

Effekter av självstyrande bilar

Kapacitetsanalys



Demo av fordonskolonn (Thorpe et al, 1998)

V1.0
2015-02-20

movea

Gunnar Lind, Per Strömgren och Fredrik Davidsson

Innehåll

1	BAKGRUND.....	1
2	STEG MOT ÖKAD KAPACITET.....	1
3	PACKNING, LOSSNING OCH PASSERING AV KOLONNKÖRANDE FORDON	3
3.1	Strömlinjeformad trafik.....	3
3.2	Packning och lossning av kolonner.....	11
3.3	Passering av kolonner.....	14
4	VÄVNING OCH VÄXLING VID TRAFIKPLATSER	15
5	STADSTRAFIK	20
5.1	Blandtrafik med cyklister och fotgängare i korsning	20
5.2	Tung trafik.....	26
6	SCENARIOSTUDIER.....	28
6.1	Förutsättningar och antaganden	28
6.2	Anpassning av modeller.....	29
6.2.1	Vävning och växling	29
6.2.2	Påfarter vid trafikplatser	29
6.2.3	Växlingssträckor.....	30
6.3	Självstyrande fordon i motorvägsmiljö.....	32
6.3.1	Området.....	33
6.3.2	Jämförelsealternativ (JA)	33
6.3.3	Utredningsalternativ (UA).....	34
6.3.4	Resultat av simuleringarna.....	35
6.4	Självstyrande fordon i innerstadsmiljö.....	36
6.4.1	Området.....	36
6.4.2	Jämförelsealternativ (JA)	37
6.4.3	Utredningsalternativ (UA).....	37
6.4.4	Resultat av simuleringarna.....	38
7	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	39
	REFERENSER	42

1 Bakgrund

På många håll i världen pågår f.n. forskning och demonstration av koncept för självstyrande bilar. Förväntningar är stora att detta starkt ska bidra till ökad säkerhet, mindre emissioner och ökad kapacitet i vägnätet. I projektet Drive Me planerar Volvo att testa självstyrande bilar i samarbete med bl.a. Trafikverket. En central fråga när det gäller självstyrande bilar är i vilken utsträckning möjliga kapacitetsförbättringar kan bidra till att lösa förväntade framtida kapacitetsproblem på det svenska vägnätet.

Den genomförda förstudien har identifierat förväntningar när det gäller effekter och införandetakt samt pekat på några huvudproblem som kan bli begränsande för framtida kapacitetsvinster:

- packning och lossning av kolonnkörande fordon i hög fart och med liten tidlucka
- vävning och växling vid trafikplatser (i blandad trafik?)
- stadstrafik med cyklister och fotgängare i korsning

Med ledning av förstudien önskar myndigheten Trafikanalys att den fortsatta analysen i ett första steg inriktas på att skissa på ett trafiksystem i framtiden där alla bilar är självstyrande. Frågor som därvid ska belysas är hur stor kapacitetsökningen kan bli på motorvägar på landsbygden och om denna kapacitetsökning kan tillgodogöras i stadstrafiken, där fortsatta begränsningar av kapaciteten väntas råda bl.a. med hänsyn till markanvändningen.

Med utgångspunkt från förstudien väljs trafikmiljöer ut, där det kan finnas starkt intresse att öka kapaciteten. Vi tänker oss i första hand en infartsmotorväg och en innerstadsmiljö i Stockholmsregionen. För dessa miljöer simuleras kapacitetsförbättringar utifrån förutsättningen att alla fordon är självstyrande.

Av förstudien framgår att kapacitetsökningar främst kan härledas från kortare tidsluckor, effektivare vävning, mindre inaktiv tid i trafiksignaler samt en ökad andel kolonnkörande bilar. Konsekvensen av förväntade förändringar belyses genom simuleringar och kapacitetsberäkningar. Dessutom diskuteras hur kapacitetsvinsterna i landsbygdsmiljö kan tillgodogöras i stadsmiljö och vice versa.

Följande arbetsmetodik har tillämpats i huvudstudien:

1. Fördjupad litteraturstudie avseende huvudproblemen
2. Metodik vid hantering av kolonner och trafikplatser i motorvägsmiljö
3. Metodik vid hantering av gator och korsningar med fotgängare och cyklister
4. Kapacitetsberäkningar och trafikanalys
5. Analys av överförbarheten av kapacitetsvinster mellan landsbygd och tätort

2 Steg mot ökad kapacitet

Kapaciteten på en motorväg brukar anges till omkring 2000 fordon/h/körfält. Utgår man från ett genomsnittligt tidsavstånd på 1,5 sek får man kapaciteten 2400 fordon/h. Detta innebär en mer aggressiv körstil än den s.k. tresekundersregeln som brukar anges i Sverige eller tumregeln om 1,8 sek som anges i Tyskland för säker körning. Kortare tidsavstånd än 1,5 sek är t.o.m. olagligt i flera länder.

För att öka kapaciteten måste vi acceptera kortare tidsavstånd och känna trygghet inför detta. På vägen dit måste flera steg tas. I Holland och USA anses 0,8-0,9 sek minsta tidslucka (mellan främre bilens akter och följande bils front) spegla beteendet hos trafikanterna i tät motorvägstrafik. Minderhoud (1999) menar att det är nödvändigt med inställningar hos självstyrande fordon under 1,0 sek för att inte kapaciteten i vägnätet ska minska.

Halvautomatiska fordon med ACC

För närvarande pågår en utveckling där fler och fler bilmodeller utrustas med ACC, aktiv farthållare. Den bygger på sensorer som beräknar avstånd till framförvarande bil, reglerar hastigheten och gör inbromsningar om avståndet blir för kort. Moderna bilar med aktiv farthållare är oftast programmerade med tidsavstånd på 1,0-2,5 sek, vilket inte självklart leder till ökad kapacitet, men kan harmonisera flödet och därmed minska risken för kapacitetssammanbrott. Föraren anger själv den önskade hastighetsnivån.

Automatiska fordon med ACC

Nästa steg i utvecklingen innebär fordon med aktiv farthållare som också är självstyrande. Till en början kan man vänta sig att säkerhetsfrågorna står i förgrunden, varför bilarna kommer att följa hastighetsgränsen och inte tillåta kortare tidsavstånd. Det finns därför en uppenbar risk att de första automatiska bilarna leder till smärre kapacitetsförluster.

Samverkande fordon med CACC

Kommunikationsmöjligheter ökar sannolikheten för att kortare tidsavstånd ska tillåtas. Det är ju först när bilarna packas tätare än 1,0-1,5 sek som några kapacitetsvinster kommer att erhållas. Med lågnivåkommunikation skickas varningar mellan bilarna för att undvika kollisioner vid häftiga inbromsningar. Med högnivåkommunikation styrs samverkan mellan bilarna genom sensorer och korthållskommunikation. Bilarna skickar uppgifter om hastighet, acceleration, inbromsning, körfältshållning m.m. till angränsande bilar. Detta gör olika manövrar säkrare och tidsavstånd på 0,5-1,0 sek mellan bilarna kan komma att tolereras.

Fordonskolonner

Det stora språnget utgörs av övergången till fordonskolonner. Här tänker man sig 2-10 fordon som styrs i grupp med 0,1-0,5 sek tidslucka inom gruppen och 2-3 sek tidslucka till nästa grupp. Genom högnivåkommunikation styrs samverkan inom gruppen. Uppdatering sker varje 20:e mikrosekund (0,02 sek). Om många sådana grupper med korta tidsluckor bildas ökar kapaciteten kraftigt.

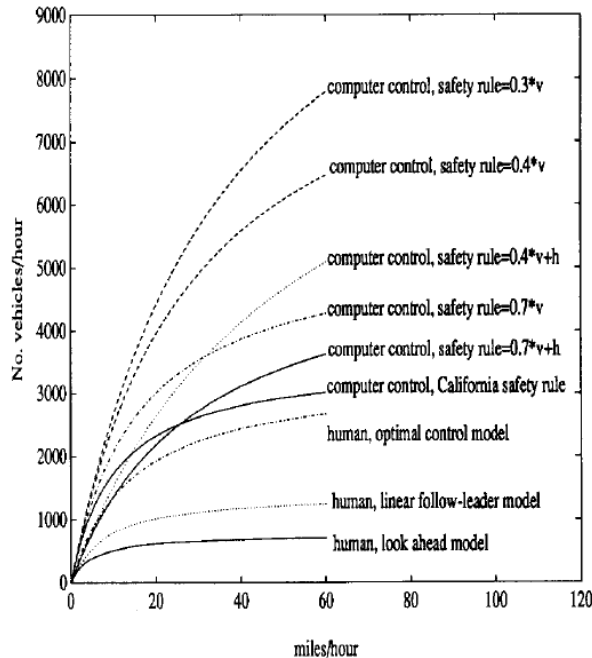
Fordonskolonner i samverkan med infrastrukturen

Fordonskolonnerna utvecklas till en början för strömlinjeformad motorvägstrafik. Det innebär att det återstår att hantera hinder som kraftigt kan begränsa den möjliga kapacitetsökningen. Det gäller packning, lossning och passering av kolonnkörande fordon, styrning av vävning och växling vid trafikplatser samt möjliggörande av kapacitetstillskott även i stadstrafik med cyklister och fotgängare. Detta förutsätter mer avancerad styrning, som föreslås ske genom centraliserade, hierarkiska eller decentraliserade lösningar med styrapparater på flera nivåer i trafiksystemet.

3 Packning, lossning och passering av kolonnkörande fordon

3.1 Strömlinjeformad trafik

Ioannou och Chien visade tidigt (1993) genom teoretiska studier att automatiskt styrda fordon, där förarens reaktionstid elimineras, har potential att både öka säkerheten och trafikflödet i linjär trafik utan passerande fordon eller på- och avfarter. Olika modeller för automatiska fordon med aktiv farthållare (AICC) jämfördes med körmodeller för mänskliga förare. Alla bilar är personbilar som är 4 till 4,5 m långa.



Figur 3.1 Linjär motorvägstrafik vid jämn hastighet utan störningar

Den djärvaste modellen i Figur 3.1 innebär vid 60 miles/h (96 km/h, 27 m/s) ett avstånd på 9 meter eller 0,3 sek tidslucka.

California PATH demonstrerade redan 1997 kolonnkörning med åtta bilar i San Diego. Bilarna körde med ett fast avstånd (6,5 meter) vid alla hastigheter upp till 65 mph (105 km/h). Detta motsvarar 0,2 sek tidslucka. Kolonnerna separerades med ett avstånd på 60 meter. Vid demonstrationen visades också hur ett fordon kunde bryta sig ur kolonnen och ansluta till kolonnen bakifrån.



Figur 3.2 Demonstration av kolonnkörning vid Demo '97 i San Diego

Thorpe et al (1998) jämför demonstrationen av kolonnkörning i Kalifornien med den parallella demonstrationen av individuella självstyrande bilar i Pennsylvania. Vid den senare demonstrationen kunde fordonen kommunicera med varandra och med hjälp av sensorer upptäcka omkringliggande fordon samt andra hinder på körbanan. Vid tät trafik eftersträvas en bekväm tidslucka på 1,5 sek.

Thorpe menar att demonstrationerna har olika mål, som delvis kan förklaras av geografiska skillnader. I San Francisco-området är trängsel ett mycket stort problem och de flesta motorvägar har tre körfält i varje riktning. Det är då viktigt att öka kapaciteten och att dela av ett körfält för detta är realistiskt. Längden väg som behöver utrustas med kompletterande utrustning t.ex. magneter i vägbanan blir då liten. I Pennsylvania är bara en liten del av vägnätet överbelastat och det finns få trefältiga motorvägar. Detta leder till en lösning där främst säkerheten kan öka genom individuellt styrda automatiska fordon.

Michael et al (1998) gjorde redan i slutet av 90-talet en grundläggande teoretisk studie, som visar vad som maximalt är möjligt med kolonnkörande fordon. Denna studie finansierades också av California PATH. Många senare studier och bedömningar utgår från denna som referens. Referensfallet utgörs av en motorväg utan på- och avfarter. Verklighet är lägre beroende på körfältsbyten, hänsyn till på- och avfarter, variationer i efterfrågan m.m.

Individuella automatiska fordon antas kunna stanna utan kollision vid maximal bromsning av framförvarande fordon. Fordon i kolonn tillåts kollidera, men genom låg relativ hastighet inom kolonnen blir skadeföljden mycket låg. Risken för kollisioner är dessutom mycket lägre i dessa kolonner än i dagens trafik. Kolonnerna antas grupperade i upp till 20 fordon med en lucka på 1-4 meter. Avståndet mellan individuella automatiska personbilar antas vara 58 m och mellan kolonner bestående av enbart personbilar 86 m.

