet om en olycka har inträffat. De använder en Bayesisk modell för att beskriva hur bilisterna anpassar sig under resan givet information och den mesoskopiska modellen DynusT för att simulera bilarna i nätverket. Tre scenarier studeras i en fallstudie för Washington (se Figur 26): *Basecase* då ingen olycka inträffar, *Incident* då en olycka inträffar 05:30 och två körfält på väg I-95 är avstängda till 06:30 men ingen information ges och *Diversion* då en olycka inträffar vid samma tidpunkt och pågår lika länge som i *Incident*-scenariot men information ges via VMS från 05:30-07:30.

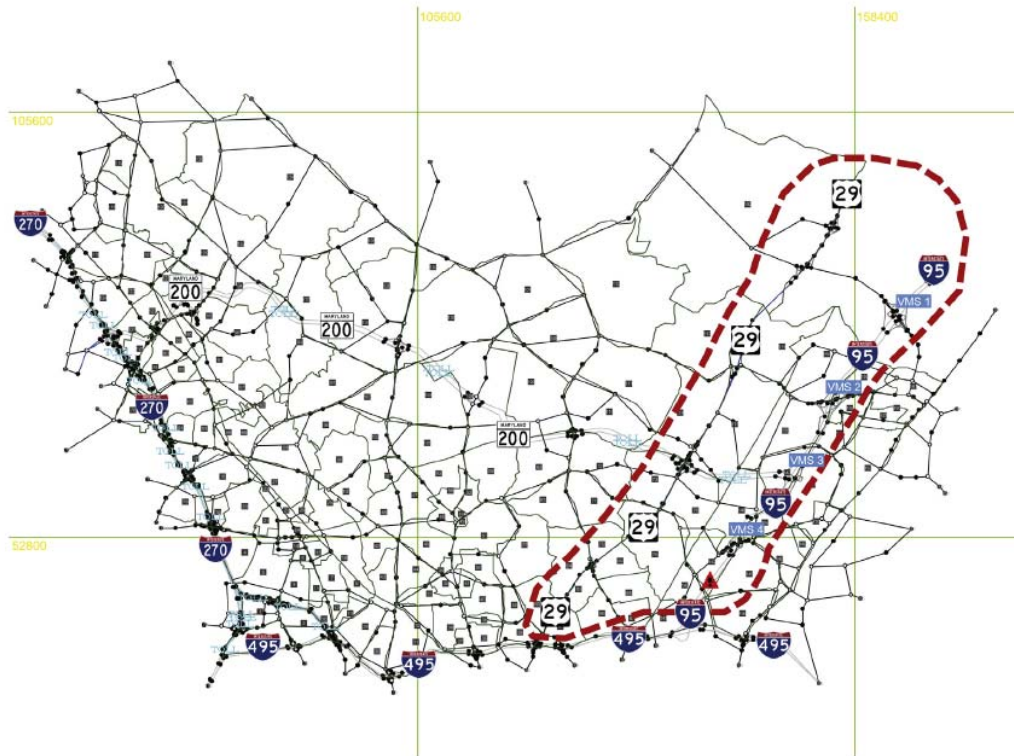
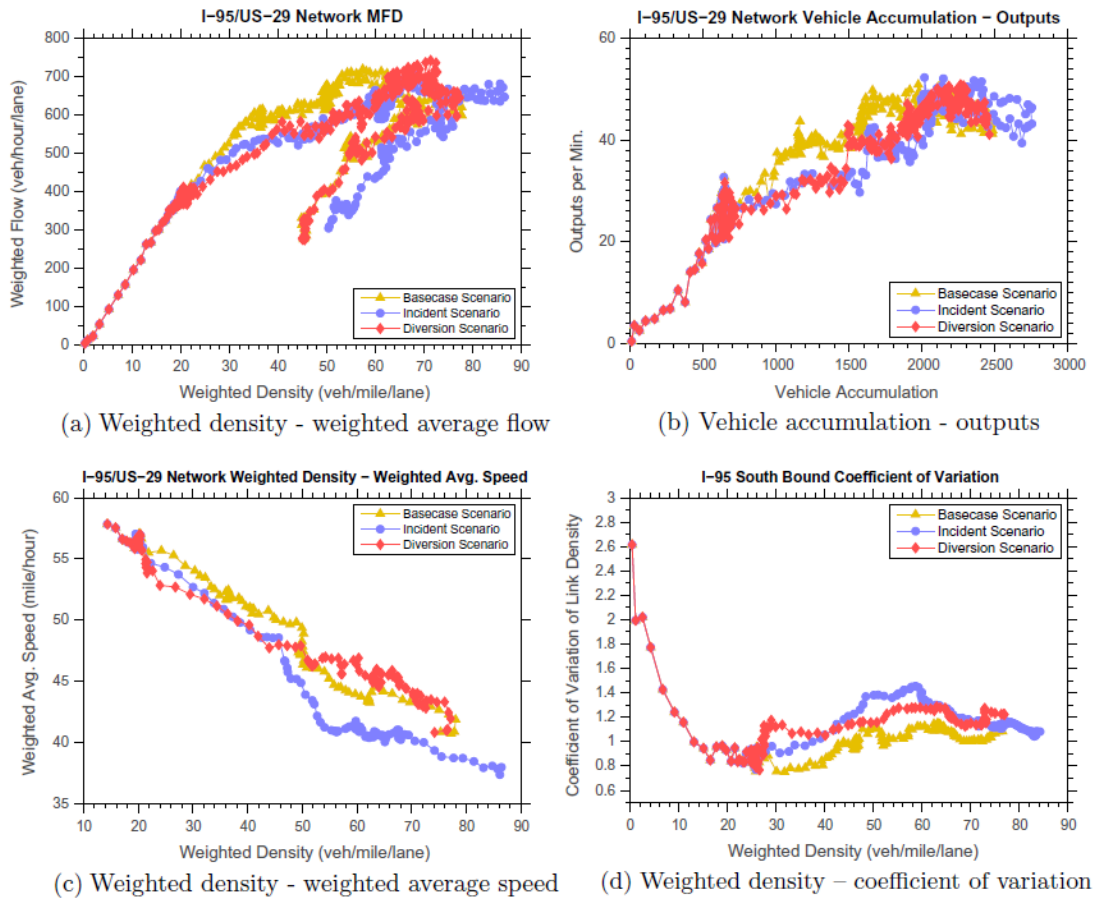


Fig. 3. Mesoscopic traffic simulation network.

INCIDENT AT EXIT 35 TIME TO I-495 WEST	
I-95 SOUTH	15-18 MIN
US-29	13-14 MIN

Figur 26: Washington-nätverket i den mesoskopiska modellen DynusT med väg I-95 där fyra VMS ger information om alternativ rutt vid olycka (Xiong et al. 2015).

Xiong et al. (2015) använder i denna studie MFD för att analysera tillståndet på I-95 och US-29, d.v.s. området innanför den röda streckade linjen i Figur 26. MFD tas fram för alla tre scenarierna ovan för att kunna jämföra situationen med och utan information till bilisterna. Fördelen med MFD som mått på trafikläget är att det fångar trafikdynamiken och att det är ett kvantitativt mått. Figur 27 visar MFD för de tre scenarierna. Resultaten visar att maximala densiteten på korridoren minskar från ca 86 bilar/mile/körfält i *Incident*-scenariot till ca 76 bilar/mile/körfält i *Diversion*-scenariot där information om restiden på en alternativ rutt ges till bilisterna. Maximala densiteten i *Diversion*-scenariot är på samma nivå som i *Basecase*-scenariot. Vidare visar resultaten att hysteres-effekten är mindre när information ges till bilisterna än om en olycka sker och ingen information ges.



Figur 27: Jämförelse av MFD för de tre scenarierna *Basecase*, *Incident* och *Diversion* (Xiong et al. 2015).

3 Empirisk analys av MFD

3.1 Södermalm

Detta avsnitt beskriver beräkningar av empiriska MFD för Södermalm, Stockholm. MFD har beräknats med hjälp av två olika datakällor. Den första analysen bygger på restidsmätningar från ARS-systemets fasta kameror. Den andra analysen bygger på GPS-data från taxibilar. För båda analyserna har data från samma två-veckorsperiod använts, från 29 september 2014 till 12 oktober 2014.

3.1.1 MFD för Södermalm från kameradata

Beskrivning av kameradata

I Stockholm finns (fram till 2015) ett system för kontinuerlig mätning av restider på ett 100-tal definierade rutter, det s.k. ARS-systemet. För varje rutt fångas fordons registrerings skyltar med kameror i början och slutet av rutten. När samma registreringsnummer fångas av båda kamerorna används tidsskillnaden mellan observationerna som en mätning av restiden på rutten. Datan som var tillgängliga för oss innehöll alla enskilda restidsobservationer men ingen information om fordonen, registreringsnummer, fordonstyp eller liknande.

Några av ARS-rutterna går helt eller delvis på Södermalm, se figur 28. För den här analysen fokuserade vi på rutter som helt finns inom Södermalms gränser, närmare bestämt

- 33: Hornsplan – Hornsgatan/Ringvägen
- 34: Hornsgatan/Ringvägen – Hornsplan
- 35: Stadsgården – Danvikstull
- 36: Danvikstull – Stadsgården
- 50: Hornsgatan/Ringvägen – Ringvägen/Söderledstunneln
- 51: Ringvägen/Söderledstunneln – Hornsgatan/Ringvägen
- 87: Stadsgården – Hornsplan
- 88: Hornsplan – Stadsgården



Figur 28: ARS-rutter på Södermalm.

För perioden 29 sep-12 okt 2014 saknas data för rutt 33, och rutt 88 har för få observationer för att kunna användas. Analysen baseras därför på rutterna 34, 35, 36, 50, 51 och 87.

ARS-data innehåller mycket brus i form av orimligt långa restider, vilket kan bero på mätfel eller att fordon stannar eller tar omvägar mellan de två kamerorna. Därför filtrerar vi först data med hjälp av metoden som beskrivs i Kazagli och Koutsopoulos (2013).

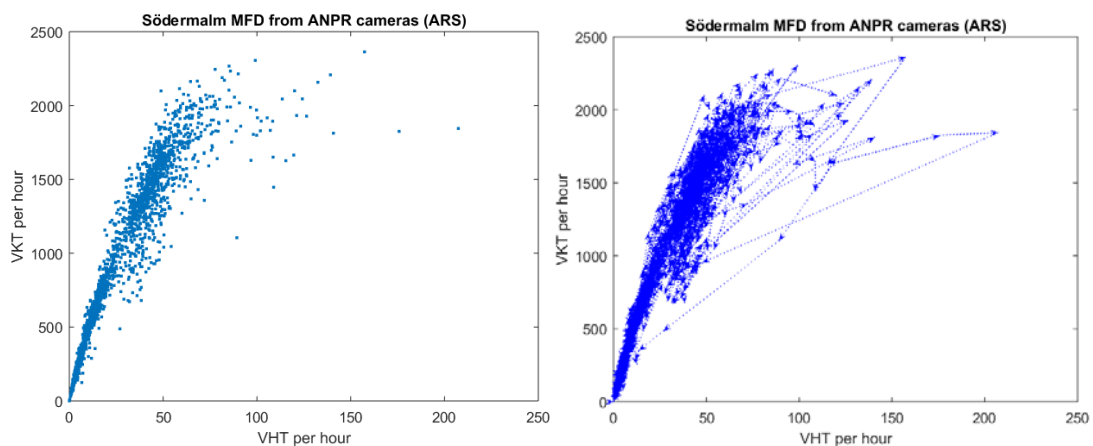
Beräkningsmetod

Ett sätt att representera MFD är som antal fordonskilometer (VKT) som funktion av antal fordonstimmar (VHT) (Cassidy, Jang, and Daganzo 2011). Eftersom längden på varje ARS-rutt är känd, består varje observation av både en restid och en sträcka. För varje rutt aggregerar vi den totala körsträckan (antal observationer*ruttens längd) till VKT och den totala körtiden (antal observationer*genomsnittlig restid) till VHT över tidsintervall av lika längd. Analys visade att 10-minutersintervall ger den bästa avvägningen mellan precision (korta intervall) och robusta värden (fler observationer).

Genom att multiplicera variablerna med 6 uttrycker vi dem i enheterna VHT per timme och VKT per timme. För varje tidsintervall summerar vi sedan VKT och VHT över alla rutter, vilket ger variablerna för MFD. Med 14 dagars data och 144 tidsintervall per dag har vi totalt 2016 parvisa observationer av VHT och VKT från ARS-rutterna på Södermalm.