Förutom information från sensorer antas fordonen i kolonnen ha information om retardationen hos framförvarande fordon samt för kolonnledaren. Rörelser i kolonnen förstärks ju längre bak i kolonnen ett fordon ligger. Man behöver också ta hänsyn till variationer i bromsförmågan inom kolonnen. Som senare framgår har variationen i bromsförmåga och kunskapen om omgivande fordons bromsförmåga avgörande betydelse för vilken kapacitet som kan uppnås. Personbilar antas ha en normalfördelad

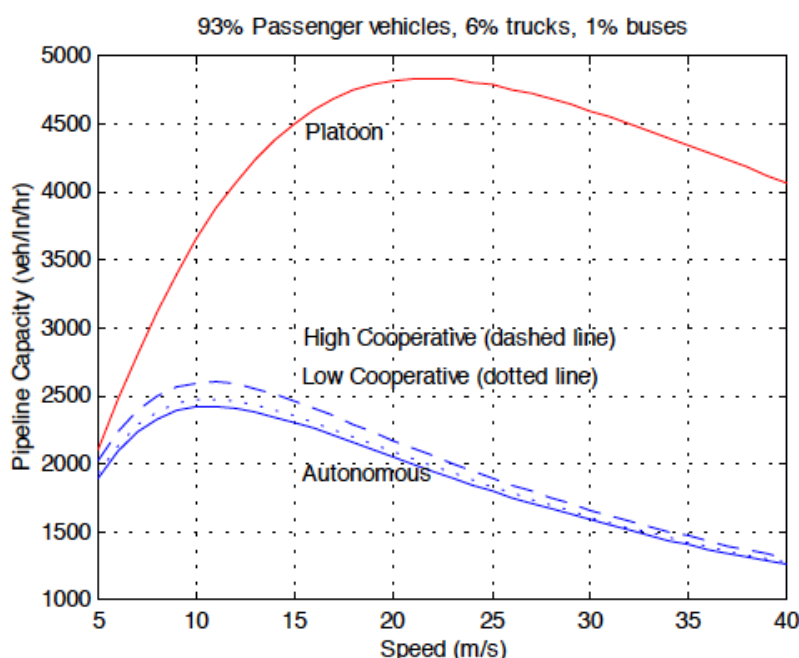
bromsförmåga som varierar mellan 0,46 och 0,98 g. Bromsförmågan hos bussar och lastbilar är omkring hälften så stor. Avståndet mellan personbilarna i kolonnen antas vara 2 m eller 0,07 sek vid 30 m/s (108 km/h). För lastbilar och bussar antas 8 m.

En känslighetsanalys har gjorts för olika faktorer som påverkar kapaciteten. De hela har gjorts realistiskt för amerikanska förhållanden genom att anta en fordonsmix bestående av 93% personbilar, 6% lastbilar och 1% bussar.

Blandningen mellan individuella fordon och kolonnkörning avgör kapaciteten. För individuella fordon har man laborerat med två samverkansnivåer. Svagt samverkande kommunikerar med andra fordon sent vid inbromsningar, medan starkt samverkande samverkar tidigt. I det första fallet sänds varning först när retardationen når en viss nivå, i det andra fallet redan när nödbromsning aktiveras. Detta påverkar antaganden om fördröjning i samband med kommunikation resp. aktivering.

Kapaciteten på en motorväg brukar med dagens manuellt styrda fordon anges till omkring 2000 fordon per körfält. Om andelen lastbilar och bussar ökar så minskar kapaciteten. Variationer på efterfrågan har också betydelse. Värden som anges är ofta uppräkningsvärden från 5-minutersperioder (eller ibland ännu kortare). Genomströmningen under en timme är omkring 15% lägre än dessa värden. Kapaciteten begränsas dessutom av att av- och påfarter har lägre kapacitet och leder till att en flaskhals bildas.

Bilden nedan visar därför den idealt högsta kapaciteten som kan nås utan hänsyn till dessa faktorer.



Figur 3.3 Kapacitet som funktion av hastighet för en typisk fordonssammansättning i tätort.

Maxkapaciteten kan med individuella fordon uppgå till ca 2500 fordon/h. Kolonnkörning ökar denna siffra dramatiskt. Som mest kan kapaciteten fördubblas. Förutsättningen är då att alla fordon kör i kolonn, vilket är orealistiskt utom i separata körfält.

Flera optimistiska tidningsartiklar pekar på att kapaciteten skulle kunna femfaldigas med automatiska fordon. Bilden nedan visar ett sådant scenario. Förutsättningarna är att:

- alla bilar kör i kolonn

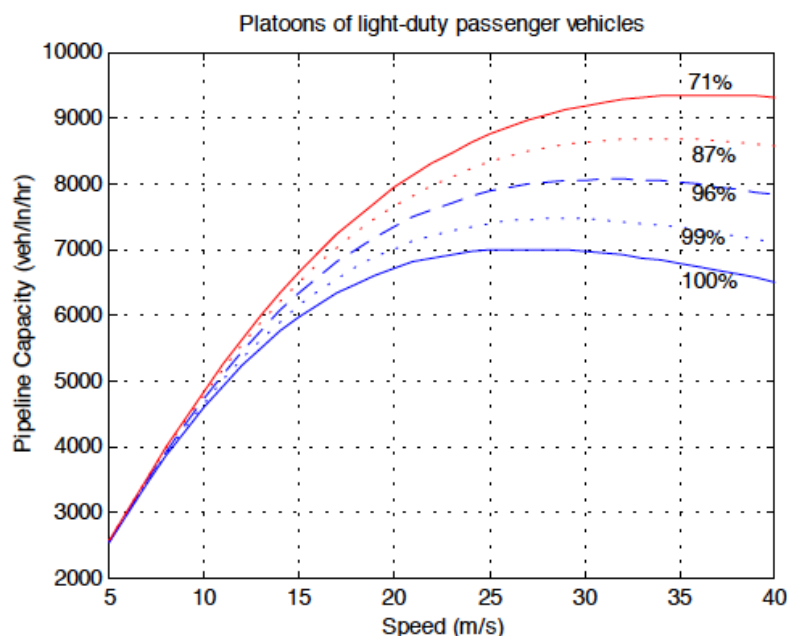
- bara personbilar tillåts
- lastbilar och bussar är uteslutna
- bilar med en bromsförmåga under 0,65 g utesluts

Tabellen nedan visar antaget samband mellan bromsförmåga och andel av personbilar.

Tabell 3.1 Procentuell andel personbilar över gräns för bromsförmåga

<i>Percentage of vehicle braking distribution, permitted by check-in, as measured from the right tail to the left</i>	<i>Lowest braking rate (g), light-duty passenger vehicle</i>	<i>Highest braking rate (g), light-duty passenger vehicle</i>
71	0.65	0.98
87	0.60	0.98
96	0.55	0.98
99	0.50	0.98
100	0.46	0.98

Dessa förutsättningar skulle kunna uppnås för exklusiva körfält för kolonnkörande personbilar på en motorväg. Maxkapaciteten 9500 fordon/h uppnås vid en hastighet av omkring 130 km/h. Ingen hänsyn tas till variationer i efterfrågan, bildning och upplösning av kolonner eller effekter av körfältsbyten och begränsningar vid på- och avfarter.



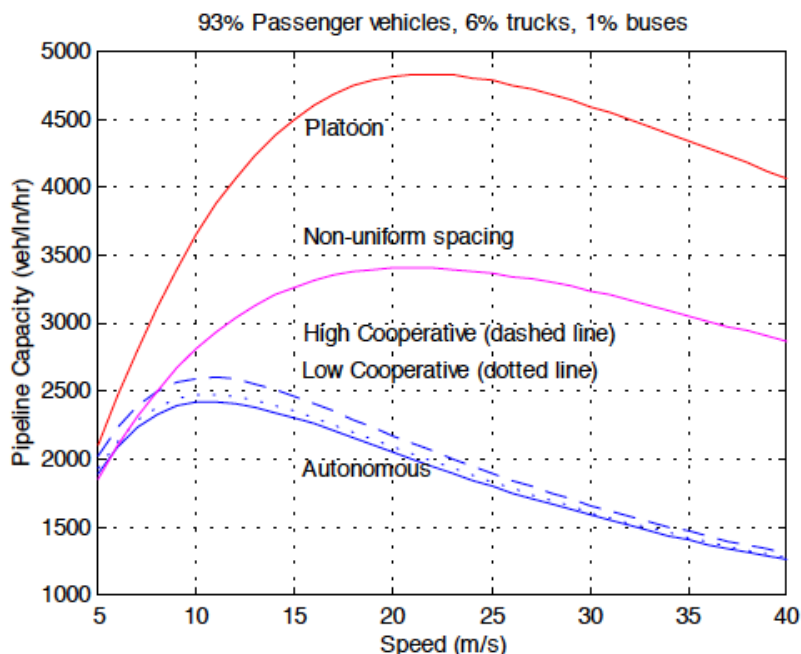
Figur 3.4 Känslighet av kapacitet för ett körfält mht andel tillåtna personbilstyper

Figur 3.4 visar kapaciteten för enbart personbilar med en given minsta bromsförmåga. En kolonn, som enbart består av personbilar har enligt figuren en maxkapacitet på 7000 fordon/h. Tillåts bara personbilar med bromsförmåga över 0,64 g blir istället kapaciteten ca 9500 fordon/h, men då utesluts ca 30% av den nuvarande fordonsparken.

Vid kolonnkörning har enligt ovan skillnader i bromsförmåga stor betydelse. Andelen lastbilar är därför avgörande. Om lastbilsandelen uppgår till 20%, vilket kan inträffa på europavägarna, har kapaciteten halverats.

Antalet personbilar i en kolonn antas vara 10 bilar. Med bara 3-4 fordon per kolonn minskar kapaciteten till hälften. På samma sätt innebär ett avstånd mellan fordonen på 15 meter (0,5 sek) en halvering av kapaciteten vid 110 km/h.

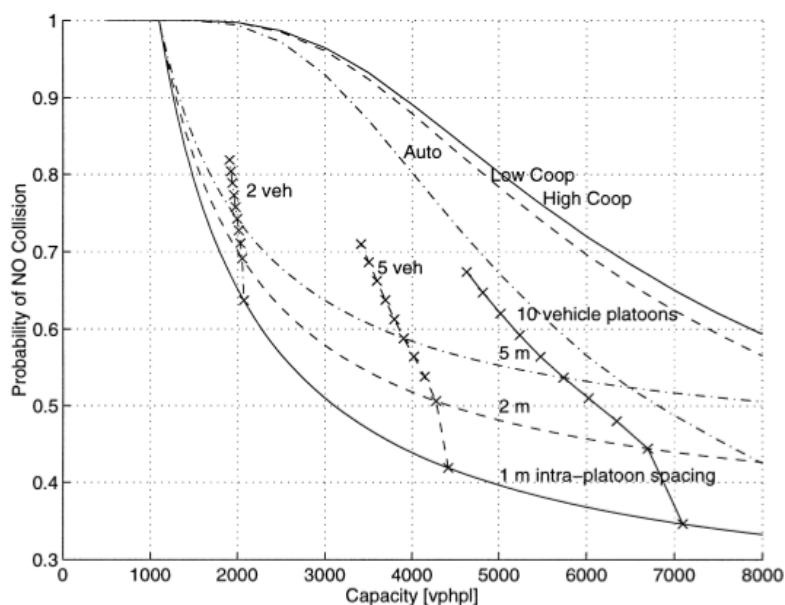
Med realistisk fordonssammansättning är maxkapaciteten ca 2500 f/h för individuella fordon och 4500 f/h vid kolonnkörning. Ökad kapacitet för individuellt styrda automatiska fordon skulle kunna åstadkommas om bromsförmågan för det egna fordonet och det framförvarande var känt. Det ger individuellt anpassade (non-uniform) avstånd mellan fordon. Bilden nedan visar att man då skulle kunna hamna på en kapacitet någonstans mellan individuellt styrda fordon och kolonnkörning.



Figur 3.5 Kapacitet hos ett körfält som funktion av hastighet vid typisk fordonssammansättning i tätort

Carbaugh et al (1998) kompletterar Michels studier genom att också undersöka olycksrisken. Man tänker sig kolonner på 2-10 fordon med 2-10 meters avstånd inom kolonnerna och 30-60 meter till nästa kolonn.

Ju fler fordon kolonnerna innehåller, desto högre blir kapaciteten. Om avståndet mellan fordonen i kolonnen ökar, så minskar sannolikheten för olyckor. Men nackdelen är att olyckorna istället sker i högre relativa hastigheter och då sannolikt leder till allvarigare olyckor. Det krävs alltså en avvägning mellan kapacitet och säkerhet när fordonskolonnerna vidareutvecklas. Det komplicerade sambandet redovisas i Figur 3.6.



Figur 3.6 Samband mellan säkerhet och kapacitet för olika separeringsstrategier

Vid kapaciteter under 1200 f/h undviks kollisioner helt. När kapaciteten ökar med oförändrat avstånd mellan fordonen i kolonnen innebär det att fler fordon kopplas till kolonnen. Dessa kan inte helt undvika kollisioner. Samma sannolikhet för kollision erhålls t.ex. för två fordon med en meters avstånd, fem fordon med 7 m avstånd och 10 fordon med 9 m avstånd. Kapaciteten är nära dubbelt så stor med fem fordon och ytterligare 25% högre med tio fordon.

Van Arem et al (1997) har gjort simuleringar för att utröna effekten av ett separat körfält för intelligenta fordon på kapaciteten vid flaskhalsar. Vid simuleringarna skapas en flaskhals genom att fyra körfält övergår till tre, vilket i sin tur leder till chockvågor i trafikströmmen. Fordonen i det separata körfält antas ha 0,7 eller 1,0 sek tidslucka.

Resultatet med 50% intelligenta fordon med aktiv farthållare att blir att vävningen blir smidigare. Antalet chockvågor och omfattningen av dessa minskar. Genomströmningen totalt över all körfält ökar med 3% utan ett separat körfält och med 8% med separat körfält. Med den korta tidsluckan på 0,7 sek ökar antalet misslyckade vävningar, vilket visar att detta är ett av huvudproblemen.

Minderhoud (1999) har analyserat hur samverkande system påverkar motorvägs-kapaciteten. Det handlar då främst om att minska reaktionstiden, som beräknas ligga kring 1,5 sek för mänskliga förare. Minderhoud kommer fram till att detta kan öka kapaciteten med ca 12%.

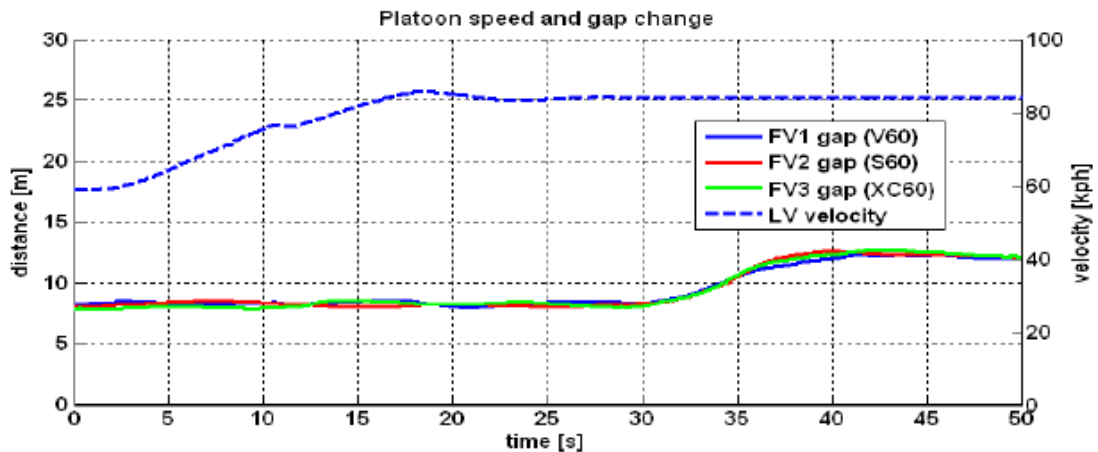
Le Maistre (2004) kompletterar Minderhoud genom att speciellt undersöka effekterna av samverkan vid körfältsbyten och omkörningar. Le Maistre utgår från att det agentstyrda systemet kommunicerar önskan om körfältsbyte till omgivande fordon i alla körfält, som då gör erforderliga justeringar av hastigheten för att underlätta körfältsbytet. Resultatet indikerar att systemet ökar fordonshastigheten med 1% och att kapaciteten ökar med 2%.

Störst betydelse har systemet i måttlig till tät trafik, då omkörningssituationerna ökat, men köer ännu ej har uppkommit. Systemet påverkar särskilt kolonnbildningen som mäts genom variansen av antalet på fordon per motorvägssektion. Denna minskar med uppåt 20% med det samverkande systemet, som gör att fordon inte i samma utsträckning som tidigare blir blockerade av långsammare fordon.

Le Maistre simulerar trafik med 97% personbilar och 3% lastbilar samt med 0%, 25%, 50%, 75% och 100% agentstyrda bilar. När det gäller säkerheten så visar resultaten att olycksrisken är störst när andelen självstyrande bilar är 50% och andelen mänskliga förare 50%.

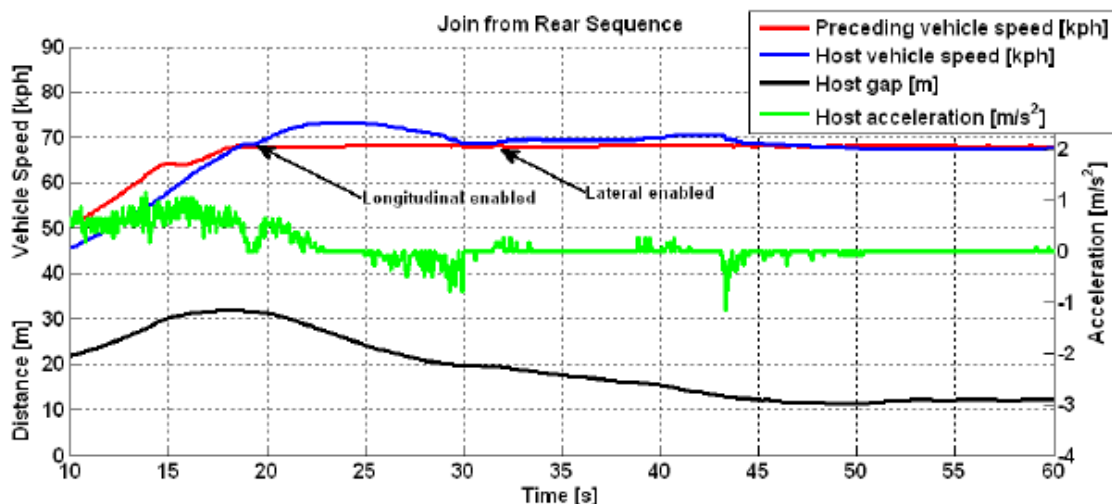
Chan et al. (2012) visar den mera näraliggande utvecklingen i det europeiska projektet SARTRE. Här består kolonnen av en manuell förare av det ledande fordonet medan alla följare består av automatiska fordon. Demonstrationssystemet bestod av upp till fem fordon, både personbilar och lastbilar och med olika prestanda. Demonstrationen användes för att undersöka funktionen vid hastighets- och avståndsförändringar i kolonnen samt bildning och upplösning av kolonner. Avståndet mellan fordonen i kolonnen är 7 meter, dvs. i samma storleksordning som för Demo '97 (Figur 3.2). I samband med manöverförändringar ökar avståndet ända upp till 20 meter för att minimera risken.

Bilden nedan visar vad som händer vid en hastighetsökning från 60 km/h till drygt 80 km/h. Avståndet ökar då från 7 till 12 meter, vilket innebär en tidlucka på drygt 0,5 sek.



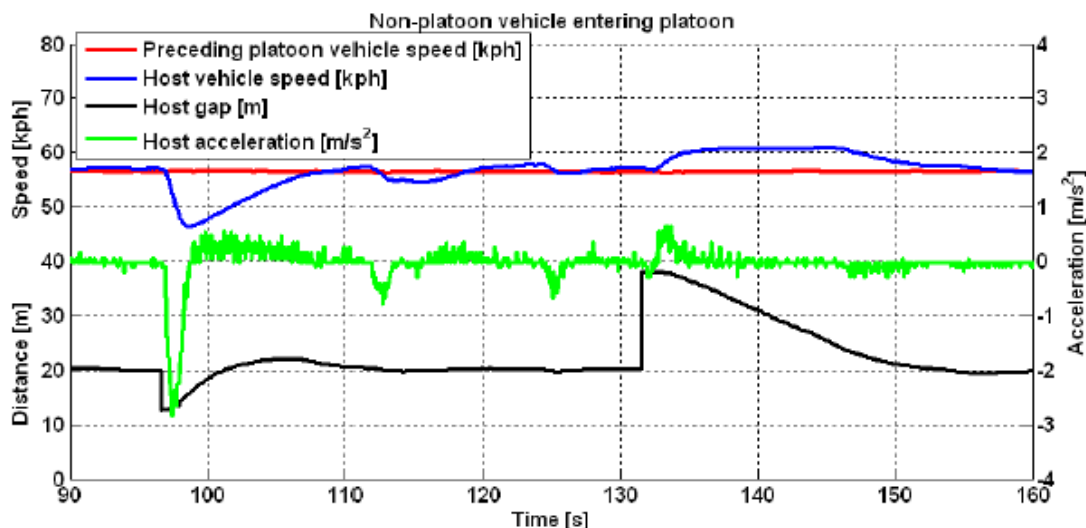
Figur 3.7 Hastighetsförändring följd av ändrad avståndshållning

I normalfallet ansluter sig en bil till kolonnen bakifrån genom ett halvautomatiskt förfarande. Systemet styr hastigheten medan förare styr ratt rörelserna. Tillfälligtvis hålls en högre hastighet tills anslutningen är helt klar. När rätt position nåtts tar systemet även över ratten.



Figur 3.8 Anslutning till kolonn bakifrån

Demonstrationssystemet i SARTRE kan även hantera inträngande icke-kolonn-fordon. I den övre delen av nästa bild ser man två kolonnfordon. Vid tiden $t=96$ sek växlar ett icke-kolonn-fordon körfält och bryter in mellan två kolonnfordon. Avståndet till framförvarande fordon minskar för det bakomliggande kolonnfordonet från 20 till 12 meter. Fordonet tvingas bromsa in för att öka avståndet igen.



Figur 3.9 Icke-kolonnfordon som tränger in i en befintlig kolonn

Vid tiden $t=131$ sek lämnar icke-kolonn-fordonet åter kolonnen och avståndet mellan fordonen ökar från 20 till 38 meter. Systemet minskar sedan luckan igen så det åter blir 20 meter.

Obs! att tidluckan mellan fordonen är ca 0,5 sek i SARTRE. Enligt Michaels teoretiska studie ovan innebär detta en halvering av kapaciteten mot de höga kapacitetsvärden som han redovisade i referensscenariot.

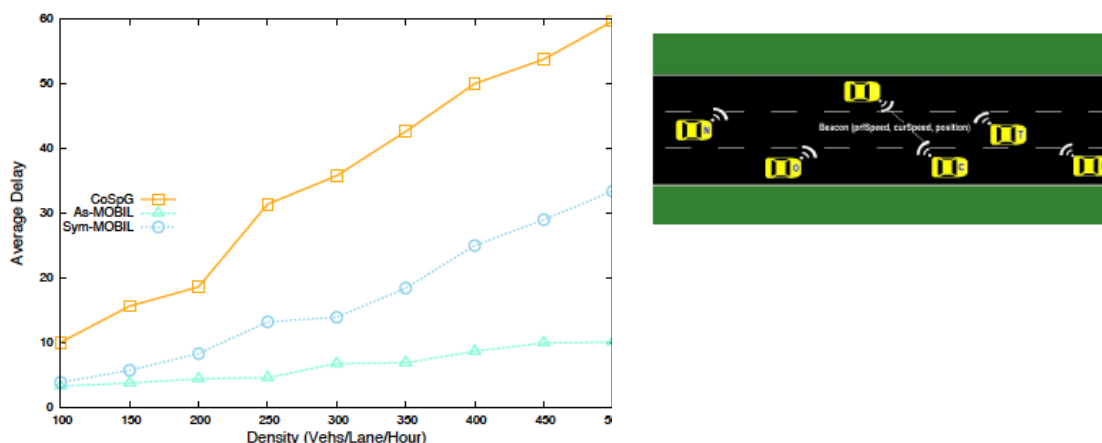
Packning och lossning av kolonner är avgörande för vilka kapacitetsvinster som kan uppnås. Demonstrationssystemet i SARTRE är försiktigt utformat och visar främst att kolonnkörning är möjlig. Det tar t.ex. över en halv minut innan kolonnen är etablerad eller ett inträngande fordon är hanterat. Med detta system är det troligt att kapaciteten minskar i verklig trafik. Kapacitetsvinsterna är därför ännu mycket osäkra. Packning och

lossning måste kunna ske i hög fart med korta avstånd mellan fordon och inte minst även mellan kolonner. Tidiga konservativa lösningar kanske därför främst ger energimässiga fördelar och inte i lika hög grad de kapacitetsmässiga vinster som väntas på lång sikt.

Parallellt med utveckling av styrning för kolonner, studeras även samverkan mellan individuellt självstyrande bilar med hjälp av kommunikation. Ett exempel är Khan et al (2014) som studerat fördelarna med automatisk styrning av körfältsbyten. Aggressiva körfältsbyten ökar risken för trafiksammanbrott och leder till 20-30% extra bränsleförbrukning.

Khan et al har jämfört filbyten genom mänskliga förare (CoSpG) med en modell för samverkande automatstyrt körfältsbyte (MOBIL). De mänskliga förarna byter fil om bilen framför innebär ett hinder för att hålla den önskade hastigheten och det finns tillräckligt utrymme för att byta fil med hänsyn till eventuellt snabbare bilar i körfältet bredvid. Den automatstyrda modellen leder till filbyten om summan av alla inblandade bilar fördröjning minskar.

Simuleringar har gjorts för 10 km motorväg med tre körfält och rektangulärfördelade hastighetsanspråk från 20-50 m/s (72-180 km/h), vilket efterliknar tyska förhållanden. Tillåten acceleration $1,5 \text{ m/s}^2$ och retardation 2 m/s^2 . Längden på bilarna antas vara 4 meter och minsta avstånd 2 meter. Fordonen sänder nuvarande hastighet, önskad hastighet och avstånd m.m. till angränsande bilar (jfr högra delen av Figur 3.10).



Figur 3.10 Genomsnittlig fördröjning för olika täthet på trafiken

Beräkningarna har gjorts för två typer av trafik. As-MOBIL avser europeiska regler där det inte är tillåtet att köra om till höger. Sym-MOBIL avser ett möjligt resultat om omkörning är tillåten i alla körfält. Jämförelsen visar att As-MOBIL leder till kraftigt minskad fördröjning i samband med omkörningar jämfört med mänskliga bilförare. En nackdel är att antalet körfältsbyten blir fler med automatstyrningen, vilket ger ett aggressivare beteende. En följd av detta är att bränsleförbrukningen ökar kraftigt.

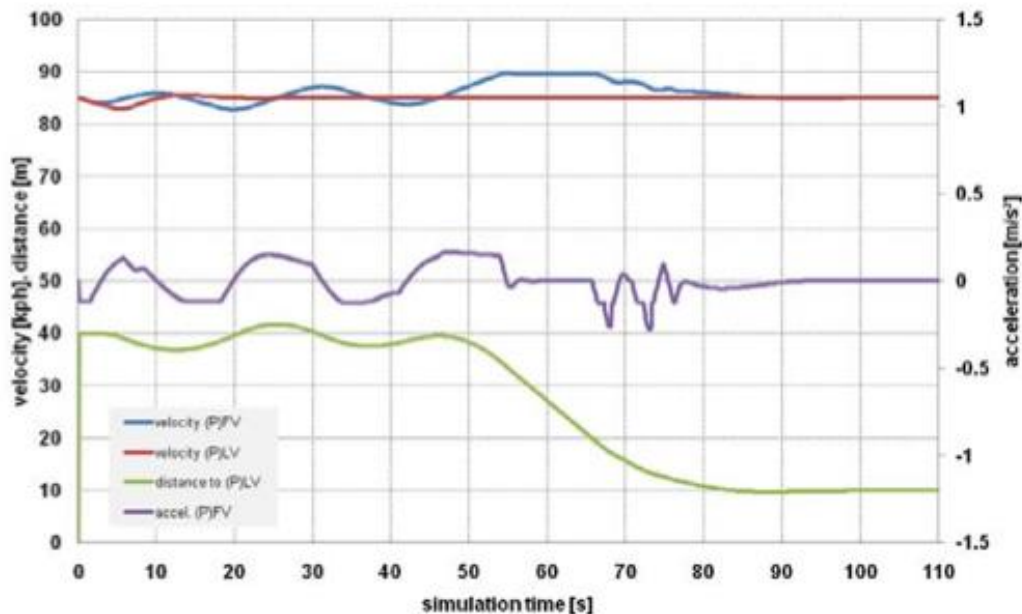
3.2 Packning och lossning av kolonner

Bergenham et al (2013) har gjort fortsatta studier av packning och lossning av kolonner inom ramen för SARTRE. Fortsatt gäller att ledarfordonet är en lastbil eller buss med mänsklig förare och att det samtidigt finns icke automatiska fordon på vägen. Varje fordon styrs automatiskt och ledarfordonet styr övriga i kolonnen och ser till att strängstabiliteten upprätthålls, dvs. att undvika att hela systemet av fordon kommer i självsvängning på olika sätt. Man tänker sig också att det finns ett 'back-office', som stöder kolonnen med ruttval m.m.