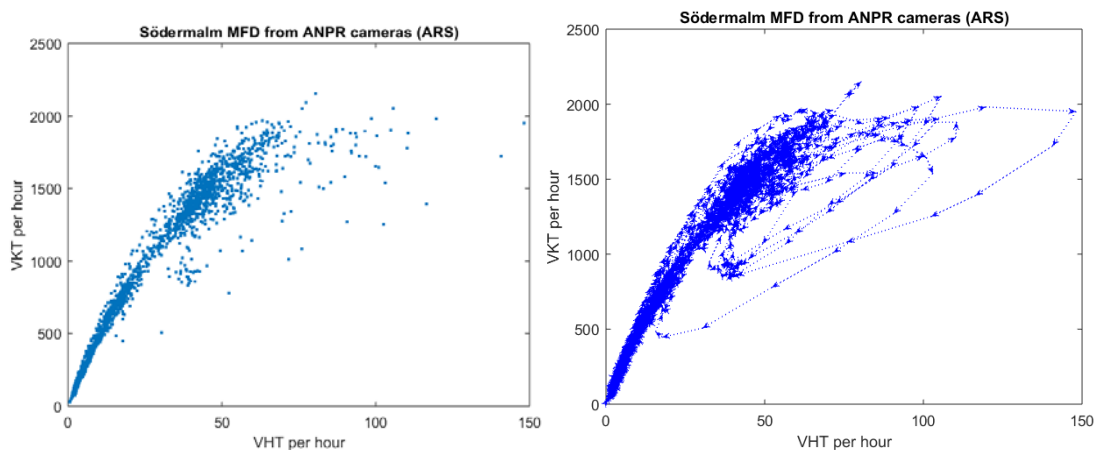
Resultat

Figur 29 visar MFD över alla rutter på Södermalm. Till vänster är varje parvis observation av VHT och VKT plottad som en punkt, till höger har konsekutiva observationer kopplats ihop med en linje där pilarna visar tidsriktningen. Figuren visar att det finns ett tydligt samband mellan VHT och VKT upp till ca 75 VKT per timme. MFD-kurvan visar en avtagande lutning då VHT ökar, vilket betyder att medelhastigheten i nätverket avtar. Med andra ord finns trängsel i nätverket vid höga densiteter. Över ca 75 VHT faller MFD sönder i utspridda punkter, och även under 75 VHT finns en relativt stor spridning i MFD.



Figur 29: MFD för Södermalm från kameradata, alla rutter.

Figur 30 visar MFD efter att både VKT och VHT har jämnats ut med ett glidande medelvärde över fem tidsintervall (aktuellt tidsintervall plus/minus 20 minuter). Till höger kan man se att spridningen i MFD tycks komma från specifika dagar, där observationerna bildar "slingor" i MFD. Oftast tycks slingorna gå medsols i diagrammet. Det här fenomenet kallas hysteres och har observerats i flera tidigare empiriska analyser av MFD (t.ex. Buisson och Ladier (2009)). Fenomenet innebär att nätverket inte återhämtar sig från trängsel enligt samma process som trängseln byggs upp, utan medelhastigheten sjunker till en lägre nivå.

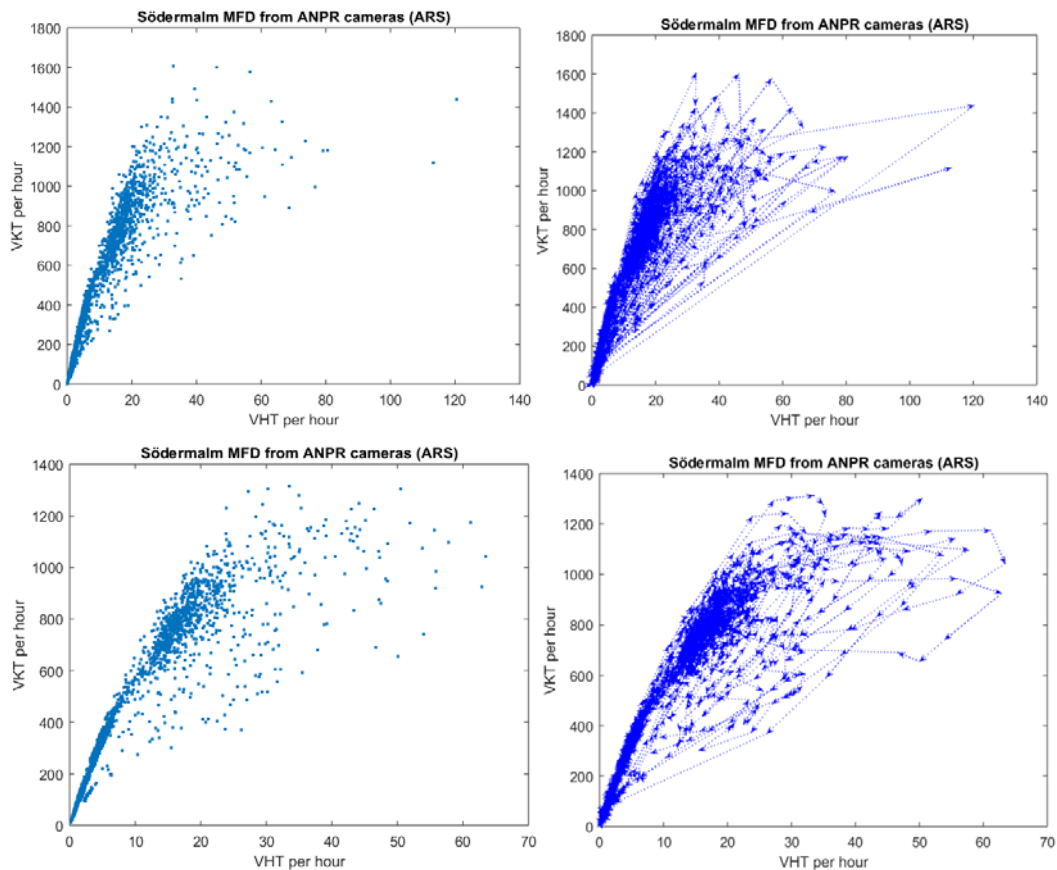


Figur 30: MFD för Södermalm från kameradata, alla rutter med glidande medelvärde över 5 tidsintervall.

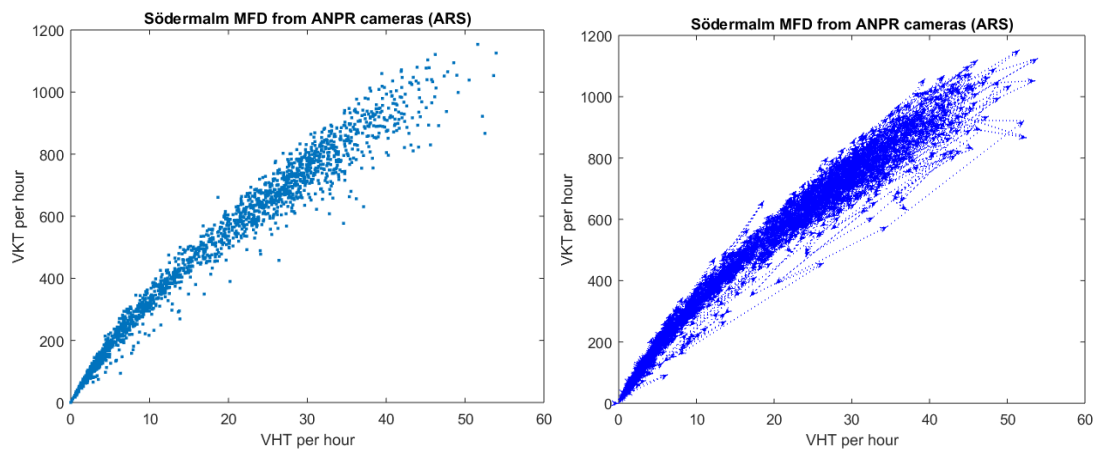
Rutter 35 och 36 mellan Danvikstull och Stadsgården (gemensamt kallade "Stadsgårdsleden") är en viktig infartsled från Nacka och de sydöstra förorterna och är högt trängselbelastade under rusningstimmarna. En hypotes är att dessa rutter skiljer sig från övriga rutter på Södermalm när det gäller trafikmönster. Vi analyserar därför MFD för Stadsgårdsleden och för övriga Södermalm separat.

Figur 31 visar (M)FD för Stadsgårdsleden (rutter 35 och 36), utan utjämning i övre raden och för ett glidande medelvärde över 5 tidsintervall i undre raden. Det är tydligt att det finns stor spridning och stark hysteres i MFD. Figur 32 visar MFD för övriga Södermalm (rutter 34, 50, 51 och 87). Här finns inte alls lika stor spridning i MFD. Vi kan dra slutsatsen att Stadsgårdsleden tycks skilja sig markant från övriga rutter på Södermalm.

Enligt Gayah och Daganzo (2011) kan medsols hysteres-slingor uppstå vid störningar där en stor andel av förarna inte anpassar sina rutter efter trängseln. De visar att nätverk då är mindre stabila när de återhämtar sig från trängsel än när trängseln byggs upp, vilket leder till en mer ojämn fördelning av trängsel med lägre genomsnittligt flöde som resultat. Förare på Stadsgårdsleden tycks alltså inte kunna (eller vilja) anpassa sina rutter då trängsel uppstår, vilket gör trängseln inte fördelar sig homogent i hela området och trafiken blir känslig för störningar.



Figur 31: (M)FD för Södermalm från kameradata, enbart Stadsgårdsleden. Övre raden: Utan utjämning. Nedre raden: Glidande medelvärde över 5 tidsintervall.



Figur 32: MFD för Södermalm från kameradata, alla rutter förutom Stadsgårdsleden.

3.1.2 MFD för Södermalm från taxidata

Beskrivning av taxidata

Floating car data (FCD), eller probe-data, är trafikdata som insamlas från mobila sensorer monterade i fordon eller andra enheter (t.ex. mobiltelefoner). I den här analysen har data från ca 1500 taxibilar i Stockholmsregionen utrustade med GPS-sändare använts. Varje taxi i tjänst rapporterar sin position i form av longitud och latitud med i genomsnitt två minuters intervall. Till varje position

rapporterar också datum och tid, taxins ID-nummer samt en flagga som indikerar om taxin är bokad eller inte.

I analysen har data från Södermalm för perioden 29 sep-12 okt 2014 använts, dvs. samma tidsperiod som för analysen av kameradata. Endast data från vardagar har använts. Vidare har enbart data från bokade taxibilar använts, eftersom de kan antas följa typiskt trafikbeteende i större grad än lediga taxibilar.

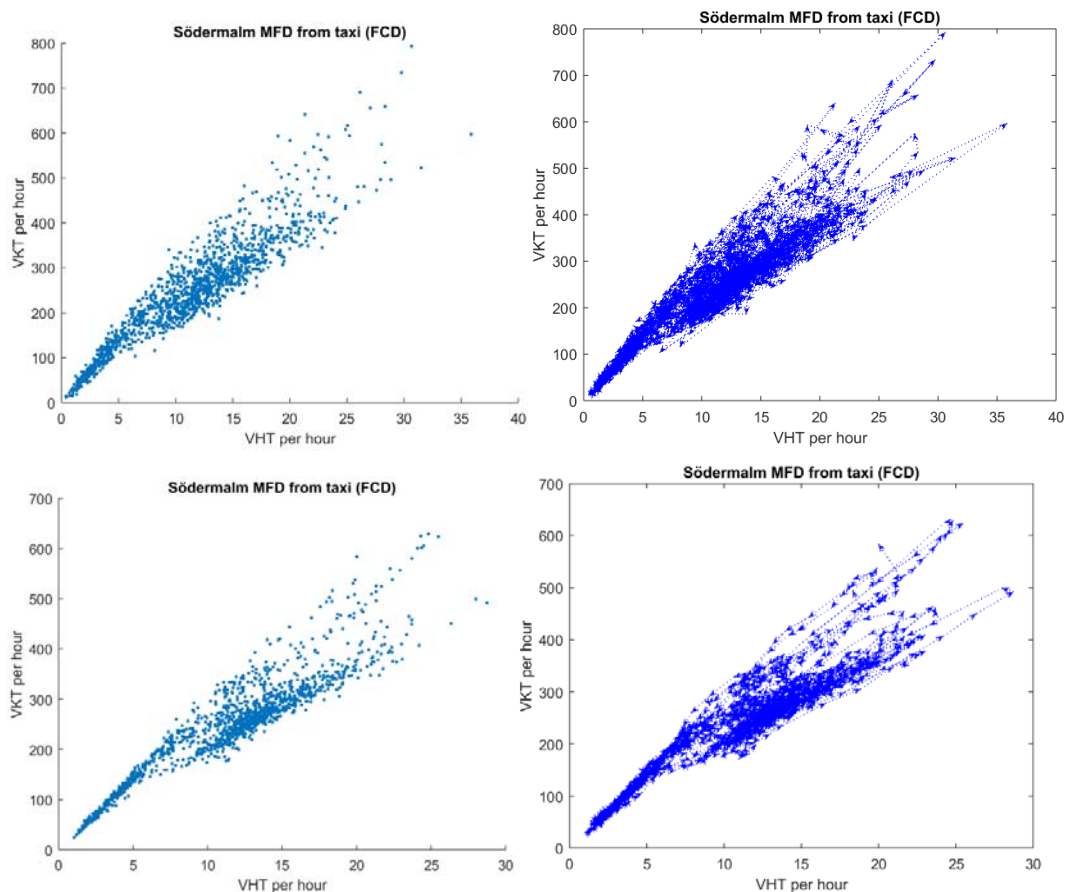
Beräkningsmetod

För varje taxibil sorteras data i tidsordning och paras ihop, så att tidsskillnaden och det förflyttade avståndet mellan konsekutiva positionsrapporter kan räknas ut. Observationer med mycket långa tidsluckor eller avstånd eller orimliga hastigheter filtreras bort.