Simuleringar har gjorts för att hantera olika kritiska situationer:

- bilda kolonn
- lösa upp kolonn
- docka med kolonn bakifrån, från sidan och framifrån
- lämna kolonn

Figur 3.11 visar ett exempel där en kolonn bildas genom att en lastbil ansluter sig till ledarlastbilen bakifrån. Processen pågår mellan sekund 38 och 83, vilket ger en tid för att bilda kolonnen på 45 sekunder. Simuleringen tar inte hänsyn till annan trafik som skulle kunna störa bildandet av kolonnen.



Figur 3.11 Skapande av kolonn med två lastbilar, 10 m avstånd mellan fordon

Exemplet avser en kolonn med 10 m avstånd mellan fordonen, vilket motsvarar 0,4 sek tidsavstånd. Simuleringar har också gjorts med 5 m avstånd.

Resultaten visar att manövrarna tar mellan 22 och 75 sekunder att genomföra. Längst tid tar det att ansluta till kolonnen från sidan.

Hallé (2005) har i en avhandling analyserat fyra agentbaserade system för att styra packning och lossning av kolonner:

- starkt centraliserad koordinering
- centraliserad koordinering
- decentraliserad koordinering
- samarbetskoordinering

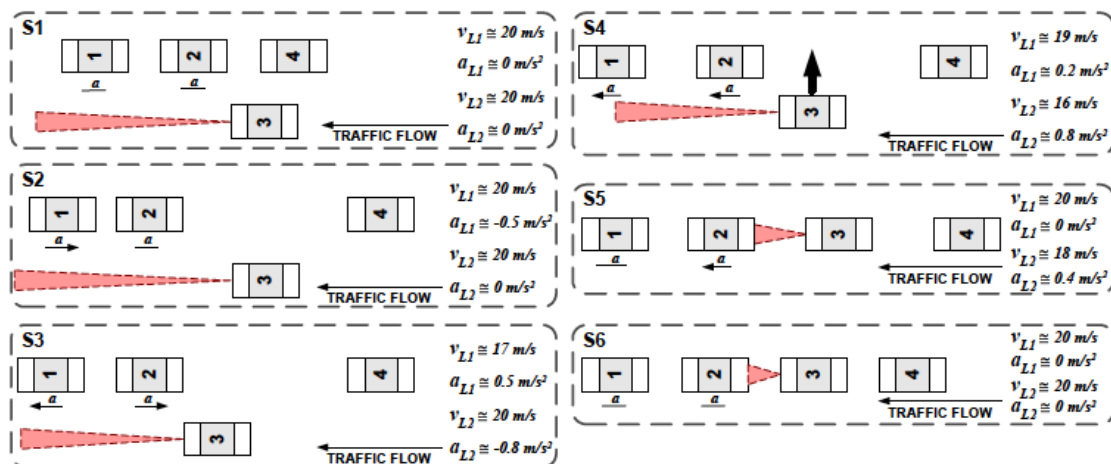
Den centraliserade koordineringen innebär att kommunikationen för att genomföra packning och lossning centreras till ledarfordonet. När ett fordon lämnar kolonnen är bara ledarfordonet, det som lämnar och fordonet bakom detta inblandad i manövern.

Vid den starkt centraliserade koordineringen tillåts anslutning till kolonnen enbart längst bak. I den centraliserade avgör ledarfordonet vilken placering som är bäst.

Den decentraliserade koordineringen innebär att alla fordon kan medverka i manövern. Ledarfordonet är bara ansvarigt för att övervaka att inga nödsituationer uppstår. Vid uppdelning är endast det lämnande fordonet och fordonet bakom detta inblandat. Samma gäller vid infogning, bara det tillkommande fordonet och fordonet efter luckan som valts är inblandade.

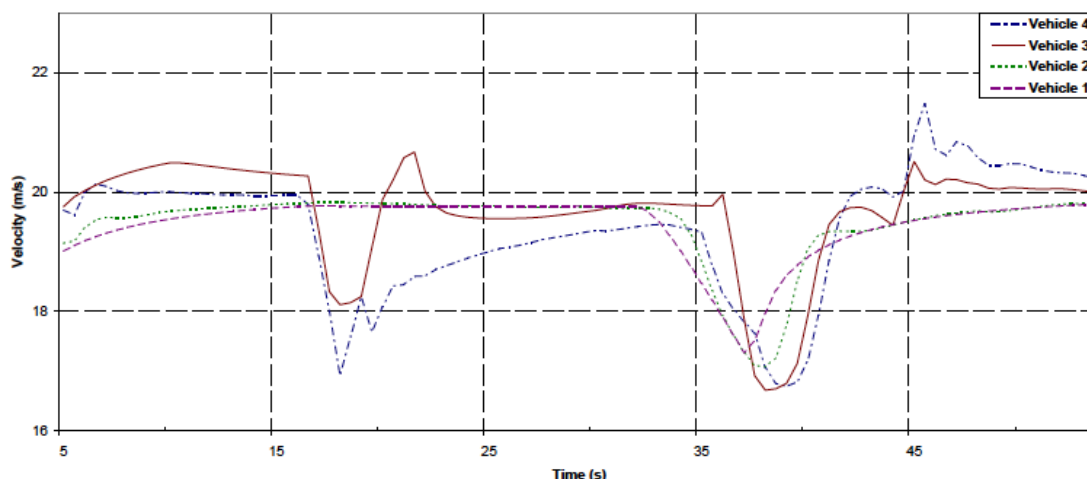
Vid samarbetskoordinering (teamwork) bedömer alla fordon situationen och väljer sin roll (t.ex. fordon som lämnar, fordon som skapar tidslucka, säkerhetsobservatör) som sedan kommuniceras till övriga och förhandlas för gruppens bästa.

Ett exempel på packningsmanöver visas i *Figur 3.12*. Utgångshastigheten är 20 m/s (72 km/h) och säker distans i kolonn 0,2 sek. Vid packning gäller ett något längre säkerhetsavstånd 0,5 sek. Vid inbromsning och acceleration strävas efter att inte överskrida $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$.



Figur 3.12 Scenario med packning av fordon i kolonn med sex faser

Packningsscenarioet börjar med fas S1 när fordon 3 vill ansluta till kolonnen som leds av fordon 1 och består av två följare: fordon 2 och 4. Alla strävar då att behålla hastigheten 20 m/s. Vid tiden 15 sek börjar det anslutande fordonen att bromsa in för att nå infogningspunkten i kolonnen. Vid samma tidpunkt bromsar även fordon 4 in för att skapa en tidslucka mellan sig och fordon 2 (tidslucka på 0,5 sek). Därefter lyckas fordon 3 nå infogningspunkten vid tidpunkten 25,5 sek. Då kan fordon 3 byta körfält och ansluta till kolonnen. I exemplet införs här en plötslig inbromsning från ledarbilen 1. Denna inbromsning varar 5 sek och leder till instabilitet i kolonnen och gör fordon 3:s manöver svårare. I detta moment byter fordon 3 körfält och ansluter till luckan mellan fordon 4 och fordon 2 (fas S4). När fordon 4 känner av fordon 3 med sin frontlaser och fordon 3 känner av fordon 2, justerar båda fordonen efter 35 sek sina hastigheter för att bibehålla ett avstånd på 0,5 sek. Vid tidpunkten 44 sek slutligen, accelererar fordon 3 och 4 för att minska ned tidsluckan till 0,2 sek igen.



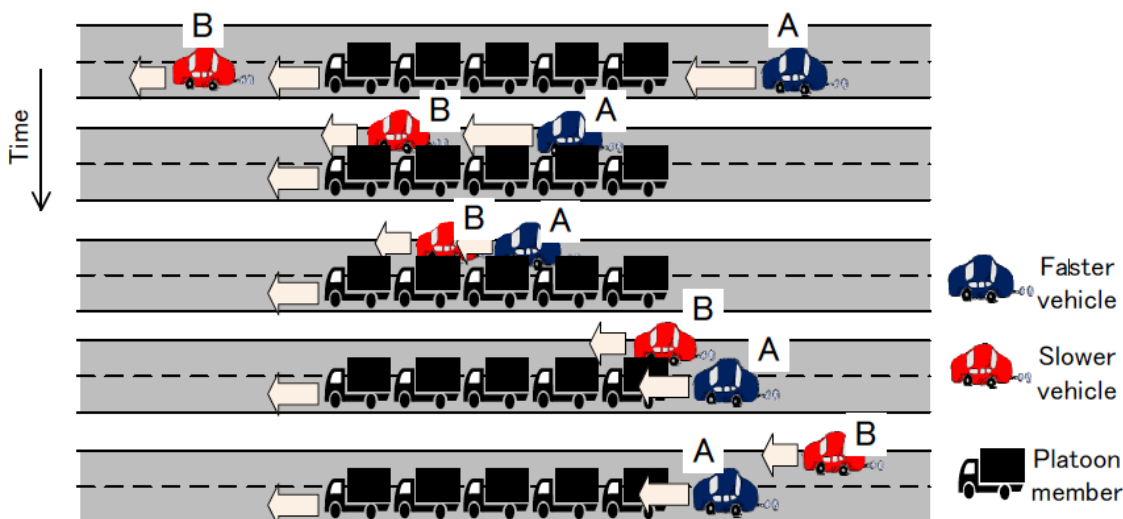
Figur 3.13 Fordonens hastighet vid vävning med centraliserad koordinering.

Exemplet visar hur packning av fordon skulle kunna gå till. Det är givetvis av högsta vikt att alla fordon förstår varandra. Alla fordon bör därför ha samma kommunikationsstrategi.

3.3 Passering av kolonner

Suzuki (2013) konstaterar att omkörning av kolonner är ett väl så stort problem som anslutning till kolonner. Det saknas än så länge detaljerade beskrivningar av hur omkörning ska gå till i verklig tät trafik. Kommunikationen är kritisk och begränsar den möjliga kolonnlängden. Det konstateras att nuvarande kommunikationsprotokoll är otillräckliga. Fordonen antas kommunicera paketvis var 0,02 sek. Nödscenariot kräver kommunikation inom 0,1 sek. Sista fordonet bromsar först för att undvika en upphinnandeolycka. Hittills har man som bäst i verkliga demonstrationer lyckats packa 4 fordon med 4 meters lucka.

Suzuki har försökt göra simuleringarna realistiska. Tidigare studier har i allmänhet handlat om kolonnkörning i ett strömlinjeformat körfält utan omkörningsmöjligheter. Suzuki antar att det finns två körfält med omkörning i det ena. Varje kolonn består av tre lastbilar med 4 m avstånd, som kör i 80 km/h. Avstånd till nästa kolonn 100-500 meter. Antalet kolonner uppgår till 60 per timme. Långa kolonner är svåra att köra om. Ett snabbare fordon kan hamna efter ett långsammare fordon under omkörning och då bli blockerad innan det har möjlighet att köra om det långsammare fordonet. Det scenariet känner man ju igen från situationer med flera långtradare efter varandra. Med 1200 f/h icke-kolonn-fordon minskar hastigheten från 80 till 50 km/h.



Figur 3.14 Blockering av snabbare fordon vid omkörning av lastbilskolonn

Kommunikationen inom kolonnen försämras ju fler fordon den innehåller. Det kan bli överbelastning i kommunikationen för fordonen i mitten. Suzuki förslår därför ett förbättrat protokoll med 'time-slots' som förbättrar kommunikationen. Detta ger bra kommunikation inom och mellan kolonner om inte antalet kolonner överstiger 100 per timme. Svåra problem är motriktad trafik som kan ge interferens samt trafik i tunnlar.

4 Vävning och växling vid trafikplatser

Risto och Martens (2011) konstaterar att framgången för samverkande och självstyrande system är beroende av att de ökar komforten och minskar irritationen hos trafikanterna. En enkät har därför gjorts avseende tre komplexa situationer på motorvägar: tät trafik, minskning av körfält från 3 till 2 samt av- och påfarter vid trafikplatser. Trafikanterna har fått ta ställning till irritationen i situationer där oönskat beteende skulle kunna korrigeras genom stöd för val av lämplig hastighet, avstånd till framförvarande fordon samt lämpligt körfält. Sjutton exempel presenterades, av vilka följande sex ansågs vara mest irriterande:

- Andra bilister som kör in på motorvägen med låg hastighet tvingar fordon i högra körfältet att minska sin hastighet
- Andra bilister kör ständigt i vänstra körfältet och hindrar andra att passera dem
- Bilkörning i chockvågor, som kräver att du bromsar in från 100 km/h till 60 km/h och sedan accelererar tillbaka till 100 km/h bara för att åter bromsa in utan någon påtaglig orsak
- Andra bilister gör inte plats i mittenfilen när du försöker väva från högra körfältet
- Bilen bakom mig håller obehagligt kort avstånd
- Andra bilister byter körfält vid köer för att de tror att det andra körfältet kommer fram fortare

Risto och Martens menar att samverkande system eller självkörande fordon som förbättrar ovanstående situationer har högre sannolikhet att få hög acceptans än andra lösningar.