Varje observation ger alltså en sträcka i form av det Euklidiska avståndet samt en restid i form av tidsskillnaden mellan två efterföljande rapporter. Dessa aggregeras till den totala körsträckan (VKT) och den totala körtiden (VHT) för alla taxibilar över 10-minutersintervall på samma sätt som kameradata. Genom att multiplicera variablerna med 6 uttrycker vi dem i enheterna VHT per timme och VKT per timme. Med 10 dagars data och 144 tidsintervall per dag, varav 25 intervall saknar data, har vi totalt 1415 parvisa observationer av VHT och VKT från taxidata på Södermalm.

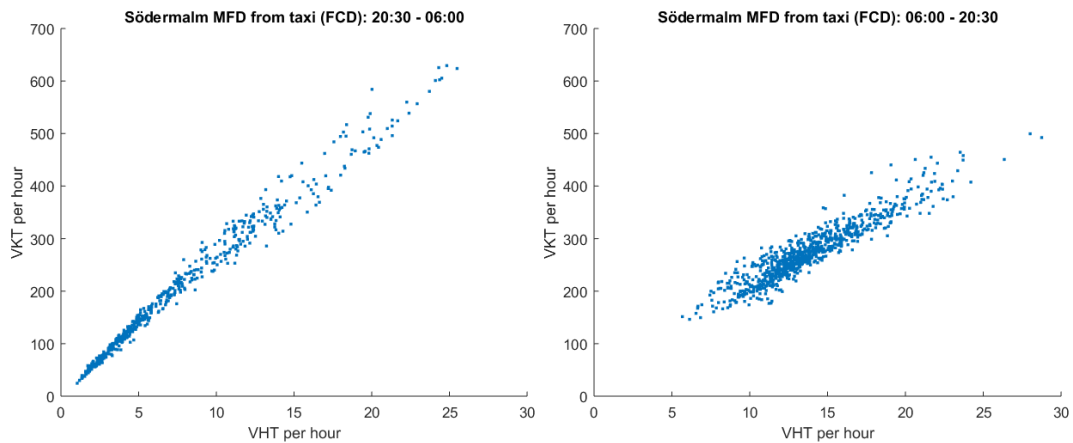
Resultat

Figur 33 visar MFD för Södermalm, utan utjämning i övre raden och för ett glidande medelvärde över 5 tidsintervall i undre raden. Särskilt i den undre raden kan man se att MFD tycks dela upp sig i två kurvor kring VHT på fem fordon per timme. Den övre kurvan fortsätter i det närmaste linjärt uppåt, medan den undre böjer av med en mindre lutning, vilket tyder på trängsel i nätverket. Den undre kurvan liknar till formen MFD från kameradata ovan.



Figur 33: MFD för Södermalm från taxidata. Övre raden: Utan utjämning. Nedre raden: Glidande medelvärde över 5 tidsintervall.

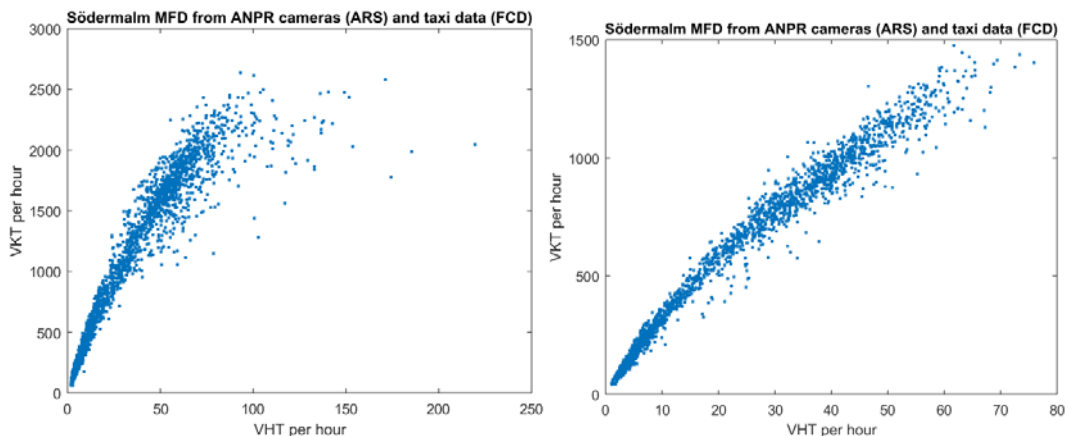
För att förstå orsaken till det uppdelade MFD analyserar vi taxidata från olika tider på dygnet separat. Figur 34 visar MFD beräknat från observationer från kväll, natt och tidig morgon (20:30-06:00) till vänster och observationer från övriga tidpunkter (06:00-20:30) till höger. Det framgår tydligt att i stort sett alla observationer i den övre MFD-kurvan i Figur 6 kommer från kväll, natt och tidig morgon, medan observationer i den lägre MFD-kurvan kommer från övriga tidpunkter. En tolkning av detta fenomen är att taxibilar uppvisar ett annat efterfrågemönster över dygnet än övrig trafik; många taxiresor sker dagtid då det är mycket trafik i allmänhet (affärsresor o.d.), men många taxiresor sker även kväll, natt och tidig morgon med relativt lite övrig trafik (t.ex. resor till/från flygplatser eller tågstationer, från nöjesaktiviteter, o.d.). De många taxiresorna under udda tider på dygnet påverkas inte av trängsel i samma utsträckning som under andra tider på dygnet, vilket ger upphov till två regimer i MFD.



Figur 34: MFD för Södermalm från taxidata. Till vänster: Kvälls- och natttid (20:30-6:00). Till höger: Dagtid (6:00-20:30).

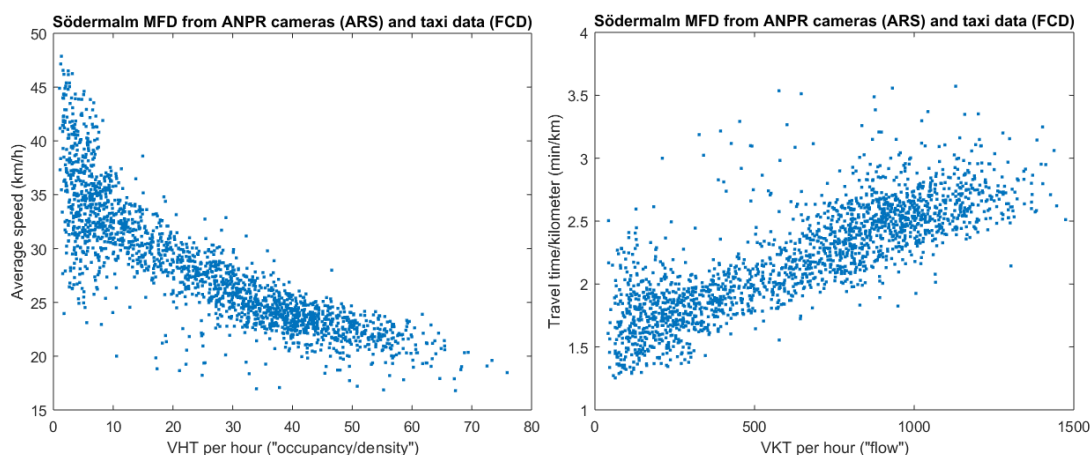
3.1.3 MFD för Södermalm från kombination av kameradata och taxidata

Kameradata och taxidata kan slås ihop till ett kombinerat data-set som kan användas för att beräkna MFD. En rättfram metod är att slå ihop VKT och VHT från de två källorna för varje tidsintervall. Figur 35 visar resultatet. I vänster kolumn används alla kamerarutter, i höger kolumn har Stadsgårdsleden uteslutits. Det kombinerade MFD påminner mycket om det som beräknades ur enbart kameradata.



Figur 35: MFD för Södermalm från kamera- och taxidata. Till vänster: Alla rutter. Till höger: Utan Stadsgårdsleden.

Figur 36 visar två alternativa sätt att beskriva MFD. Till vänster plottas den genomsnittliga hastigheten i nätverket, som beräknas som VKT/VHT , mot VHT per timme, vilket är proportionellt mot beläggning och täthet. Grafen kan alltså sägas visa ett makroskopiskt hastighet-densitets-diagram för Södermalm. Till höger plottas genomsnittlig restid per kilometer VHT/VKT , dvs. inversen av den genomsnittliga hastigheten, mot VKT per timme, vilket är proportionellt mot genomsnittligt flöde. Grafen visar alltså en slags makroskopisk vd-funktion för Södermalm.



Figur 36: MFD för Södermalm (utan Stadsgårdsleden) från kamera- och taxidata. Till vänster: Hastighet mot VHT per timme ("beläggning/täthet"). Till höger: Restid per sträcka mot VKT per timme ("flöde").

Figuren visar att restiden per sträcka tycks öka närmast linjärt med VKT. Restiden per sträcka vid friflödesförhållanden tycks ligga runt 1,5 minuter/kilometer men kan öka upp till 2,5 - 3 minuter/kilometer. Restiden per sträcka ("TPS") kan användas för att beräkna ett trängselindex (TI) uttryckt i procent:

$$TI = 100 * \left(\frac{TPS}{TPS_0} - 1 \right),$$

där TPS_0 är restiden per sträcka vid friflödesförhållanden. En restid per sträcka på 3 minuter/km motsvarar trängselindex på ca 100%, dvs. restiden är dubbelt så lång som vid friflöde.

3.1.4 Diskussion

Analysen visar att det finns ett relativt väldefinierat MFD för Södermalm, i synnerhet då Stadsgårdsleden exkluderas från nätverket. MFD visar avtagande lutning, vilket betyder att medelhastigheten sjunker med ökande täthet i nätverket. Tätheten når dock aldrig den kritiska nivån då flödet börjar avta, vilket innebär att det finns trängsel men inte hyperträngsel. Stadsgårdsleden uppvisar andra egenskaper än övriga delar av nätverket, med tendenser till hyperträngsel och kraftig hysteres. Flera av de villkor för att ett väldefinierat MFD ska existera som Daganzo och Geroliminis (2008) ställer upp tycks alltså inte uppfyllas för Södermalm som helhet; däremot kan de tänkas uppfyllas för vissa delar av stadsdelen. En slutsats från detta kan vara att åtgärder för trafikledning bör delas upp i åtgärder som fokuserar på infartsleden Stadsgårdsleden och åtgärder som fokuserar på det övriga stadsgatunätet.

3.2 City-området

3.2.1 MFD för City-området från slangmätningar

Beskrivning av slangdata

Varje år genomför Stockholms stad slangmätningar av flöden och hastigheter på ett stort antal gator och vägar. Under vår utvärderingsperiod i september och oktober 2014 genomfördes slangmätningar på totalt 14 platser samtidigt i city-området, se Figur 37. Mätningarna gjordes framför allt på mindre, ofta enkelriktade gator i den norra delen av området, men även på Sveavägen. Mätplatserna är:

- 1169: Tegnergatan mellan Luntmakargatan - Sveavägen
- 1170: Kammakargatan mellan Luntmakargatan - Sveavägen
- 1171: Luntmakargatan mellan Kammakargatan - Adolf Fredriks Kyrkogata
- 1172: Sveavägen södergående mellan Kammakargatan - Adolf Fredriks Kyrkogata
- 1173: Sveavägen norrgående mellan Kammakargatan - Adolf Fredriks Kyrkogata
- 1179: Holländargatan mellan Wallingatan - Kammakargatan
- 1180: Upplandsgatan mellan Wallingatan - Kammakargatan
- 1181: Västmannagatan mellan Wallingatan - Kammakargatan
- 1182: Dalagatan mellan Västmannagatan / Wallingatan - Tegnergatan
- 1183: Barnhusbron mellan Fleminggatan - Dalagatan
- 1184: Torsgatan mellan Torsgränd - Kammakargatan
- 1186: Döbelnsgatan mellan Kammakargatan - David Bagares gata
- 1187: Johannesgatan mellan Kammakargatan - David Bagars gata
- 1188: Regeringsgatan mellan Jutas Backe - Drottninghusgränd

Varje mätplats levererar flöde och medelhastighet i 15-minutersintervall uppdelat på två riktningar.



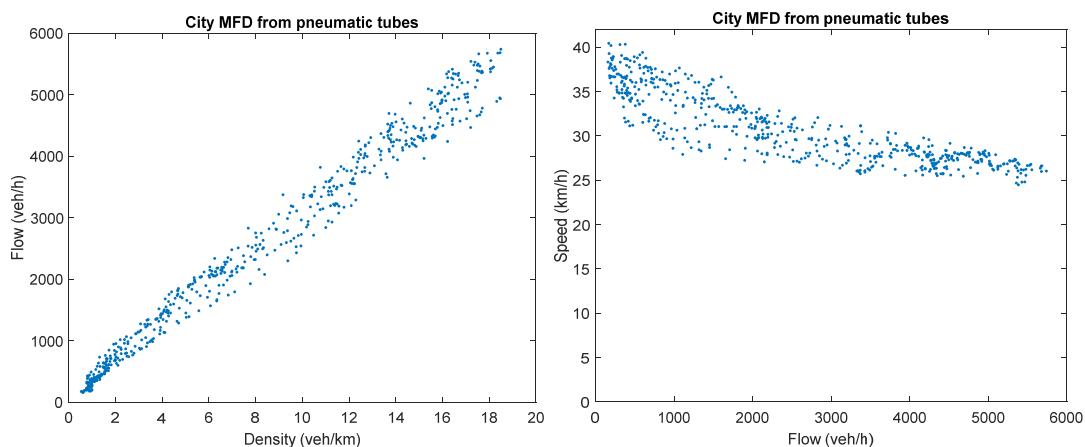
Figur 37: Cityområdet (skuggat område) och positioner för slangmätningar i området (gula markörer)

Beräkningsmetod

Genomsnittlig fordonstäthet (fordon/km) beräknas för varje mätplats och 15-minutersintervall genom att dividera det uppmätta flödet (fordon/h) med den uppmätta medelhastigheten (km/h). Medelvärden av fordonstäthet, flöde och hastighet för varje tidsintervall för hela området räknas ut som aritmetiska medelvärden över alla mätplatser.

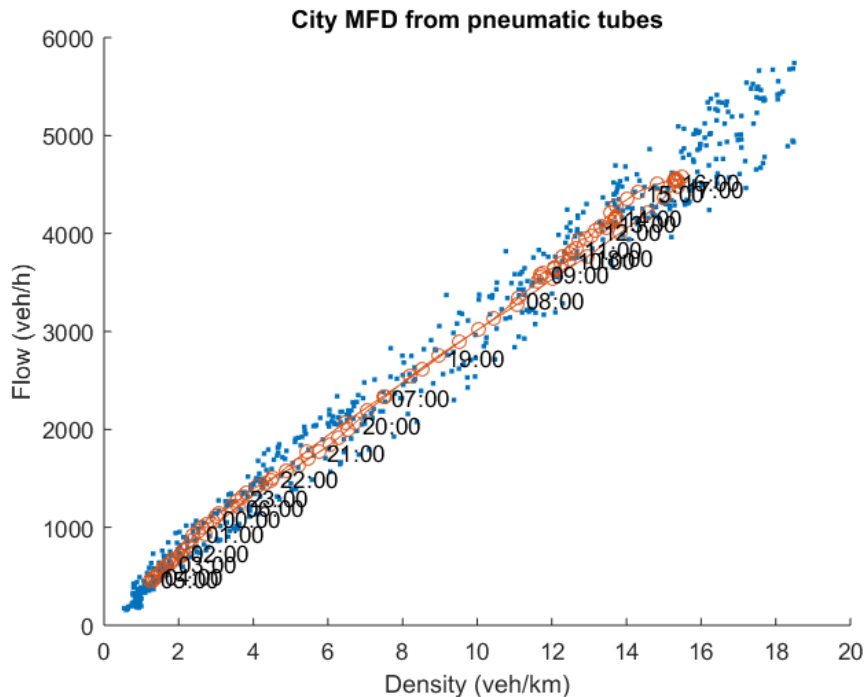
Resultat

Figur 38 visar MFD över alla slangmätningar i City-området. Till vänster är varje parvis observation av fordonstäthet och flöde plottad som en punkt, till höger visas sambandet mellan flöde och hastighet. Figuren visar att det finns ett relativt tydligt samband mellan de tre trafikstorheterna. Det finns en tendens till avtagande ökning av flödet som funktion av tätheten, dvs. trängsel, men trafiken når inte upp till nätverkets kritiska täthet där flödet avtar med tätheten.

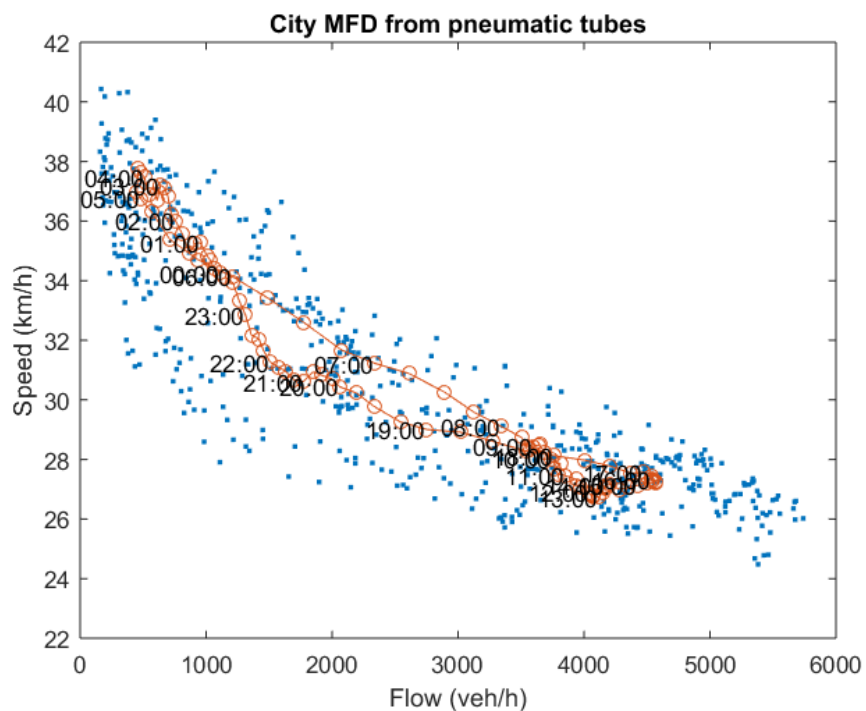


Figur 38: MFD för City-området från slangmätningar, alla mätplatser. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.

Figur 39 visar hur täthet och flöde varierar över dygnet, beräknat som ett genomsnitt över alla dagar under mätperioden. Figuren visar att de lägsta trafiknivåerna uppnås runt kl 4-5 på morgonen, varefter de snabbt ökar under morgontimmarna 6-9 och når sina maxima runt kl 16 på eftermiddagen. Därefter avtar trafiknivåerna återigen. Figur 40 visar på motsvarande sätt hur flöde och hastighet varierar över dygnet. Figuren antyder att hastigheten är något lägre under avvecklingen av trafiken under kvällen jämfört med samma flöde under uppbyggnaden av trafiken under morgonen.



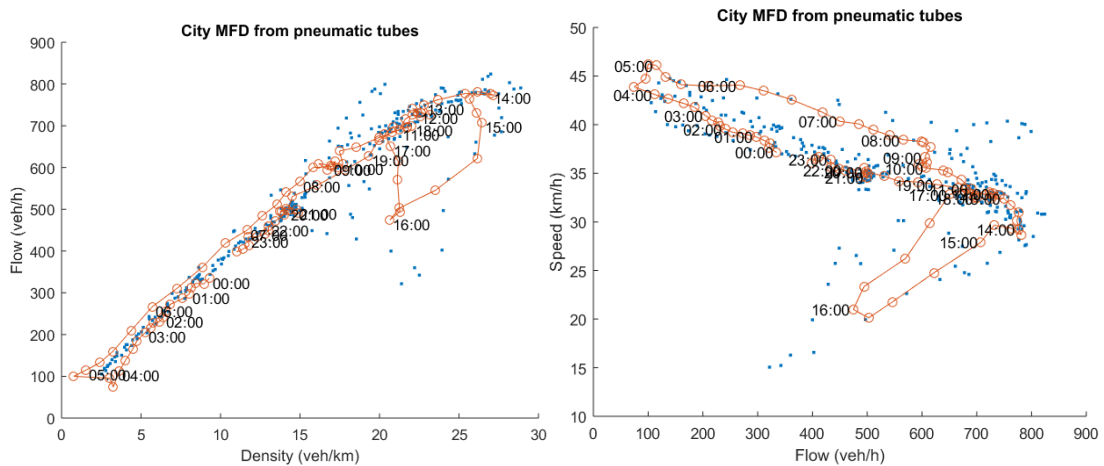
Figur 39: Samband mellan flöde och täthet över dygnet för City-området.



Figur 40: Samband mellan hastighet och flöde över dygnet för City-området.

Mätplatsen Sveavägen skiljer sig från övriga mätplatser genom att gatan är en stor innerstadsled med betydande trafik. Figur 41 visar fundamentaldiagrammet för Sveavägen södergående, uttryckt som flöde mot täthet till vänster och hastighet mot flöde till höger. Figuren visar att hyperträngsel ofta uppstår runt kl. 14-15 på eftermiddagen, och hysteres uppstår med lägre flöde vid motsvarande täthet som på förmiddagen. Hastigheten är sedan genomgående lägre på kvällen och natten än under

morgonen för samma flödesmängder. Sveavägen uppvisar med andra ord högre trängsel än nätverket med slangmätningar som helhet.



Figur 41: (M)FD för Sveavägen södergående mellan Kammakargatan och Adolf Fredriks Kyrkogata.

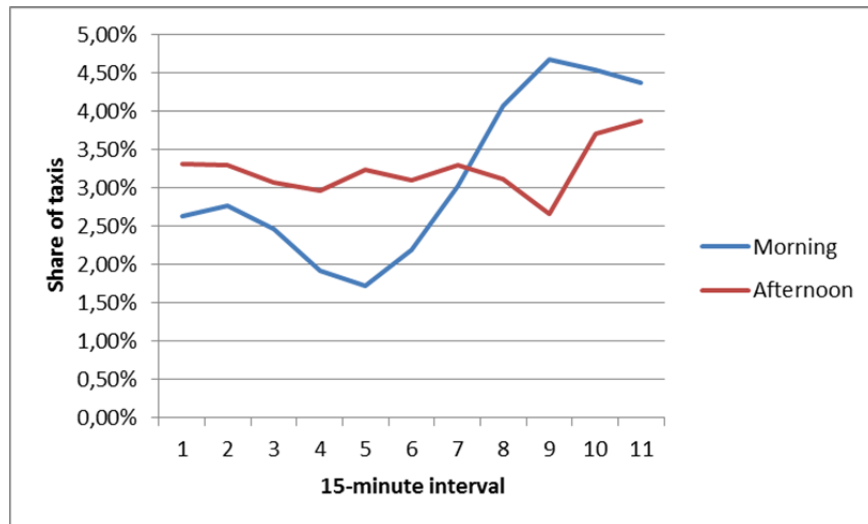
3.2.2 MFD för City-området från taxidata

Beskrivning av taxidata

Samma typ av floating car data (FCD) från taxibilar har använts för City-området som för Södermalm, se föregående avsnitt. Som tidigare har data för perioden 29 sep-12 okt 2014 använts, dvs. samma tidsperiod som för analysen av slangmätningar. På grund av tillgänglighet har endast data från vardagar använts. Vidare har enbart data från bokade taxibilar använts, eftersom de kan antas följa typiskt trafikbeteende i större grad än lediga taxibilar.

Beräkningsmetod

På samma sätt som för Södermalm sorteras data för varje taxibil i tidsordning och paras ihop, så att tidsskillnaden och det förflyttade avståndet mellan konsekutiva positionsrapporter kan räknas ut. Observationer med mycket långa tidsluckor eller avstånd eller orimliga hastigheter filtreras bort. Varje observation ger alltså en sträcka i form av det Euklidiska avståndet samt en restid i form av tidsskillnaden mellan två efterföljande rapporter. Dessa aggregeras till den totala körsträckan (VKT) och den totala körtiden (VHT) för alla taxibilar över 15-minutersintervall, samma intervalllängd som upplösningen hos slangmätningarna. Genom att multiplicera variablerna med 4 och dela med totala nätverkslängden (56,2 km) uttrycker vi dem i enheterna fordon per timme och fordon per kilometer. Med 10 dagars data och 96 tidsintervall per dag har vi totalt 960 parvisa observationer av flöde och densitet från City-området.