Hoogendoorn och Minderhoud (2001) analyserade tidigt förutsättningarna för att bilar utrustade med aktiv farthållare (AICC) skulle kunna öka flödet vid avfarts- och påfartsramper vid trafikplatser. De utgick från det väl kända faktumet att effektiviteten i

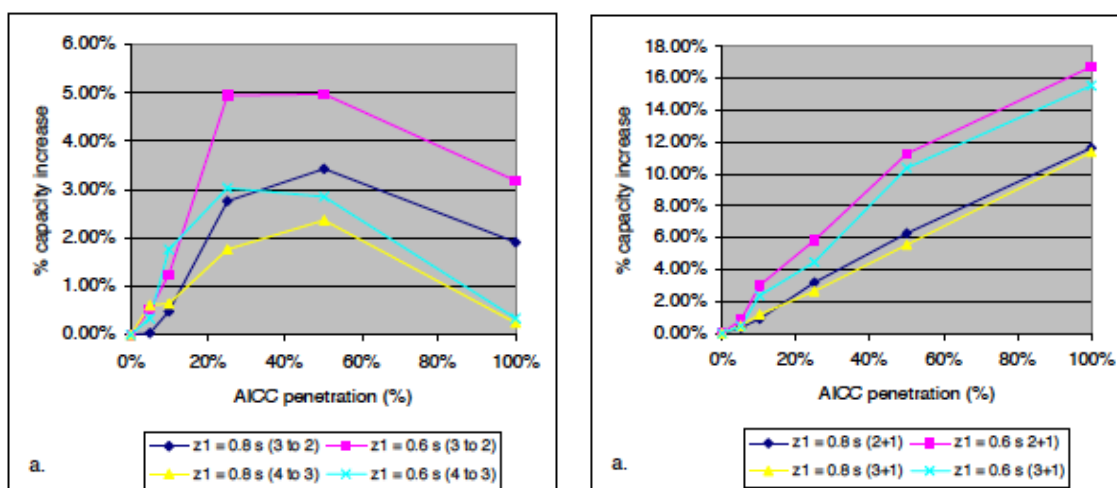
vägnätet bestäms av dess svagaste länkar dvs. flaskhalsarna (påfarter, växling och vävning).

Systemet som analyserades är första generationens aktiva farthållare. Lägsta hastighet är 30 km/h, max acceleration 4,0 m/s² och max retardation 2,5 m/s². Avståndshållningen $d(v)$ beskrivs av formeln:

$$d(v) = z_0 + z_1 v + z_2 v^2 = 3 + z_1 v + 0.01 v^2$$

där v är hastigheten och z_1 ett tidsavstånd som initialt sätts till 0,8 sek och senare till 0,6 sek. 0,8 sek menar man är identiskt med avståndshållningen för mänskliga förare. I detta fall beror kapacitetsvinsten enbart på kortare reaktionstider för det automatiska systemet. För hastigheten $v=20$ m/sek (72 km/h) blir avståndet = $3 + 0,8 \cdot 20 + 0,01 \cdot 400 = 3 + 16 + 4 = 23$ meter. Med $z_1=0,6$ blir avståndet 19 meter.

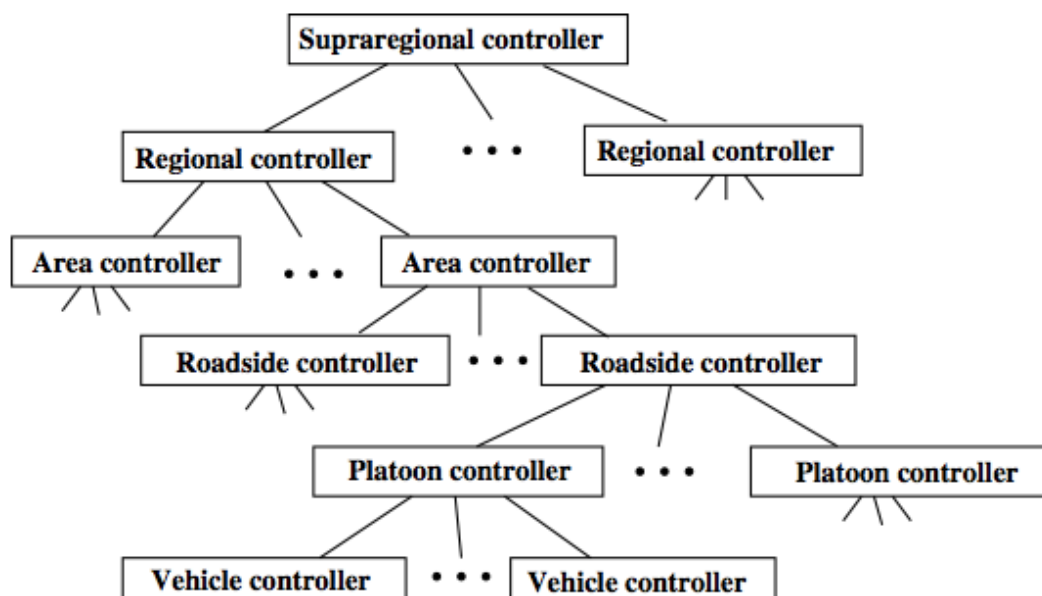
Resultatet av simuleringarna för ett scenario med en flaskhals vid en avfart där 3kf övergår i 2 kf resp. 4 kf övergår i 3 kf framgår av vänstra bilden i *Figur 4.1*. Högra bilden visar motsvarande för påfarter där 2 kf blir 3 kf och 3 kf blir 4 kf.



Figur 4.1 Relativ förändring av kapacitet med aktiv farthållare vid avfarter (vänster) resp. påfarter (höger)

Vid påfarter väntas systemet som mest ge 5% ökning av kapaciteten med $z_1=0,6$. Ett intressant resultat är att kapacitetsvinsten är störst vid ca 50% penetration. Vid högre införandegrad reduceras vinsten p.g.a. högre kritisk hastighet vid kapacitetsmaximum, vilket leder till att högra körfältet blir mer outnyttjat. Vid påfarter ökar kapaciteten närapå linjärt med införandegraden. Vid 100% är ökningen ca 17% för $z_1=0,6$.

Baskar (2009) har skrivit en avhandling om framtida trafikledningssystem för självstyrande bilar. Han konstaterar inledningsvis att det saknas kunskap om hur fordonskolonner bildas och om hur långa kolonner det är möjligt att styra. För att kunna styra fordonskolonner bl.a. vid trafikplatser tänker sig Baskar en hierarkisk, men distribuerad styrstrategi med olika lager enligt *Figur 4.2*.



Figur 4.2 Översikt över ledningssystem för självstyrande bilar

Styrapparater på hög nivå (area, regional och supraregional) samordnar styrapparater på lägre nivå. Vägsidesapparaten (roadside controller) tilldelar varje kolonn ett hastighetsanspråk, ger säker distans mellan kolonner, kontrollvariabler vid påfarter och avfarter, anger lämplig kolonnstorlek, styr ruttval samt ger instruktioner för vävning, splittring och körfältsbyten för fordonskolonnerna. Kolonnapparaten (platoon controller) i ledarfordonet ansvarar för intern koordination av manövrar och utför anpassning i enlighet med instruktioner från vägsidesapparaten. Fordonsapparaten styr varje fordons hastighet, trajektorie och tidsavstånd i enlighet med önskemål från ledarfordonet och översätter dessa till styrinstruktioner för gasreglage, broms och ratt Rörelser.

Baskar tänker sig fordonskolonner med korta inbördes minimiavstånd på 2 meter och 30-60 meter mellan kolonnerna. Kolonnerna kan bestå av ända upp till 25 fordon. Vid köer skapar mänskliga förare beroende på lång reaktionstid och körfältsbyten ett s.k. kapacitetsfall (capacity drop) på 2-7%. Genom självstyrda bilar borde detta kunna elimineras praktiskt taget helt.

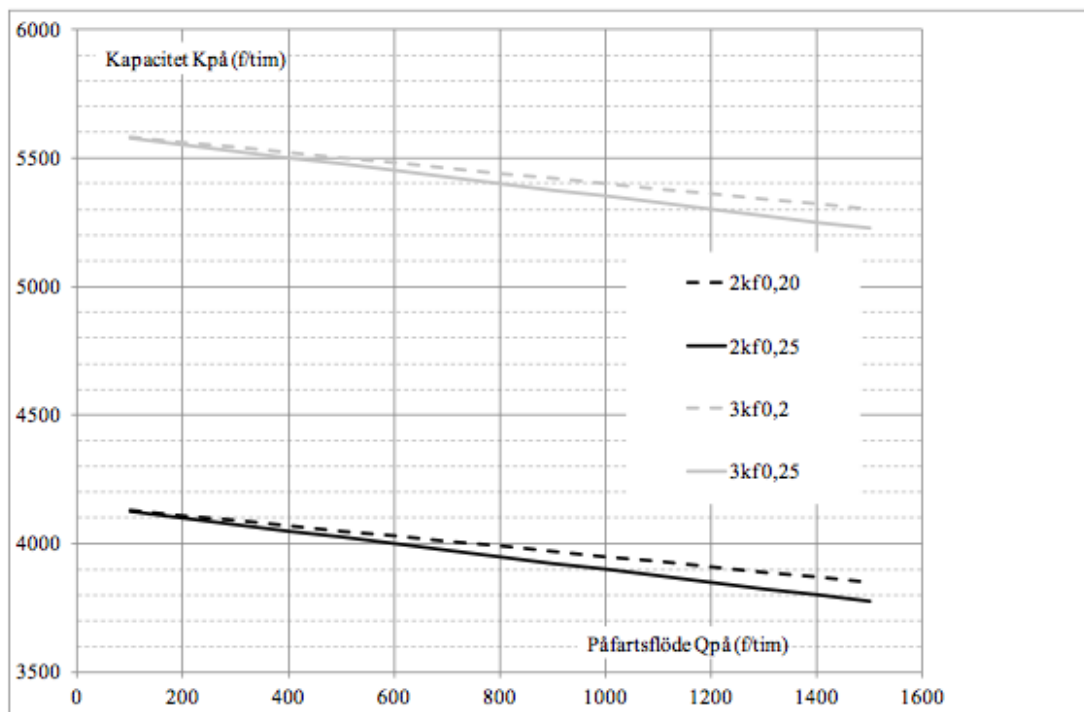
Vid trafikplatser styr vägsidesapparaten påfarten av kolonnerna ungefär på samma sätt som idag sker vid påfartskontroll. Huvudströmmen påverkas så att lämplig lucka skapas för kolonnen, som får lämplig längd och anvisas lämpligt körfält. Kolonnen håller anvisad hastighet till dess att den kör ifatt en framförvarande kolonn. Kolonnerna byter inte körfält förrän i närheten av avfarterna, där de upplöses.

Med de givna förutsättningarna gör Baskar modellberäkningar, som visar att förbättrad styrning med mänskliga förare kan minska restiderna med 10% medan styrning med självstyrande bilar minskar restiderna med omkring 25%.

Den svenska modellen för beräkning av kapacitet vid trafikplatser framgår av Trafikverket (2013). Av Figur 4.3 framgår att kapaciteten minskar 4-8% beroende på påfartsflödets storlek. Motsvarande samband bör gälla även i framtida trafik med kolonnkörande självstyrande bilar.

$\alpha = 0,25$ om trafikplatstäthet $> 0,33$ trafikplatser/km

0,20 om trafikplatstäthet 0,2-0,33 trafikplatser/km

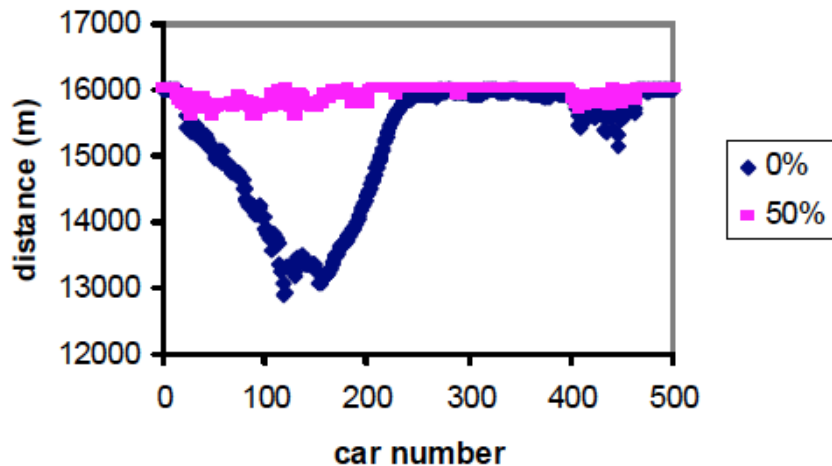


Figur 4.3 Inverkan av påfartsflöde på motorvägskapacitet.

Bierstedt et al (2014) noterar att det krävs en hög andel samverkande fordon för att större kapacitetsvinster ska nås på motorvägar. Ofta bildas flaskhalsar vid på- och avfarter. Om det går att effektivisera växlingen kan vinsterna bli stora. De möjliga kapacitetsvinsterna av samverkan är därför särskilt stora vid vävningspunkter, där individuella självstyrande fordon ger begränsade vinster. En hög andel samverkande fordon är nödvändig eftersom chansen att två fordon ska vara samverkande utgörs av andel samverkande fordon upphöjt i två. Enbart individuellt självstyrda fordon ger begränsade fördelar och kan med konservativa antaganden (1,2 sek minsta tidlucka) och låg andel samverkande fordon t.o.m. minska kapaciteten under de första årtiondena.

Ett par exempel på lösningar presenteras här. Davis et al (2005) studerade car-following-situationer med blandad trafik bestående av fordon med adaptiv farthållare (ACC) och manuellt körda fordon. Tidigare simuleringar av påfarter till motorvägar hade inte kunnat påvisa några större effekter av ACC. Davis föreslår därför att ACC utvecklas till ett samverkande ACC där systemet inte bara håller reda på avståndet till framförvarande fordon utan även avståndet till fordonet i sidokörfältet (i detta fall huvudströmmen på motorvägen). Innan fordonet når vävningssträckan anpassas hastigheten för att säkerställa att en säker lucka för vävning kan uppnås.