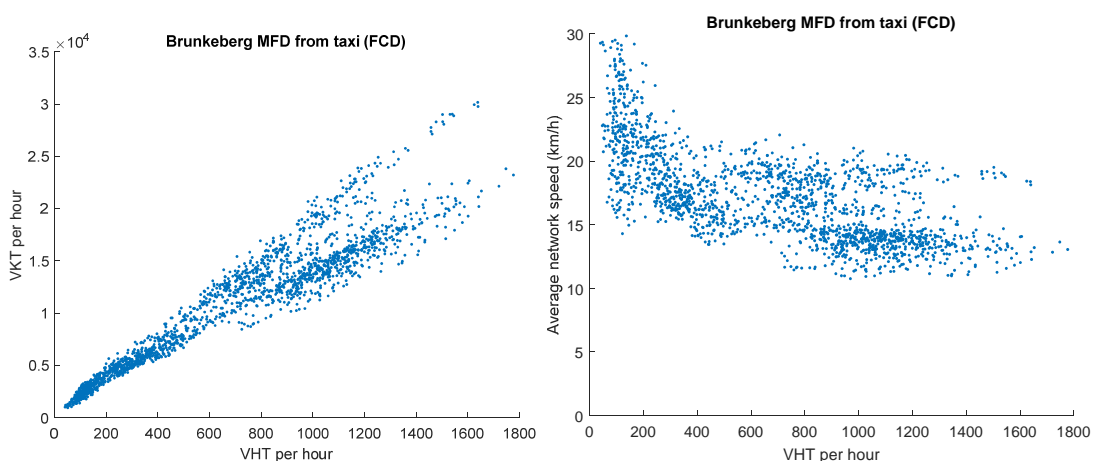


Figur 42: Andel taxibilar vid positionerna för slangmätningar beroende på tidpunkt på dagen. Morgonens första 15-minutersintervall startar kl. 07:15 och eftermiddagens första intervall startar kl. 15:15.

VHT och VKT skalas upp utifrån andel taxi jämfört med totala flödet vid punkterna för slangmätningar. Figur 42 visar hur andel taxibilar varierar beroende på tidpunkt. Andelen taxi är som högst 4,5 % och detta sker under slutet av morgonens högtrafikperiod.

Resultat

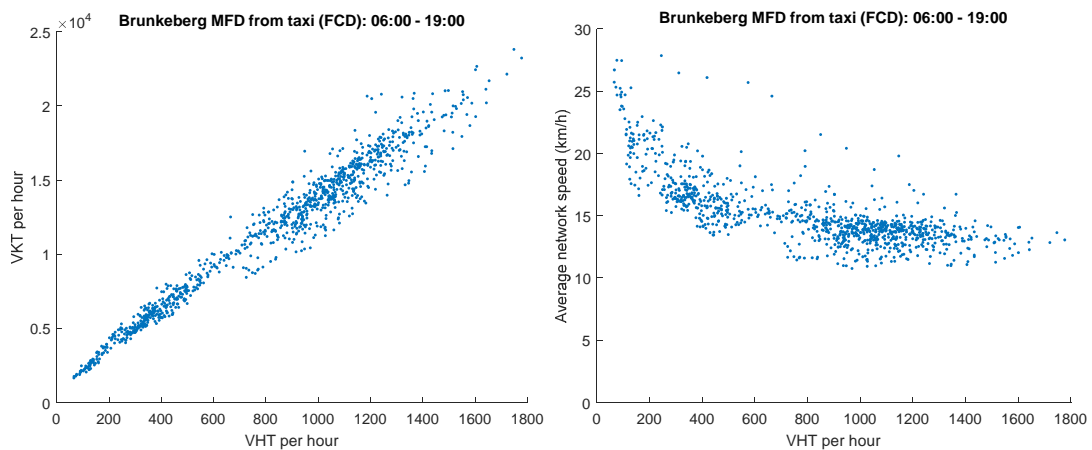
Figur 43 visar MFD för City-området för ett glidande medelvärde över 5 tidsintervall. På liknande sätt som för Södermalm kan man se att MFD tycks dela upp sig i två kurvor kring VHT på 300 fordon per timme. Den övre kurvan fortsätter i det närmaste linjärt uppåt, medan den undre böjer av med en mindre lutning, vilket tyder på trängsel i nätverket. Samma uppdelning kan ses till höger där den genomsnittliga nätverkshastigheten, beräknad som VKT/VHT för varje tidsintervall plottas mot VHT per timme.



Figur 43: MFD för City-området från taxidata. Till vänster: VKT per timme mot VHT per timme. Till höger: Genomsnittlig nätverkshastighet mot VHT per timme.

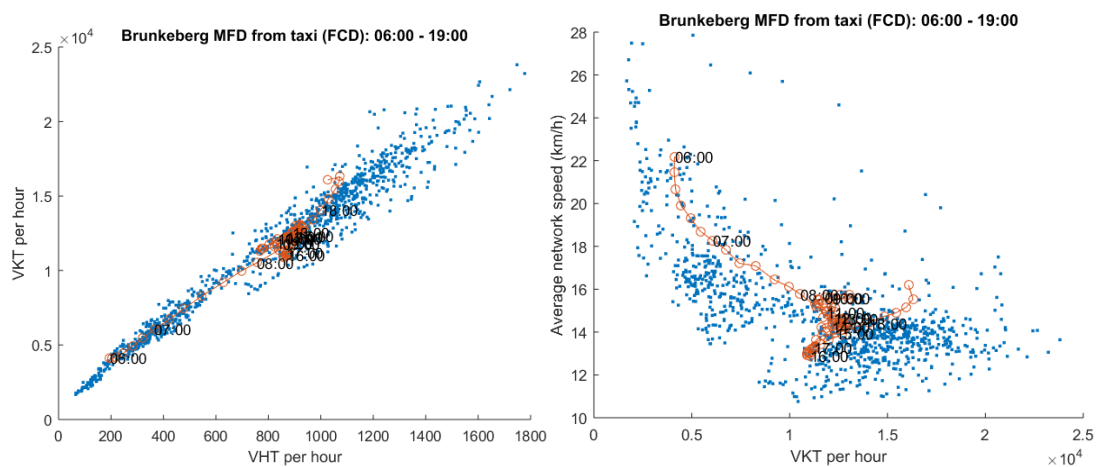
Figur 44 visar MFD beräknat från observationer från dagtid (06:00-19:00). Liksom för Södermalm framgår tydligt att i stort sett alla observationer i den

lägre MFD-kurvan kommer från dagtid, medan den övre kurvan kommer från nattetid. För City-området blir separationen tydligast då brytpunkten mellan dag och natt sätts kl. 19, till skillnad från kl. 20:30 för Södermalm. Som diskuterades tidigare är en tolkning av detta fenomen är att taxibilar uppvisar ett annat efterfrågemönster över dygnet än övrig trafik; många taxiresor sker dagtid då det är mycket trafik i allmänhet (affärsresor o.d.), men många taxiresor sker även kväll, natt och tidig morgon med relativt lite övrig trafik (t.ex. resor till/från flygplatser eller tågstationer, från nöjesaktiviteter, o.d.). De många taxiresorna under udda tider på dygnet påverkas inte av trängsel i samma utsträckning som under andra tider på dygnet, vilket ger upphov två regimer i MFD.



Figur 44: MFD för City-området från taxidata, endast dagtid (6:00-19:00). Till vänster: VKT per timme mot VHT per timme. Till höger: Genomsnittlig nätverks hastighet mot VHT per timme.

Figur 45 visar hur VKT och VHT varierar över dygnet mellan kl 6 och kl 19, beräknat som ett genomsnitt över alla dagar under mätperioden, samt samband mellan medelhastighet och VHT. Figuren visar att utvecklingen över dagen följer en snarlik trend som kunde utläsas från slangmätningarna i Figur 39. Trafiken ökar snabbt mellan 6 och 8 och håller sig sedan på en jämn nivå fram till ca kl 19, då taxitrafiken börjar gå över till MFD-kurvan för nattetid.



Figur 45: City-området, samband mellan VKT och VHT (vänster bild) och medelhastighet och VHT (höger bild) mellan kl6 och kl19.

Diskussion

Analysen visar att det finns ett relativt väldefinierat MFD för City-området. MFD visar en lätt avtagande lutning, vilket betyder att medelhastigheten sjunker med ökande täthet i nätverket. Tätheten når dock aldrig den kritiska nivån då flödet börjar avta, vilket innebär att det finns trängsel men inte hyperträngsel. Slangmätningarna är i huvudsak gjorda på mindre sidogator som inte uppvisar någon större trängsel. Ett undantag är Sveavägen där hyperträngsel kan observeras. Resultaten antyder att trängseln i City-området inte är homogent fördelad mellan gator och vägar av olika klasser. Detta kan innebära att den lokala trängseln som finns på t.ex. Sveavägen inte fångas av MFD. Ett av de villkor för att ett väldefinierat MFD ska existera som Daganzo och Geroliminis (2008) ställer upp tycks alltså inte uppfyllas för City-området som helhet; däremot kan de tänkas uppfyllas för vissa delar av stadsdelen. En slutsats från detta kan vara att åtgärder för trafikledning bör delas upp i åtgärder som fokuserar på större innerstadsleder och åtgärder som fokuserar på det övriga stadsgatunätet.

4 Diskussion: Potentialen hos MFD för trafikledning i Stockholm

Detta avsnitt diskuterar vilka slutsatser som kan dras ur litteraturstudien och den empiriska analysen hittills när det gäller potentialen hos MFD-baserade metoder för trafikledning i Stockholm.

4.1 MFD för nivåsättning av trängselavgifter

Bara en av artiklarna i litteraturoversikten, Zheng et al. (2012), använder MFD för att reglera trafik med hjälp av trängselavgifter. Metoden använder MFD för att fastställa nivån på statiska trängselavgifter, alltså avgifter som inte varierar utifrån det dagsaktuella trafikläget. Det antas att området och tidsintervallet som ska avgiftsbeläggas redan är fastställt, sedan används metoden för att sätta en lämplig nivå på avgiften.

I en studie på Zürich används en relativt liten avgiftsbelagd zon, ca 1 km i radie. En agentbaserad simuleringsmodell, MATSim, används först för att skatta MFD utan avgifter för området innanför avgiftssnittet; detta område bör ha valts så att ett väldefinierat MFD existerar. En kritisk täthet som inte bör överstigas inom den avgiftsbelagda zonen definieras, och genom iterativa avgiftsregleringar och simuleringar fastställs avgiftsnivån så att tätheten i området inte överstiger den kritiska nivån. Studien visar att avgifterna ger stora restidsvinster innanför tullsnittet som överstiger intäkterna från trängselavgiften, och måttliga restidsökningar utanför tullsnittet (orsakade av trafik som tar omvägar runt området). Metoden tar endast hänsyn till restidsvinster innan för avgiftssnittet när avgiftsnivån sätts, inte effekter på t.ex. utsläpp eller buller.

Vår bedömning är att det inte finns uppenbara fördelar med att fastställa trängselavgifter med hjälp av MFD jämfört med de traditionella modellbaserade metoder som använts t.ex. i Stockholm. MFD-metoden fångar vissa aspekter av restidsvinster, men hur effekter som förändringar i färdmedelsval, bilinnehav, m.m. och externa effekter som utsläpp och säkerhet tas med i utformningen är oklart. Den ekonomiska teorin kring trängselavgifter för nätverk där MFD existerar (Fosgerau 2015) är dock intressant och vidare analys kan ge insikter om hur trängselavgifter bör fastställas i praktiken.

4.2 MFD för zonreglering av trafik

Ett antal artiklar (Keyvan-Ekbatani et al. 2012; Keyvan-Ekbatani, Papageorgiou, and Papamichail 2013; Geroliminis, Haddad, and Ramezani 2013; Ramezani, Haddad, and Geroliminis 2015) utvecklar metoder för att reglera trafiken där tanken är att harmonisera trängselnivån mellan olika zoner, där trängseln inom varje zon antas beskrivas väl av ett MFD. Trängseln harmoniseras genom att reglera flödet mellan olika områden på ett sådant sätt att trafik leds från områden med hög trängsel till områden med låg trängsel och tillstånd med hyperträngsel undviks. Regleringen sker med trafiksignaler eller andra typer av metering.

Optimering av trafiksignaler på nätverksnivå är ett mycket komplext problem. MFD-modellen kan göra det möjligt att förenkla beskrivningen av trafiken och formuleringen av optimeringsproblemet utan att effektiviteten hos systemet minskar alltför mycket. Vi bedömer att MFD har stor potential för trafikreglering på zon-nivå i städer med hög trängsel i relativt homogena nätverk. Den empiriska analysen av Stockholm visar dock att hyperträngsel inte tycks förekomma i större utsträckning i innerstaden. Därmed är det tveksamt hur stor effekt de föreslagna trafikregleringsmetoderna, som bygger på att tätheten i varje område ska understiga den kritiska densiteten för att hyperträngsel uppstår, skulle ha i Stockholm. Zonreglering kan vara mest relevant i form av ramp metering på och av Essingeleden och de andra motorvägslederna i staden, där hyperträngsel är vanligt. Vi bedömer dock att ramp metering på motorvägar ligger utanför fokus för detta projekt.

4.3 MFD för beslutsstöd och information

En artikel i litteraturstudien (Horiguchi, Iijima, and Hanabusa 2010) beskriver hur MFD kan användas för att generera enkla, tydliga rutnäts-kartor som beskriver trafiksituationen i olika delar av staden. Två index definieras: flödes- och singularitets-index. Flödesindex fångar hur nära nätverkstillståndet är till origin i MFD, medan Singularitetsindex fångar hur annorlunda trafiksituationen är från en genomsnittlig dag.

Vår bedömning är att MFD-baserade index och visualiseringar är mycket nyttiga för att beskriva trafikförhållanden, inte bara för allmänheten utan också för trafikledare och -planerare. Vi tror att MFD är användbart både i realtidstillämpningar och på längre sikt för att övervaka trender i trafiken och för att utvärdera effekten av olika typer av framkomlighetsåtgärder.