Om efterfrågan på rampen är måttlig skulle partiell implementering av samverkande vävning där endast ACC-fordon i huvudströmmen reagerar på fordon på påfarten vara effektiv. Fordonen antas bromsa in för att skapa en lagom stor lucka för vävande fordon. Davis et al (2005) redovisar dock ej någon teknisk lösning på detta. En väsentlig förbättring av genomströmningen (18%) skulle nås enligt beräkningarna om andelen ACC-fordon uppgick till 50%. Simuleringen avsåg en situation med 1426 fordon/h i huvudströmmen (ett körfält) och 461 f/h på påfarten. I detta fall uppstod ingen kö vid påfarten, vilket framgår av Figur 4.4 (rosa linje), där det i vanliga fall blir köer (blå linje).



Figur 4.4 Simulering av samverkande vävning med 50% ACC-fordon

Om efterfrågan på rampen är större, blir körfältet kraftigt överbelastat och kösituationen betydligt värre. Då krävs full implementering, dvs. att alla fordon är utrustade för att kunna förbättra kösituationen.

En mer futuristisk lösning som kräver full implementering redovisas i Milanese et al (2011). Här förutsätts att det finns en styrapparat i trafikplatsen, som kan kommunicera (V2I) med fordon i huvudström och på ramp.

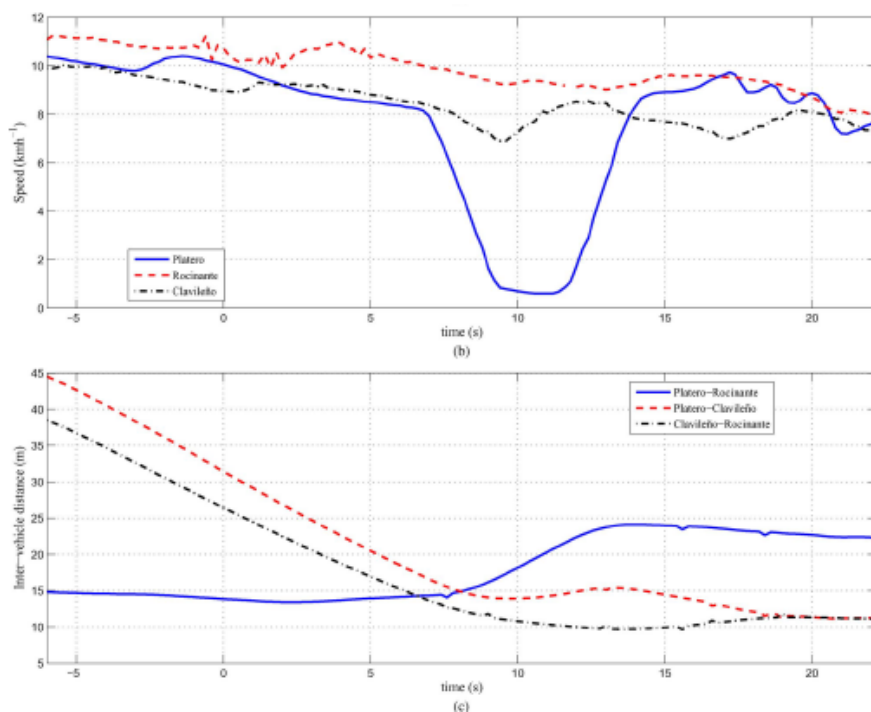
Ett automatisk vävningssystem utvecklas med två huvudmål:

- tillåta fordonet på rampen att köra upp på huvudvägen tillräckligt fort så att köer på den mindre vägen undviks
- modifiera hastigheten för ett par av fordon i huvudströmmen så att effekten på bakomvarande trafik minimeras

Systemet består av tre delar:

- en styrapparat i trafikplatsen som kan detektera fordon på sidovägen som vill ansluta till huvudvägen
- en algoritm som optimerar vävningen och kan sända referensdata till det anslutande fordonet och fordonen i huvudströmmen
- en styrfunktion för samverkande ACC-fordon, som kan följa instruktioner från styrapparaten i trafikplatsen

En prototyp av systemet testades med hjälp av tre Citroën-bilar. Ett exempel på styrning visas nedan:



Figur 4.5 Händelseförlopp för tre bilar i experimentet. (b) Hastighet, (c) Relativa avstånd mellan fordon

Den ledande bilen kallas Rocinante (röd i övre diagrammet), den följande Platero (blå) och den vävande Clavileno (svart). I det övre diagrammet ser man att den följande bilen bromsar in för att ge plats för den vävande bilen. I det undre diagrammet ser man att det relativa avståndet mellan fordonen i huvudströmmen ökar från 15 till uppåt 25 meter för att ge plats för den vävande bilen. När manövern är slutförd är avståndet mellan fordonen 12 meter.

Det finns uppenbarligen flera intressanta idéer för effektivare vävning vid trafikplatser med samverkande och uppkopplade självstyrande fordon. Utvecklingen i introduktions-skedet med blandad trafik är mer osäker. För stora kapacitetsvinster krävs att packningen, dvs. avståndet mellan fordon blir kortare och att vävning kan ske i högre hastigheter än idag. En variant på Milanes lösning kanske kan fungera även om vissa fordon körs av mänskliga förare, men då kanske den förväntade kapacitetsökningen blir betydligt mer begränsad.

5 Stadstrafik

5.1 Blandtrafik med cyklister och fotgängare i korsning

Stadstrafik innebär en mer utmanande miljö för självstyrande bilar. Urmson et al (2008) redovisar hur man löst manöverproblemen i den tävling för självstyrande bilar (eller snarare robotar) som anordnades av amerikanska försvarsmakten år 2007. Den vinnande bilen (Boss) hade bl.a. sju olika sensorer, radar, lidar och kameror för att kunna manövrera i alla upptänkliga miljöer. För att klara olika risksituationer konstruerades 250 olika scenarier, som testkördes för att validera funktionaliteten. Dessa täcker vardags-situationer som att stanna på rätt sätt vid en stoppsignal och svårare utmaningar som att ta sig igenom en blockerad korsning.

Vinnarbilen lyckades tillryggalägga sträckan på 4:10 tim med en genomsnittshastighet på 22,5 km/h, vilket är ett rimligt värde för innerstadsmiljö. Alla utmaningar fanns dock inte med vid tävlingstillfället. Fotgängare, trafiksignaler, varierande väder och tät trafik ingick inte i tävlingen. Tävlingen gav värdefulla erfarenheter som bör tas till vara i den fortsatta utvecklingen:

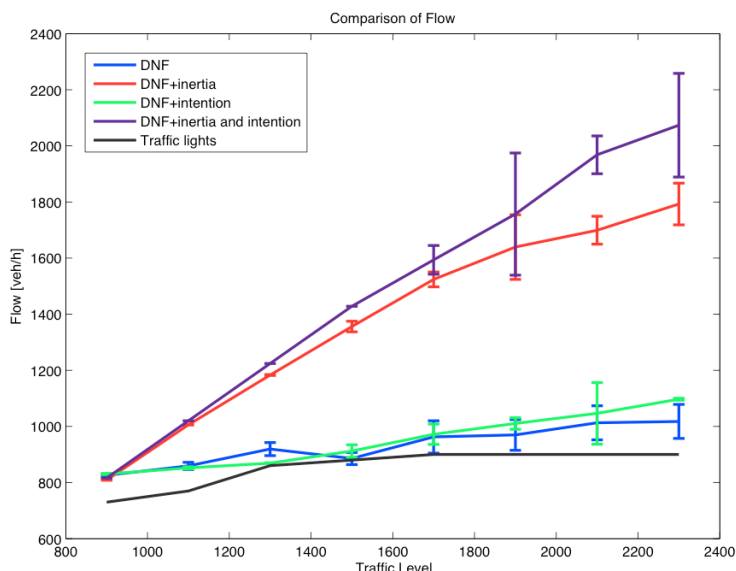
- Tillgängliga sensorer duger inte för stadstrafik. Speciellt är det problematiskt att bestämma vinklar på långa avstånd.
- Bedömning av vägens utseende skulle kunna ersättas med att bestämma positionen i förhållande till väglinjen. Gator i städer ändrar sig ständigt och lokala hinder och förändringar måste ständigt hanteras.
- Den primitiva representationen av andra fordon, hinder och trafikanter måste utvecklas
- Validering och verifiering av körning i stadsmiljö är än så länge outforskat och ett olöst problem
- En mindre restriktiv definition av autonom körning skulle ha stora fördelar. Vinnarbilen Boss skulle ha behövt assistans vid tre tillfällen, vilket skulle lett till att tiden förkortades med 15 min.
- Bilkörning är en social aktivitet. För att kunna agera på samma sätt som mänskliga förare bör även de självstyrande bilarna förstå gester och andra subtila rörelser hos fordonen, som indikerar avsikten hos bilföraren

Pinjari et al (2013) utgår från dagens trafiksignaler och konstaterar att många av dessa i USA är förprogrammerade för situationen under rusningstid. Ofta är detta inte optimalt under övrig tid. Det finns redan självreglerande intelligens i trafiksignaler, men med självstyrande fordon som kan kommunicera med infrastrukturen och andra fordon ökar möjligheterna dramatiskt att utveckla betydligt smartare tidssättning av trafiksignalerna.

Eno (2013) pekar på att fördelarna med självstyrande fordon är att dessa kan hantera kortare tidluckor och kan ha kortare uppstartstider vid trafiksignaler. Därigenom kan gröntiden användas mer effektivt, vilket ökar kapaciteten i korsningarna.

Makarem och Gilet (2012) är ett exempel på tänkbara förbättringar av styralgoritmer för tätortskorsningar med automatiska fordon. Obs, att här förutsätts 100% automatiska fordon. Dessa antas vara av två typer, personbilar och lastbilar. Hastighetsgränsen är 50 km/h och fordonen antas ej byta körfält. Lastbilarna ges företräde.

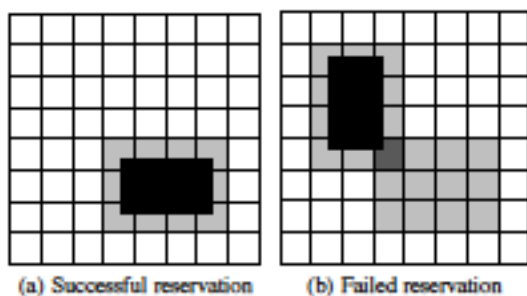
En decentraliserad navigationsfunktion introduceras, som håller reda på position hastighet och riktning för fordon som ankommer från konflikterande ben i korsningen. Kan man också kommunicera om man ska svänga höger, vänster eller köra rakt fram ökar effektiviteten.



Figur 5.1 Totalt flöde för fyra skilda fall med informationsutbyte mellan fordon.

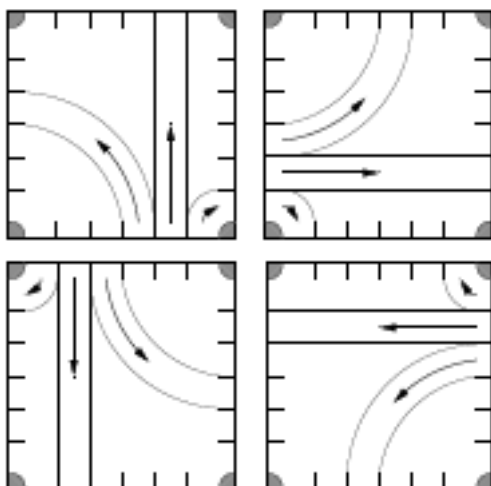
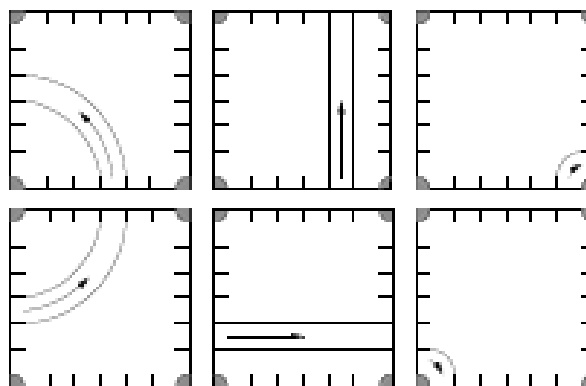
Enligt bilden ovan kan man fördubbla kapaciteten mot dagens trafiksignaler (svart). Med navigeringsfunktionen (DNF, blått) ökar kapaciteten ca 15% och med information om svängintention (grönt) med 25%. De verkligt stora förändringarna nås med positions- och hastighetskommunikation (rött), särskilt om även svängintentionen anges (lila). Det skulle då teoretiskt vara möjligt att dubbla kapaciteten i korsningarna.

En lösning som bygger på ett reservationssystem för autonoma fordon har utvecklats av Dresner and Stone (2006). Här låter man fordonen få fri lejd genom korsningen även när signalerna står på rött eller helt saknas. Styrningen utgår från att självstyrande fordon har en agent som kan begära och erhålla en reserverad körväg genom korsningen genom kommunikation med en styrapparat. Om alla fordon är autonoma behövs inga trafiksignaler. Styrningen, som kallas FCFS (first come, first served) utgår från att korsningen delas upp i rutor enligt Figur 5.2. Ett autonomt fordon kan passera korsningen om det går att navigera genom korsningen på ej upptagna rutor.



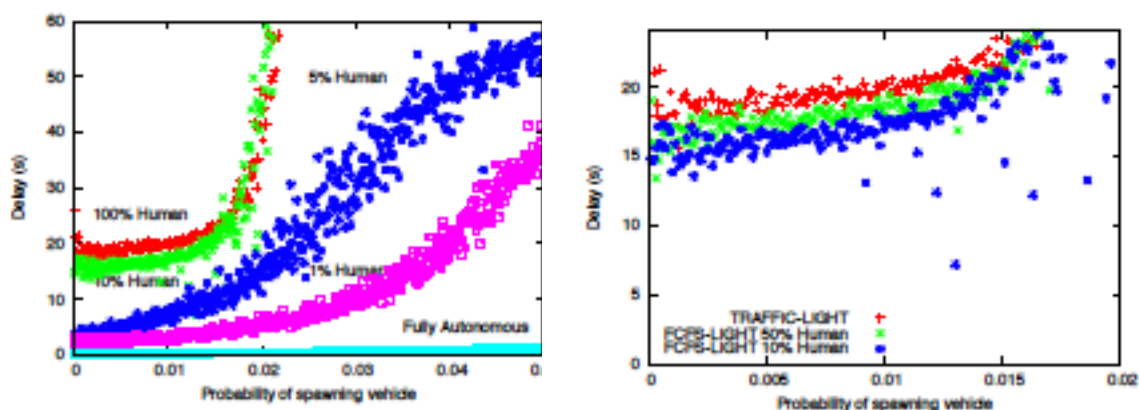
Figur 5.2 Rutmönster 8x8 rutor. I a beläggs 4x3 rutor vid tiden t. I b är en ruta redan reserverad och begäran om passage avslås.

Simuleringar genomförs för att jämföra denna princip med traditionella trafiksignaler. Två ytterligare principer konstrueras dock som har fördelar vid en blandning av mänskliga bilförare och självstyrande bilar. All-lanes-modellen innebär att varje ben ges en egen grönfas (totalt 4 faser) då det inte är tillåtet för fordon från andra ben att köra. Single-lanes-modellen innebär att varje körfält i varje ben ges en egen fas (totalt 12 faser). Denna princip kan tyckas märklig, men har fördelar när andelen mänskliga förare understiger 10%.



Figur 5.3 Styrprinciperna All-lanes (4 faser) och Single-lanes (första 6 faser)

Simuleringarna avser trafikleder i ytterstad med hastighetsgräns 90 km/h och med ett rutnät i korsningen på 24x24 rutor. Resultatet i vänstra delen av Figur 5.4 visar att det finns stora möjligheter att minska fördröjningarna efterhand som andelen autonoma bilar ökar. All-lanes gäller för 100% ned till 10% förare och Single-lanes under 10% förare. X-axeln visar genererade fordon som är ett mått från simuleringen som återspeglar trafikflödet.

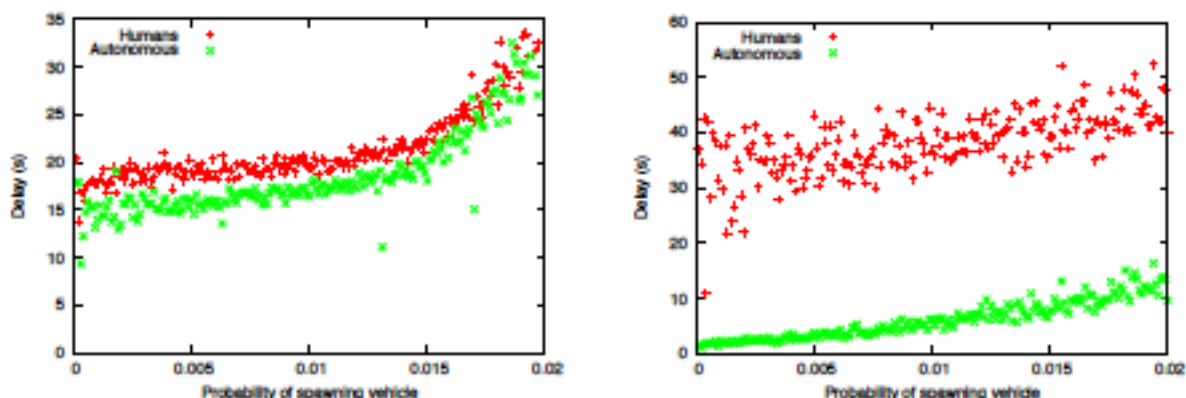


Figur 5.4 Genomsnittsfördröjning (till vänster) vid olika andelar mänskliga förare (100% till 0%) samt (till höger) med 100%, 50% och 10% mänskliga bilförare vid All-lanes-principen.

Den högra delen av *Figur 5.4* visar att genomsnittsfördröjningen minskar med ca 25% när man går från enbart mänskliga förare till 90% självstyrande bilar (10% mänskliga förare).

Figur 5.5 visar att fördelar uppstår även för mänskliga förare när en del fordon är automatstyrda. Vänstra delen av figuren visar genomsnittsfördröjning vid 50% mänskliga bilförare och 50% självstyrande bilar. Fördröjningen är lägre för självstyrande bilar, men också lägre för mänskliga bilförare med All-lanes-principen än med traditionella trafiksignaler.

Högra delen av figuren visar resultat för 5% bilförare och tillämpning av Single-lanes-principen. I detta fall blir fördröjningen klart högre för mänskliga bilförare, men principen kan försvaras med hänsyn till den mycket stora nytta som erhålls för övriga 95% av fordonen.



Figur 5.5 Genomsnittsfördröjning med lika delar (50%) bilförare och självstyrande bilar och All-lanes-principen (till vänster) samt med 5% bilförare och 95% självstyrande bilar och Single-lanes-principen (till höger)

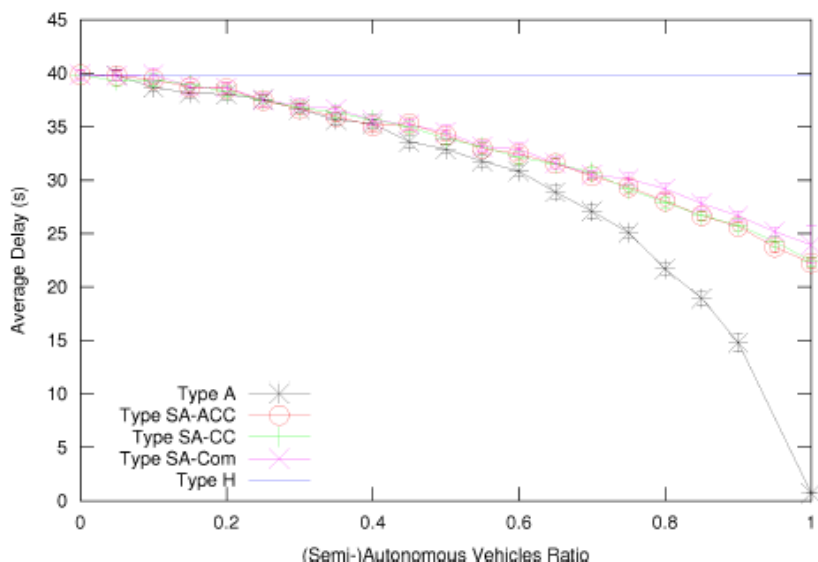
Stone har också medverkat vid fortsatt utveckling av framtida futuristiska styralgoritmer i Au et al (2014). I detta fall antas att det finns en blandning av manuellt styrda fordon, semi-automatiska fordon och helautomatiska fordon. I det tidigare arbetet visade man att effekten av reglertekniska styralgoritmer kraftigt begränsas om inte andelen självstyrande bilar överstiger 90-95%.

Semiautomatiska fordon kan vara av tre slag:

- enbart kommunikation med infrastrukturen
- kommunikation samt farthållning (cruise control)
- kommunikation samt fart- och distanshållning (adaptive cruise control, ACC)

Styrningen utgår från att självstyrande fordon har en agent som kan begära och erhålla en reserverad körväg genom korsningen genom kommunikation med en styrapparat även när trafiksignalen står på rött för manuellt styrda fordon. Detta gäller även för fordon med ACC om fordonet framför är antingen fullt självstyrande eller semi-automatiskt med ACC.

Om fordonet framför är manuellt styrt eller enbart kan kommunicera med infrastrukturen begränsas styrningen på olika sätt för att bibehålla säkerheten. Resultat av simuleringar visas i bilden nedan för en tänkt fyrvägs-korsning på en större trafikled med tre körfält i varje riktning och en hastighetsbegränsning på 90 km/h. Trafikflödet antas uppgå till 360 fordon per körfält och timme.



Figur 5.6 Semi-automatiska fordon jämfört med manuellt styrda fordon (type H)

Referensnivån med trafiksignaler innebär 40 sek fördröjning per fordon. Förbättringar kan ske successivt. Med hälften semi-automatiska fordon är förbättringen 10-15%. Av bilden framgår också de oerhört stora vinster som är möjliga med fullt självstyrande fordon (type A) vid införandenivåer på 80-100%.

Många futuristiska lösningar, som ökar effektiviteten hos signalreglerade korsningar florerar på Internet. De flesta av dessa avser enbart AV-fordon och tar inte hänsyn till förekomsten av fotgängare och cyklister. Aus lösning är dock ett exempel, som även kan hantera semi-automatiska fordon. Även i detta fall ser man att de dramatiska effekterna uppstår först vid mer än 70% självstyrande fordon.

Med självstyrande fordon borde det gå att åstadkomma effektivare lösningar även i blandad trafik. Om första bilen vid grönt kan starta omedelbart och alla efterföljande kan starta samtidigt med kort tidlucka och dessa följs åt genom korsningen så gör redan detta väldigt mycket för att öka effektiviteten. Kan man förmå mänskliga förare att anamma detta beteende, så kan effekterna blir stora redan vid liten andel självstyrande fordon.

Folsom (2011) spekulerar än vidare när det gäller möjliga lösningar i stadstrafik. Fordon som är datorstyrda behöver väldigt liten yta, vilket leder till att motorvägskapaciteten ökar. Han tänker sig ett PRT-system, som inte går på räls, med fordon som är 0,8x1,2x3,0 meter. Om man bygger systemet kring små fordon kan 2-4 körfält rymmas, där bara ett rymms idag. På detta sätt minskar trängseln och behovet av nya trafikleder försvinner.

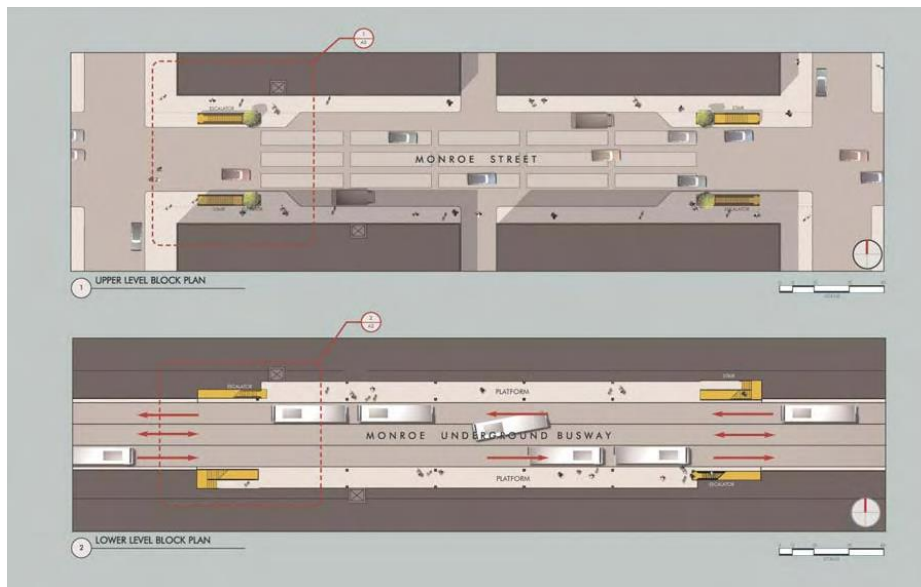
Ett fordon behöver bara ändra hastighet när det lämnar eller kör in på motorvägen vid en trafikplats. Fordon som kör in i systemet kommer att bli exakt tidsstyrda så att de får en fri yta att väva in i. Om systemet överbelastas blir inga nya fordon insläppta, men de som är inne i systemet kan fortsätta med full hastighet. Buffertzoner skapas vid trafikplatserna för fordon som vill in i systemet.

5.2 Tung trafik

Shladover et al (2008) har inom ramen för PATH-programmet gjort två fallstudier för tung trafik för Chicago. Den ena studien avser ett BRT-system i centrala Chicago, den andra en separat lastbilsled som förbinder olika buss- och tågterminaler.

BRT-systemet bygger på ett tidigare förslag till spårvagnslösning, som övergavs för att kostnaderna blev för höga. Det nya BRT-systemet innehåller både halv- och helautomatiska delar och ger följande fördelar:

- Kollisionsvarning hjälper bussförarna att undvika kollisioner
- Precisionsdockning vid hållplatser spar några sekunder per plats och underlättar för rörelsehindrade
- Signalprioritering i korsningar, som uppskattas till ca 40 sek per korsning
- Automatisk styrning, som spar pengar genom att körfälten kan göras 1,3 m smalare på centrumgator

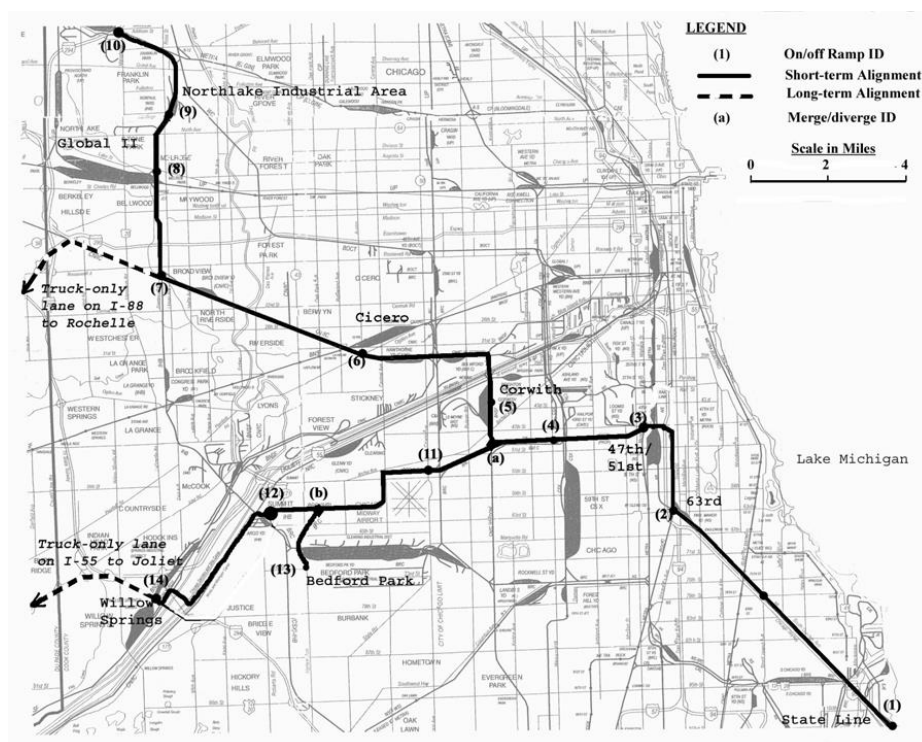


Figur 5.7 Förslag till utformning av Monroe Busway med enbart bussar i nedre planet.