5 Validering av Transmodeller för City-området

5.1 Simuleringsmodellen

Transmodeller är en dynamisk mikrosimuleringsmodell¹ vilken Trafikverket har valt att initiera ett arbete med för storstadsapplikationer. I detta avsnitt undersöker vi huruvida Transmodeller återskapar ett liknande MFD som uppmätts empiriskt för delar av Stockholms innerstad. Projektet har dragit nytta av det kalibreringsarbete som har genomförts för olika delar av Stockholm i Transmodeller. Vi har fått tillgång till den City-modell som ÅF på uppdrag av Stockholm Stad har tagit fram och där Movea hjälpt till i arbetet med parametersättning (ÅF and Movea 2016). I ett senare skede har WSP övertagit kalibreringsarbetet med City-modellen. Caliper har implementerat den svenska logiken för trafiksignaler i Transmodeller och arbetar nu med en car-following-modell som Stockholms stad beställt.

Transmodellens mikroskopiska representation av enskilda fordon är lämplig för innerstadsmiljöer som bland annat kännetecknas av många signalerade korsningar. Inom Transmodeller kopplas fordon till förare med personliga egenskaper som påverkar deras körbeteende. Förarna har en start- och målpunkt och kan välja sin rutt före eller under resan. Förarens beteende är resultatet av en rad olika delmodeller som styr acceleration, körfältbyte, vävning, väjning, interaktion med signalreglerade korsningar etc. Ruttvalet kan beräknas på olika sätt i Transmodeller. I denna studie har en dynamisk nätutläggningsmetod (DTA) använts. Flera simuleringar har utförts inom DTA, och förare har fördelats mellan olika rutter beroende på den generaliserade reskostnaden (huvudsakligen restid) för varje rutt. I idealfallet kommer ingen förare tjäna på att byta rutt när DTA är klar och därmed har användarjämvikt uppnåtts, åtminstone approximativt. Resultatet av nätutläggningen sparas som tabeller med upplevda restider och svängstraff.

5.2 Nätverket

Figur 46 visar nätverket i City-modellen. Nätverket omfattar samma område som användes i den empiriska analysen av MFD, se avsnitt 3.2. Transmodellernätverket för City består av 53 zoner och 2756 relevanta OD-relationer. Korsningar markerade med S i Figur 46 är signalreglerade. Det finns ungefär 50 signalreglerade korsningar i modellen och dessa har kodats med varierande detaljeringsgrad. Modellen har kalibrerats mot Google-restider och trafikflöden från slang-mätningar. Kalibreringen har gjorts av trafikanalytiker som inte deltagit i detta projekt.

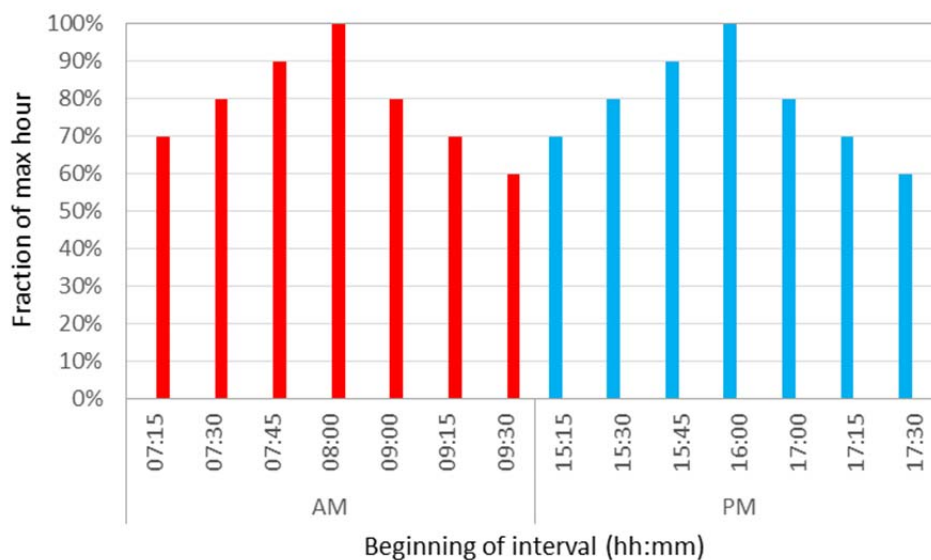
¹ Transmodeller kan även tillämpas på meso-nivå, men denna funktion används inte i det här projektet.



Figur 46: Nätverksmodell för City-området i Transmodeller och område för beräkning av VKT och VHT (röd gräns)

5.3 Efterfrågan

Vi har haft tillgång till en OD-matris för förmiddagsrusningen (08:00-09:00) och en OD-matris för eftermiddagsrusningen (16:00-17:00). För att simuleringarna skulle ge en bild av hela MFD behöver man dock även simulera uppbyggnaden av köer innan rusning och avvecklingen av köer efter rusningstimmen. Därför har OD-matriserna utvidgats till perioderna 07:15-10:00 och 15:15-18:00 genom att skala efterfrågan med de procenttal som visas i Figur 47.



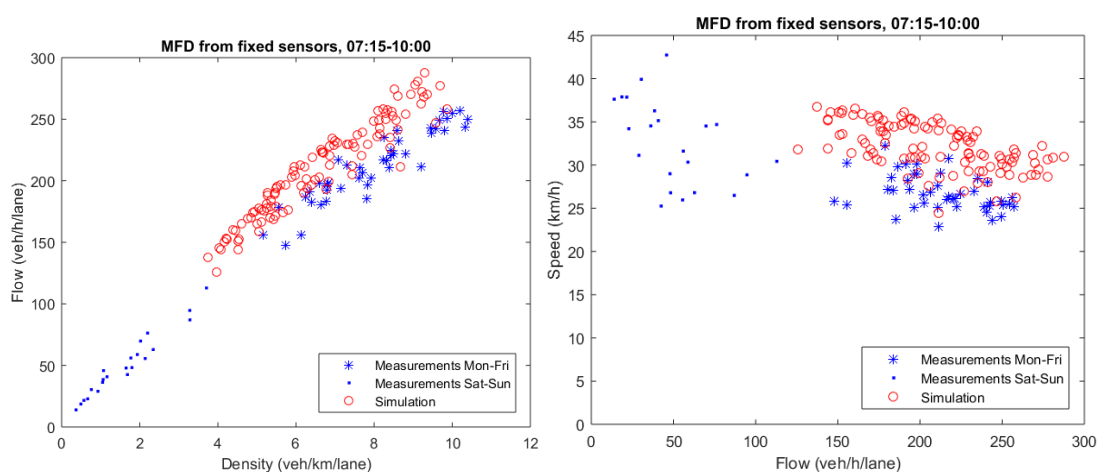
Figur 47: Andel av maxtimmesefterfrågan för respektive intervall med angiven starttid.

5.4 Jämförelse av simuleringsresultat mot mätningar

Slangmätningar

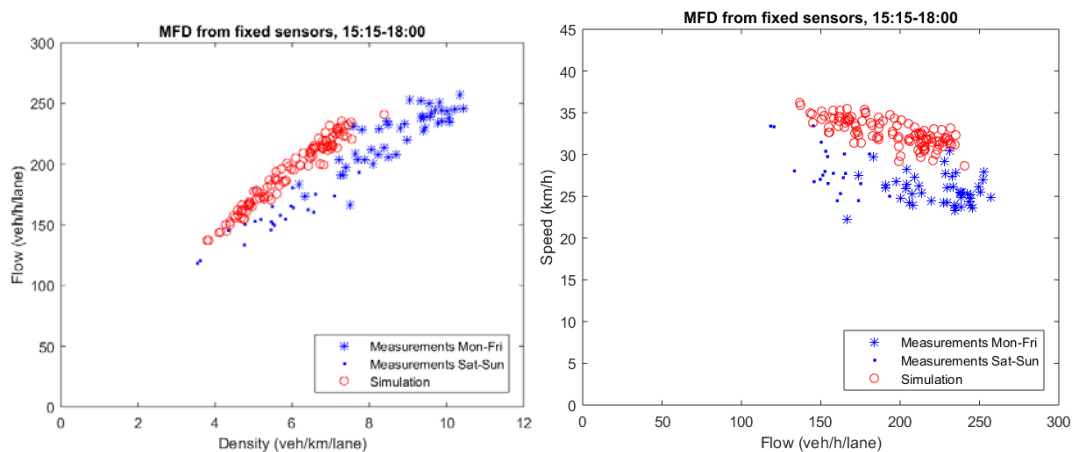
För att jämföra simuleringsmodellen med empiriska data har virtuella slangmätningar satts upp i Transmodeller på samma mätplatser som i verkligheten. Data samlas i simuleringsmodellen in i 5-minuters-intervall, men aggregeras senare till 15-minuters-intervall för konsistens med de empiriska slangmätningarna.

Figur 48 visar resultat av validering av Transmodellers simuleringsresultat mot slangmätningar för morgonrusningen. Eftersom Transmodellers OD-matris representerar vardagsförhållanden används endast slangmätningar från vardagar i jämförelsen. Simuleringsresultaten visas med röda cirklar, slangmätningarna för vardagar med blå stjärnor och slangmätningar för helgdagar med blå punkter. Formen på MFD stämmer väl överens mellan simuleringsresultat och mätningar. Dock ligger simuleringsresultaten något högre när det gäller flöde vid samma densitet, vilket ger en överskattning av hastigheterna i simuleringsmodellen för de densitetsnivåer som registreras av slangmätningarna. Detta kan tyda på att friflödeshastigheterna är överskattade i modellen.



Figur 48: Jämförelse mellan simulerade och verkliga slangmätningar i City-området – morgonrusning. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.

Formen på MFD för eftermiddagen är mycket likt MFD för morgonen (Figur 49), men spridningen mellan intervall är mindre – framför allt är skillnaden mellan helg och vardag större för morgonen än för eftermiddagen, vilket är rimligt.

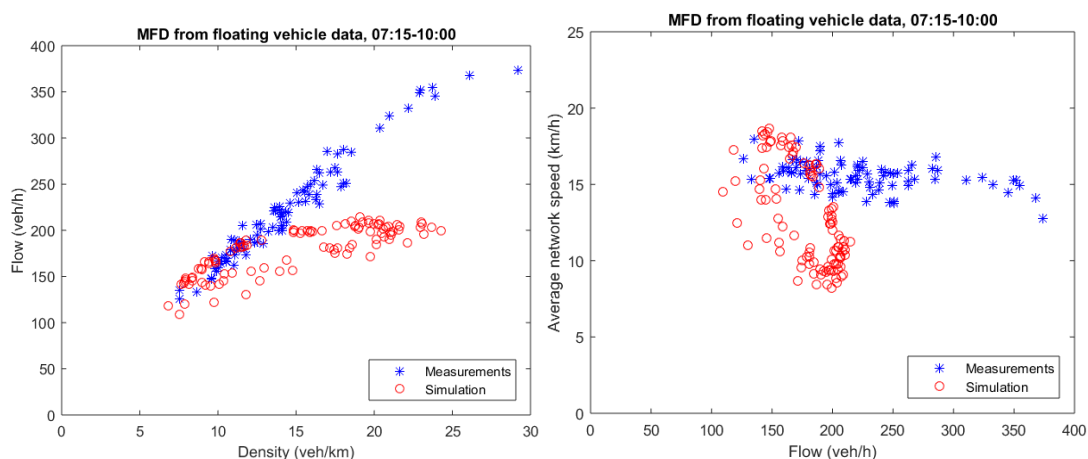


Figur 49: Jämförelse mellan simulerade och verkliga slangmätningar i City-området – eftermiddagsrusning. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.

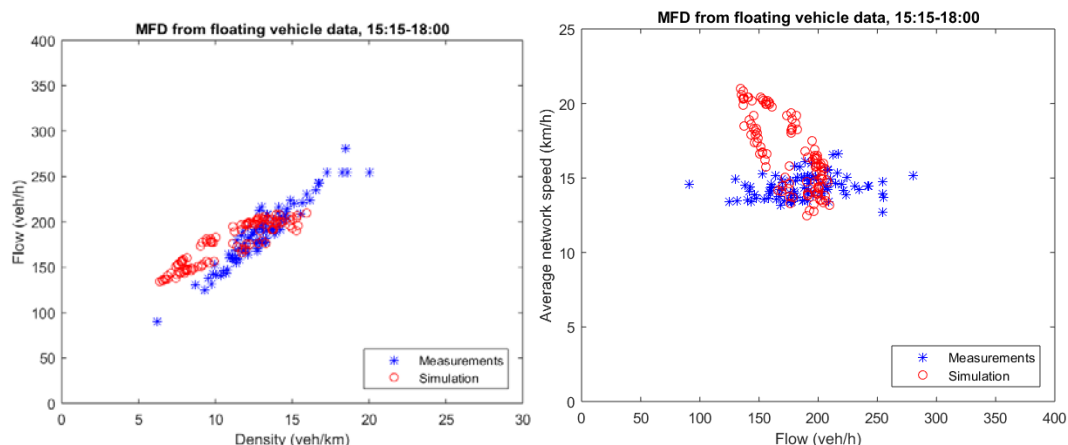
Taxidata

För att jämföra Transmodeller med empiriska data från floating-car-mätningar med taxibilar har totala antalet fordonskilometer (VKT) och fordonstimmar (VHT) beräknats för hela City-nätverket i Transmodeller. Dessa har sedan räknats om till flöde och densitet genom att dela med nätverkets totala längd. Simuleringsresultaten har sedan jämförts med empiriska taxidata för hela City-området, där taxidata har skalats upp enligt andelarna som visas i Figur 42.

Resultatet av valideringen visas i Figur 50 och Figur 51. Eftersom Transmodellers OD-matris representerar vardagsförhållanden används endast taxidata från vardagar i jämförelsen. MFD från taxibilar fångar en större del av MFD med högre registrerade flödes- och densitetsnivåer än slangmätningarna. Anledningen till det är troligen att de flesta slangmätningarna är placerade på mindre gator med lägre flöden.



Figur 50: Jämförelse mellan simuleringsdata och taxidata för hela City-området – morgonrusning. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.



Figur 51: Jämförelse mellan simuleringsdata och taxidata för hela City-området - eftermiddagsrusning. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.

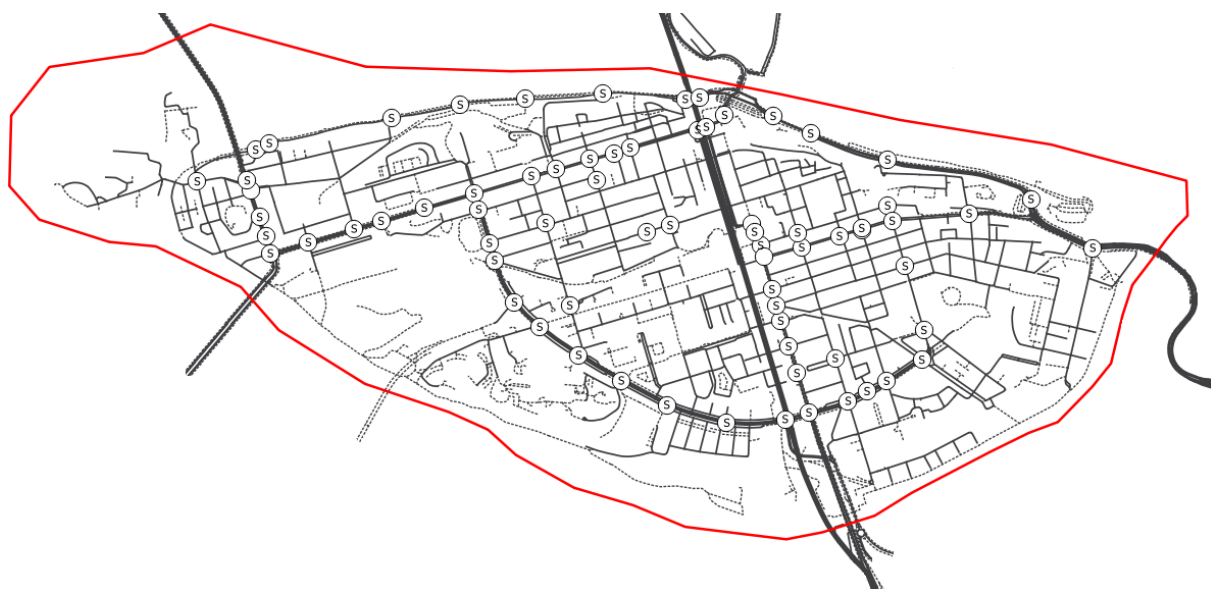
Precis som i förra avsnittet överskattar simuleringsresultaten flöde och hastighet vid låg densitet. Vid hög densitet ändras dock bilden och simuleringsresultaten underskattar flöde och hastighet. Det verkar som att kapaciteten i nätverket underskattas, vilket ger högre trängsel i modellen än i mätdata. MFD från Transmodeller visar lägre flöden under avvecklingen av rusningen än under uppbyggnaden, både under förmiddag och eftermiddag, vilket inte syns i de empiriska data. Detta tyder på att det finns stora köproblem och möjligen även grid-lock-situationer i simulerings-modellen, vilket man inte ser tecken på i mätdata.

6 Validering av Transmodeller för Södermalm

6.1 Simuleringsmodellen och nätverket

Vi har fått tillgång till den Södermalmsmodell som WSP på uppdrag av Trafikverket har tagit fram inom forskningsprojektet "Trafik i täta miljöer" genomfört av WSP och KTH (Berglund et al. 2016). Det mesta av diskussionen gällande modellen för City-området som fördes i avsnitt 5.1 gäller även för Södermalmsmodellen.

Figur 46 visar nätverket i Södermalmsmodellen. Nätverket omfattar samma område som användes i den empiriska analysen av MFD, se avsnitt 3.1. Transmodeller-efterfrågan är indelad i 53 zoner. Korsningar markerade med S i Figur 46 är signalreglerade. Det finns ungefär 70 signalreglerade korsningar i modellen och dessa har kodats med varierande detaljeringsgrad. Modellen har kalibrerats mot Google-restider och trafikflöden från slang-mätningar. Kalibreringen har gjorts av trafikanalytiker som inte deltagit i detta projekt.



Figur 52: Nätverksmodell för Södermalm i Transmodeller och område för beräkning av VKT och VHT (röd gräns)

6.2 Efterfrågan

Vi har haft tillgång till en OD-matris för förmiddagsrusningen (08:00-09:00). För att simuleringarna skulle ge en bild av hela MFD behöver man dock även simulera uppbyggnaden av köer innan rusning och avvecklingen av köer efter rusningstimmen. Därför har OD-matriserna utvidgats till perioden 07:00-10:00 genom att skala efterfrågan på motsvarande sätt som för City-området (Figur 47). Efterfrågan har varierats enligt trafikmätningar i korsningar på Södermalm, mest framträdande bland dem är Hornstull. Variationen ger en kvartsvis ökning av trafikefterfrågan upp till maxtimmen, där efterfrågan är densamma under hela timmen. Därefter övergår variationen till en kvartsvis minskning av efterfrågan.

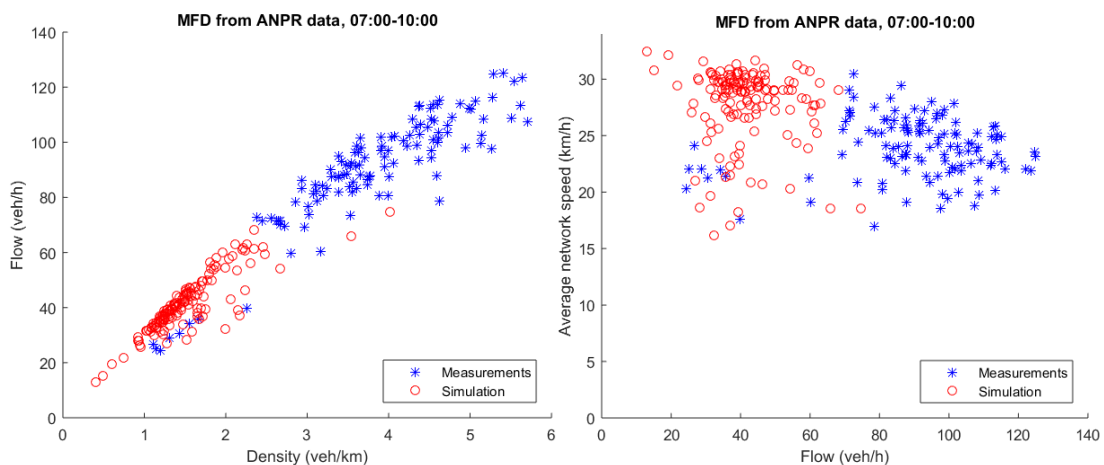
För att ett väldefinierat MFD ska finnas måste efterfrågan vara långsamt varierande. Hur olika variationer av efterfrågan påverkar resultaten för de båda modellområdena är inte undersökt. Ett förslag för framtida forskning är att undersöka effekten av att variera efterfrågan i en annan takt än vad som har skett för denna rapport.

6.3 Jämförelse av simuleringsresultat mot mätningar

Kameramätningar

För att jämföra simuleringsmodellen med empiriska data har virtuella kameramätningar satts upp i Transmodeler på samma mätplatser som i verkligheten. Data samlas i simuleringsmodellen in i 5-minuters-intervall, men aggregeras senare till 15-minuters-intervall för konsistens med de empiriska kameramätningarna.

Figur 53 visar resultat av validering av Transmodelers simuleringsresultat mot kameramätningar för morgonrusningen. Eftersom Transmodelers OD-matris representerar vardagsförhållanden används endast kameramätningar från vardagar i jämförelsen. Simuleringsresultaten visas med röda cirklar och slangmätningarna med blå stjärnor. Formen på MFD stämmer väl överens mellan simuleringsresultat och mätningar. Dock ligger simuleringsresultaten betydligt lägre när det gäller både densitet och flöde. Detta beror på att de empiriska kameradata innehåller betydligt fler observationer av fordon än de simulerade kameradata. En trolig förklaring till detta är att de empiriska data innehåller mycket brus och felaktiga observationer, trots att de har filtrerats innan de används här. Eftersom de simulerade data inte innehåller detta brus blir diskrepansen stor mellan det simulerade och det empiriska MFD. En slutsats som kan dras är att åtminstone i Stockholm är slangmätningar en mer tillförlitlig datakälla än ARS-systemet för estimering av MFD. Det kan dock vara värt att undersöka potentialen hos andra restidsmätningssystem som t.ex. Bluetooth.

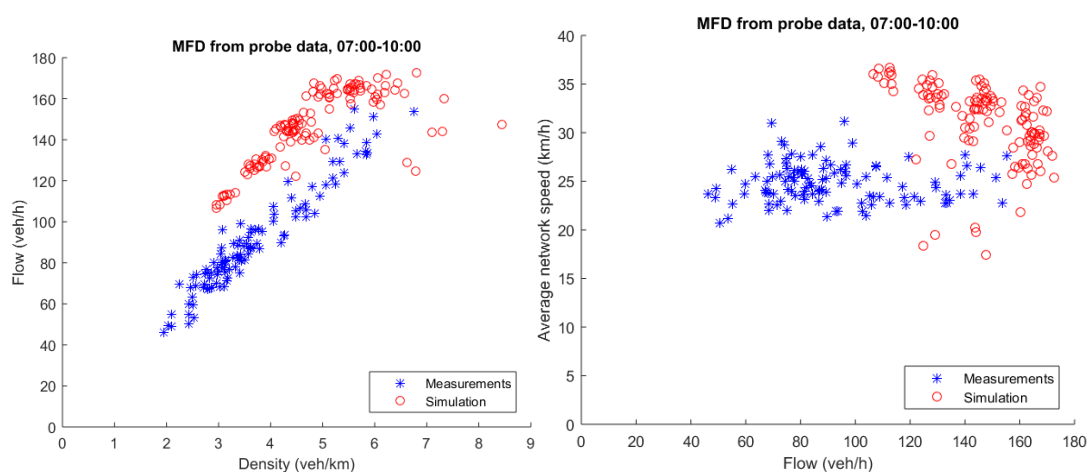


Figur 53: Jämförelse mellan simulerade och verkliga restidskameramätningar för Södermalm. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.

Taxidata

För att jämföra Transmodeller med empiriska data från floating-car-mätningar med taxibilar har totala antalet fordonskilometer (VKT) och fordonstimmar (VHT) beräknats för hela Södermalm-nätverket i Transmodeller. Dessa har sedan räknats om till flöde och densitet genom att dela med nätverkets totala längd. Simuleringsresultaten har sedan jämförts med empiriska taxidata för hela Södermalm-området, där taxidata har skalats upp för att representera den totala trafiken. Ursprungligen var idén att skala upp taxidata utifrån andelen taxibilar i förhållande till totala mängden bilar som registrerats på kamerarutternas. Denna metod leder dock till mycket låga skattade taxiandelar, vilket är ett annat tecken på att kameradata innehåller många felaktiga observationer. I brist på skattning av taxiandelar för Södermalm har därför taxiandelarna från City-området som visas i Figur 42 använts också för Södermalm. Det är troligt att andelen taxibilar varierar mellan olika områden i Stockholm, men vi kan inte säkert säga om detta ger en över- eller underskattning av andelen taxibilar för Södermalm.

Resultatet av valideringen visas i Figur 50. Eftersom Transmodellers OD-matris representerar vardagsförhållanden används endast taxidata från vardagar i jämförelsen.



Figur 54: Jämförelse mellan simuleringsdata och taxidata för hela Södermalm-området. Till vänster: flöde mot densitet. Till höger: hastighet mot flöde.

I likhet med City-området överskattar simuleringsresultaten flöde och hastighet vid låg densitet. Vid hög densitet uppvisar dock simuleringsmodellen påtaglig trängsel i nätverket, vilket inte återspeglas i de empiriska data. Det finns nästan tecken på hyperträngsel i simuleringsmodellen. Med tanke på de osäkra taxiandelarna är det dock svårt att dra vidare slutsatser utifrån skillnaden mellan det simulerade och det empiriska MFD.

7 Slutsatser

I denna rapport har vi visat att relativt väldefinierade empiriska MFD existerar för både Södermalm och City-området i Stockholm. Data från helg-mätningar passar in bra i MFD tillsammans med data från vardagar, vilket tyder på att MFD är stabilt under en stor variation av efterfrågan.

De empiriska MFD visar att hastigheten sjunker och trängseln ökar under morgonens och eftermiddagens rusningstimmar, men de visar inga tecken på hyperträngsel på områdesnivå, d.v.s. situationen då flödet i området börjar avta eftersom det överstiger kapaciteten. De stora genomfartslederna Sveavägen och Stadsgårdsleden skiljer dock ut sig från denna bild och uppvisar hyperträngsel under eftermiddagens respektive morgonens rusningstimmar. Detta tyder på att trängseln inte är jämt fördelad mellan de stora lederna och de mindre gatorna i området. Eftersom jämn fördelning av trängsel är en förutsättning för att ett väldefinierat MFD ska finnas, har MFD tagits fram för City-området utan Sveavägen och Södermalm utan Stadsgårdsleden.

Rapporten visar även att MFD har stor potential som verktyg för att validera simuleringsmodeller för storstad. MFD ger möjlighet att se hur väl simuleringsmodellens resultat stämmer överens med mätningar på områdesnivå, istället för endast lokalt på en länk eller en rutt. Den som kalibrerar modellen kan därmed få en uppfattning om trängselnivån i modellen generellt är på rätt nivå eller inte. Denna typ av valideringsverktyg blir viktigare ju större område som mikrosimuleras. Vid mikrosimulering av en eller ett fåtal korsningar kan mätningar av länkflöden och restider på rutt räcka långt. Däremot vid mikrosimulering av ett större område (t.ex. Stockholms innerstad tillsammans med motorvägarna runt innerstaden för vilket en mikrosimuleringsmodell just nu tas fram i Transmodeller) kan MFD vara ett viktigt verktyg för att validera att trängseln i modellen ligger på rätt nivå generellt och inte bara lokalt i vissa punkter. Eftersom MFD är en egenskap hos utbudssidan av transportsystemet så kan validering med hjälp av MFD göra det lättare att skilja mellan utbudssidan och efterfrågesidan i simuleringsmodellen. En ytterligare lärdom från utvärderingen är att det är viktigt att de empiriska data så långt som möjligt matchar de data som tas ut från simuleringsmodellen, för att eventuella skillnader mellan det empiriska och simulerade MFD ska kunna tillskrivas simuleringsmodellens bristande förmåga att återskapa verkligheten.

7.1 Framtida arbete

Framtida arbete som identifierats efter att detta projekt genomförts är att jämföra MFD från simuleringsmodell med mätningar från fler nätverk än City- och Södermalmområdena. Även MFD från andra simuleringsmodeller än Transmodeller vore intressant att jämföra, för att se om olika simuleringsmodeller skiljer sig åt på något specifikt sätt. För att kunna dra säkrare slutsatser om orsakerna för skillnaden mellan empiriska och simulerade MFD behöver effekten av vissa antaganden studeras närmare, bland annat användandet av data från taxibilar (som kan tänkas skilja sig från genomsnittliga fordon när det gäller att undvika trängsel) och skalningen av

simuleringsmodellens OD-matris i uppbyggnaden och avvecklingen av maxtimmen.

Ett arbete behöver också göras med att testa och fundera kring hur simuleringsmodellen kan justeras givet att simuleringsresultaten divergerar från empiriskt MFD. Hur ska man veta vad man bör ändra i simuleringsmodellen för att få bättre överensstämmelse med MFD?

Referenser

- ÅF, and Movea. 2016. 'Erfarenheter Av Transmodeller - Pilotstudie, Ny Trafikmodell För Stockholm.'
http://www.trafikverket.se/contentassets/d7cf7d727fb2488aab9fa9d24387c7c8/externa-rapporter/2016/forstudie_erfarenheter_av_transmodeller_movea_o_af_rad_148.pdf.
- Ardekani, S., and R. Herman. 1987. 'Urban Network-Wide Traffic Variables and Their Relations'. *Transportation Science* 21 (1): 1–16.
- Berglund, S., Larek, P., and Franklin, J. 2016. 'Trafik i täta miljöer: Slutrapport'. Trafikverket,
http://www.trafikverket.se/contentassets/773857bcf506430a880a79f76195a080/forskningsresultat/wsp_trafik_i_tata_miljoer.pdf.
- Buisson, Christine, and Cyril Ladier. 2009. 'Exploring the Impact of Homogeneity of Traffic Measurements on the Existence of Macroscopic Fundamental Diagrams'. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2124 (1): 127–136.
- Cassidy, M.J., K. Jang, and C.F. Daganzo. 2011. 'Macroscopic Fundamental Diagrams for Freeway Networks'. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2260 (1): 8–15.
- Courbon, T., and L. Leclercq. 2011. 'Cross-Comparison of Macroscopic Fundamental Diagram Estimation Methods'. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 20: 417–426.
- Daganzo, C.F. 2007. 'Urban Gridlock: Macroscopic Modeling and Mitigation Approaches'. *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (1): 49–62.
- Daganzo, C.F., V.V. Gayah, and E.J. Gonzales. 2011. 'Macroscopic Relations of Urban Traffic Variables: Bifurcations, Multivaluedness and Instability'. *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (1): 278–288.
- Daganzo, C.F., and N. Geroliminis. 2008. 'An Analytical Approximation for the Macroscopic Fundamental Diagram of Urban Traffic'. *Transportation Research Part B: Methodological* 42 (9): 771–781.
- Edie, L.C. 1963. 'Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions'. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 139–54. Paris, France: OECD.
- Fosgerau, Mogens. 2015. 'Congestion in the Bathtub'. <http://mpira.ub.uni-muenchen.de/63029/>.
- Gayah, V.V., and C.F. Daganzo. 2011. 'Clockwise Hysteresis Loops in the Macroscopic Fundamental Diagram: An Effect of Network Instability'. *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (4): 643–655.
- Gayah, V.V., X.S. Gao, and A.S. Nagle. 2014. 'On the Impacts of Locally Adaptive Signal Control on Urban Network Stability and the Macroscopic Fundamental Diagram'. *Transportation Research Part B: Methodological* 70: 255–268.
- Geroliminis, N., and C.F. Daganzo. 2007. 'Macroscopic Modeling of Traffic in Cities'. In *TRB 86th Annual Meeting*.
http://moodle.epfl.ch/file.php/7471/2011_/Macroscopic_FD.pdf.

- . 2008. 'Existence of Urban-Scale Macroscopic Fundamental Diagrams: Some Experimental Findings'. *Transportation Research Part B: Methodological* 42 (9): 759–770.
- Geroliminis, N., J. Haddad, and M. Ramezani. 2013. 'Optimal Perimeter Control for Two Urban Regions with Macroscopic Fundamental Diagrams: A Model Predictive Approach'. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions On* 14 (1): 348–359.
- Geroliminis, N., A. Srivastava, and P. Michalopoulos. 2011. 'A Dynamic-Zone-Based Coordinated Ramp-Metering Algorithm with Queue Constraints for Minnesota's Freeways'. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions On* 12 (4): 1576–1586.
- Geroliminis, N., and J. Sun. 2011a. 'Hysteresis Phenomena of a Macroscopic Fundamental Diagram in Freeway Networks'. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45 (9): 966–979.
- . 2011b. 'Properties of a Well-Defined Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Traffic'. *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (3): 605–617.
- Godfrey, J. W. 1969. 'The Mechanism of a Road Network'. *Traffic Engineering & Control* 11 (7): 323–27.
- Horiguchi, R., M. Iijima, and H. Hanabusa. 2010. 'Traffic Information Provision Suitable for TV Broadcasting Based on Macroscopic Fundamental Diagram from Floating Car Data'. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference On*, 700–705. IEEE. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5625057.
- Ji, Y., W. Daamen, S. Hoogendoorn, S. Hoogendoorn-Lanser, and Xiaoyu Qian. 2010. 'Investigating the Shape of the Macroscopic Fundamental Diagram Using Simulation Data'. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2161 (1): 40–48.
- Kazagli, Evanthia, and Haris Koutsopoulos. 2013. 'Estimation of Arterial Travel Time from Automatic Number Plate Recognition Data'. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2391: 22–31.
- Keyvan-Ekbatani, M., A. Kouvelas, I. Papamichail, and M. Papageorgiou. 2012. 'Exploiting the Fundamental Diagram of Urban Networks for Feedback-Based Gating'. *Transportation Research Part B: Methodological* 46 (10): 1393–1403.
- Keyvan-Ekbatani, M., M. Papageorgiou, and I. Papamichail. 2013. 'Urban Congestion Gating Control Based on Reduced Operational Network Fundamental Diagrams'. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 33: 74–87.
- Knoop, V. L., S. P. Hoogendoorn, and J. WC Van Lint. 2012. 'Routing Strategies Based on Macroscopic Fundamental Diagram'. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2315 (1): 1–10.
- Leclercq, L., N. Chiabaut, and B. Trinquier. 2014. 'Macroscopic Fundamental Diagrams: A Cross-Comparison of Estimation Methods'. *Transportation Research Part B: Methodological* 62: 1–12.
- Leclercq, Ludovic, and Nikolas Geroliminis. 2013. 'Estimating MFDs in Simple Networks with Route Choice'. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 80: 99–118.

- Mazloumian, A., N. Geroliminis, and D. Helbing. 2010. 'The Spatial Variability of Vehicle Densities as Determinant of Urban Network Capacity'. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368 (1928): 4627–4647.
- Ramezani, M., J. Haddad, and N. Geroliminis. 2015. 'Dynamics of Heterogeneity in Urban Networks: Aggregated Traffic Modeling and Hierarchical Control'. *Transportation Research Part B: Methodological* 74: 1–19.
- Saberi, M., H.S. Mahmassani, T. Hou, and A. Zockaie. 2014. 'Estimating Network Fundamental Diagram Using Three-Dimensional Vehicle Trajectories'. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2422 (1): 12–20.
- Tu, H., H. Li, Y. Wang, and L. Sun. 2014. 'When to Control the Ramps on Freeway Corridors? A Novel Stability-and-MFD-Based Approach'. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6818424.
- Vickrey, W. 1969. 'Congestion Theory and Transport Investment'. *The American Economic Review* 59 (2): 251–260.
- Xiong, C., X. Chen, X. He, X. Lin, and L. Zhang. 2015. 'Agent-Based En-Route Diversion: Dynamic Behavioral Responses and Network Performance Represented by Macroscopic Fundamental Diagrams'. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X15001497>.
- Zhang, L., T.M. Garoni, and J. de Gier. 2013. 'A Comparative Study of Macroscopic Fundamental Diagrams of Arterial Road Networks Governed by Adaptive Traffic Signal Systems'. *Transportation Research Part B: Methodological* 49: 1–23.
- Zheng, N., R. A. Waraich, K. W. Axhausen, and N. Geroliminis. 2012. 'A Dynamic Cordon Pricing Scheme Combining the Macroscopic Fundamental Diagram and an Agent-Based Traffic Model'. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (8): 1291–1303.

Centrum för transportstudier är ett forskningscentrum vid KTH – ett samarbete mellan KTH, VTI, WSP Analys & Strategi, Internationella Handelshögskolan i Jönköping, Trafikanalys, Trafikverket, Vectura och VINNOVA. Forskningsfältet omfattar bland annat samhällsekonomisk analys, hållbara transportsystem, prognosmodeller, trafiksimulering, transportsystemets finansiering och organisation, samspelet mellan transportsystem och regional ekonomi samt trafikanters beteenden och värderingar. Centret är en tioårig satsning med en total finansiering från parterna på uppåt 250 miljoner kr, oräknat tillkommande externa uppdrag. Verksamheten sysselsätter motsvarande minst 20 heltidstjänster, oräknat de många forskare vid de olika parterna som har sin finansiering på annat sätt, och har en gemensam lokalisering på KTH:s campus.

The Centre for Transport Studies is a new research centre at KTH – a cooperation between KTH, VTI, WSP Analysis & Strategy, Jönköping International Business School, Transport Analysis, Transport Administration, Vectura and VINNOVA. The research area includes cost-benefit analysis, sustainable transport systems, transport modelling, simulation, financing and organisation, interactions between the transport system and the regional economy, and travellers' behaviour and valuations. The Centre is a ten-year project comprising almost 250 million SEK, not counting additional research grants. The centre employs around 20 full-time equivalents, in addition to the researchers at the partners funded in other ways, and has a joint location at KTH campus.

Centre for Transport Studies
SE-100 44 Stockholm
Sweden
www.cts.kth.se