Resultatet innebär att man kan nå motsvarande restider, som med den tidigare planerade spårvägslösningen. Nyttokostnadsanalyser visar att systemet som helhet är lönsamt, men att kollisionsvarningssystemet enbart inte är tillräckligt lönsamt.

Den separata lastbilsleden bygger också på tidigare tankar, men kan göras bättre med hjälp av självstyrande bilar.

- Automatisk styrning gör det möjligt att minska bredden på körfälten
- Automatisk hastighets- och avståndskontroll gör det möjligt att köra lastbilar tätt i kolonner om tre fordon



Figur 5.8 Förslag till separat lastbilsled mellan terminaler i Chicago-området. Total längd ca 70 km.

Kolonnkörningen beräknas fördubbla kapaciteten hos lastbilsleden. Man tänker sig att enbart ledarbilen är bemannad och att de följande bilarna är obemannade. Vid infart till lastbilsleden passeras en check-in-punkt, där kontroll sker av att kolonnen är utrustad korrekt, och vid utfart en check-out-punkt, där föraren åter tar kontroll över fordonet.

Tidsvinster uppstår både för lastbilar, som väljer lastbilsleden, och för övrig trafik genom avlastning från långsammare lastbilar. Kapaciteten kan ökas kraftigt med fordonskolonner enligt Tabell 5.1. Man har mycket lite att vinna på kolonner längre än tre fordon, eftersom detta gör det mycket svårare för lastbilar vid påfarterna att hitta luckor för att väva in i trafikströmmen.

Tabell 5.1 Kapacitet för automatisk lastbilskörfält (exkl. trafikplatser)

Platoon size (No. of trucks)	Speed: meters per second [miles per hour]		
	20 m/s [45 mph]	25 m/s [56 mph]	30 m/s [67 mph]
1	920	820	770
2	1290	1260	1250
3	1490	1570	1570

Nytto-kostnadsanalyser visar att det bästa alternativet är att vänta med färdigställandet av den exklusiva lastbilsleden till efter 2015, då man förutsätter att en helautomatisk lösning med fordonskolonner är genomförbar.

6 Scenariostudier

Med ledning av förstudien önskar Trafikanalys att den fortsatta analysen i ett första steg inriktas på att skissa på ett trafiksystem i framtiden där alla bilar är självstyrande. Vi förutsätter också att dessa körs i kolonner med kort tidslucka.

Slående när det gäller olika försök att simulera självstyrande bilar och fordonskolonner är att de flesta inte tycker att det finns någon modell att bygga vidare på. Detta gör att större energi läggs på att bygga upp en egen modell och förhållandevis mindre på att analysera och diskutera realismen i resultaten.

I vår mer begränsade studie har vi använt kända beräknings- och simuleringsmodeller, som används av Trafikverket. Dessa har modifierats för att kunna hantera kortare tidsavstånd med självstyrande fordon och fordonskolonner.

I *avsnitt 6.3* redovisas beräkning av kapacitet med självstyrande fordon i **motorvägs-miljö**. Problemet med packning och lossning av kolonnkörande fordon i hög fart och med liten tidlucka antas löst i och med att vi antagit 60 meters avstånd mellan kolonner i huvudströmmen. Detta antas vara tillräckligt för att en kolonn på tre fordon ska kunna ansluta säkert mellan befintliga kolonner.

Försök görs genom att kolonnbilda påfartstrafik med anpassning till genomgående motorvägsflöde. Trafikverkets beräkningsmodell CALMAR används vid påfarter och hänsyn tas till normal fördelning av personbilar och lastbilar genom omräkning till pe-tal (personbilsekvivalenter). Hypotesen är tills vidare att det är för svårt att kolonnbilda trafiken vid avfart. Därför antas denna vara stokastisk, precis som i dagens trafik.

Huvudalternativet antas vara scenariot med 0,1 sekunders tidlucka i alla körfält för alla fordon. Kapaciteten reduceras med avseende på vävande och växlande andel med personbils längd + 0,1 sek i trafikplatsen.

I *kapitel 8* redovisas simulering av stadstrafik med cyklister och fotgängare i korsning. Test görs med hjälp av mesosimuleringsmodellen Contram. Kolonnkörning leder till ökade mättnadsflöden. Sekundärkonflikter med fotgängare och cyklister undviks genom att införa allgåfas. Sekundärkonflikter fordon-fordon undviks genom ökad kommunikation mellan fordon, men kapaciteten kan öka genom att tillåta en reducerad tidlucka jämfört med dagens trafik ner till ca 0,5 sek.

6.1 Förutsättningar och antaganden

Antaganden avseende motorvägstrafik med kolonner bygger på översikten i *kapitel 3*. Minsta tidslucka är central när det gäller den framtida kapaciteten. Värden på 0,8-1,2 sek anses enligt litteraturen spegla tät trafik med mänskliga förare och aktiv farthållare.

Med kommunikation mellan fordon kan tidsluckan minskas till 0,5-0,8 sek. Fordonskolonner anses kunna minska tidsluckan ytterligare, ända ned till 0,1 sek, vilket motsvarar 2-3 m vid hastigheter på 70-110 km/h. Vi utgår här från **0,1 sek tidslucka** i simuleringarna.

Det är osäkert hur många fordon som kan styras effektivt i en kolonn. Praktiska försök har oftast omfattat 3-5 fordon, medan simuleringar gjorts för ända upp till 25 fordon. Vi utgår här från **högst 5 fordon** per kolonn.

Antaganden avseende trafikplatser bygger på översikten i *kapitel 4*. Av litteraturen framgår att tidsförluster uppstår i trafikplatser och vid bildandet av kolonner, oklart hur

stora. Vi antar här att tidsluckan mellan kolonnerna måste vara relativt stor, **60 meter**, vilket motsvarar 2-3 sek vid hastigheter på 70-110 km/h. Skälet är dels att fordon ska kunna köra på motorvägen mellan två kolonner, dels att utrymme ska finnas att manövrera för att utöka eller minska antalet fordon i en kolonn.

Vid påfarter antas att **kolonner skapas med 3 fordon** i varje som kör på vid påfarten samtidigt i grupp och passar in i 60-metersluckan mellan kolonner i huvudströmmen.

Antaganden avseende stadstrafik bygger på översikten i *kapitel 5*. Vi utgår från att **uppstartstiden vid trafiksignaler kan minimeras** och att det går att bilda kolonner med 0,1 sek tidslucka genom korsningen. Däremot är vi tveksamma till futuristiska lösningar, som bygger på 'time slots' och inte beaktar oskyddade trafikanter i tillräcklig utsträckning.

6.2 Anpassning av modeller

6.2.1 Vävning och växling

Beräkningarna och simuleringarna bygger på de grundläggande modellerna som närmare beskrivs i TrV:s Metodbeskrivning för beräkning av kapacitet i trafikanläggningar (Trafikverket 2013). I de beräkningar och simuleringar som har gjorts för att estimerar kapacitetsökningarna i samband med 100 % autonoma fordon har flera antaganden gjorts. Dessa är:

- Fordonskolonner i genomgående körfält består i analyserna av tre (alternativt fem) fordon
- Avståndet mellan fordonskolonnerna i genomgående körfält är 60 meter
- Fordonskolonner i påfartsrampen består i samtliga fall av tre fordon
- Ankomsten för kolonnerna i påfartsrampen är stokastisk
- Fordon i avfartsrampen ankommer som enskilda fordon
- Ankomsten för fordonen i avfartsrampen är stokastisk
- Tidsluckan i kolonn är 0,1 sekunder

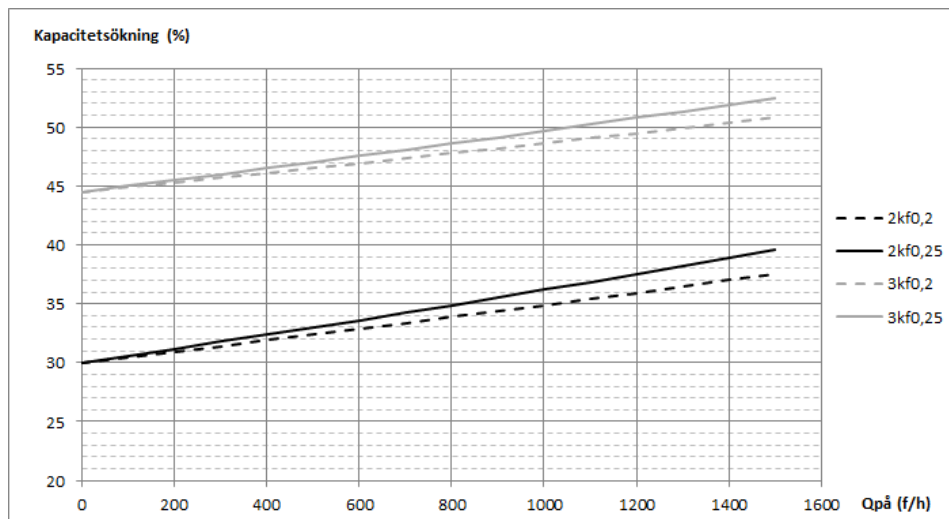
Beräkningarna har varit relativt komplicerade och även inneburit viss omprogrammering av Trafikverkets modeller,

6.2.2 Påfarter vid trafikplatser

Resultatet skiljer sig lite mellan olika vävnings- och växlingskonfigurationer. *Figur 6.1* beskriver kapacitetsökningen med autonoma fordon istället för dagens fordonspark vid vävning för påfartsramp och tre fordon i kolonnen.

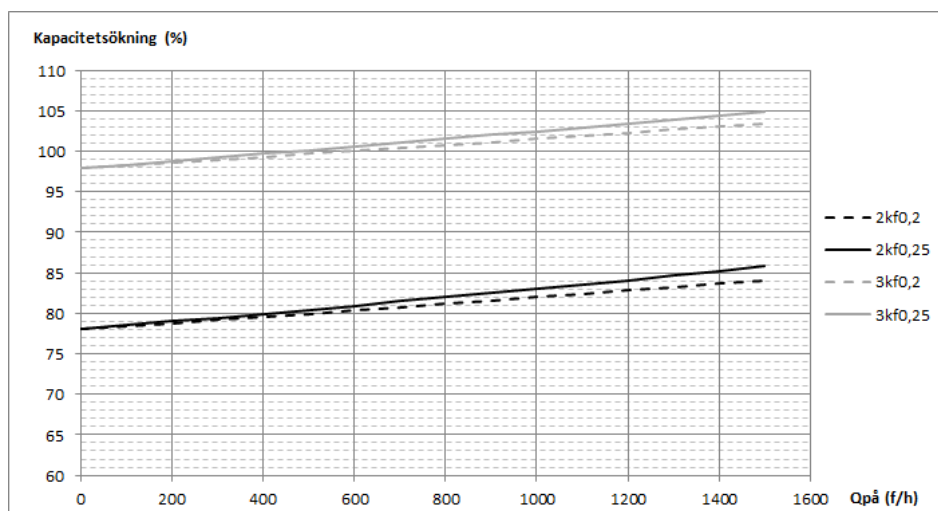
2kf0,2 anger att det är en trafikplats i landsbygdsmiljö med 2 genomgående körfält, 2kf0,25 anger att det är en trafikplats i tätortsmiljö med 2 genomgående körfält, 3kf0,2 anger att det är en trafikplats i landsbygdsmiljö med 3 genomgående körfält och 3kf0,25 anger att det är en trafikplats i tätortsmiljö med 3 genomgående körfält.

Kapacitetsökningen sker linjärt med ökat påfartsflöde och är större, ca 50 %, för 3 genomgående körfält jämfört med ca 35 % för 2 genomgående körfält.



Figur 6.1 Kapacitetsökning för påfart vid 3 fordon i kolonn på genomgående körfält.

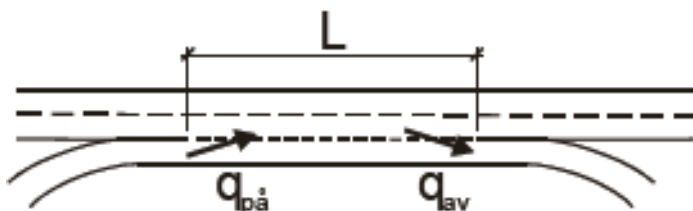
Jämförs detta med en analys av kapaciteten med 5 fordon i varje kolonn i genomgående körfält, se Figur 6.2, är ökningen av kapaciteten ungefär dubbelt så stor med 5 fordon i varje kolonn istället för 3.



Figur 6.2 Kapacitetsökning för påfart vid 5 fordon i kolonn på genomgående körfält.

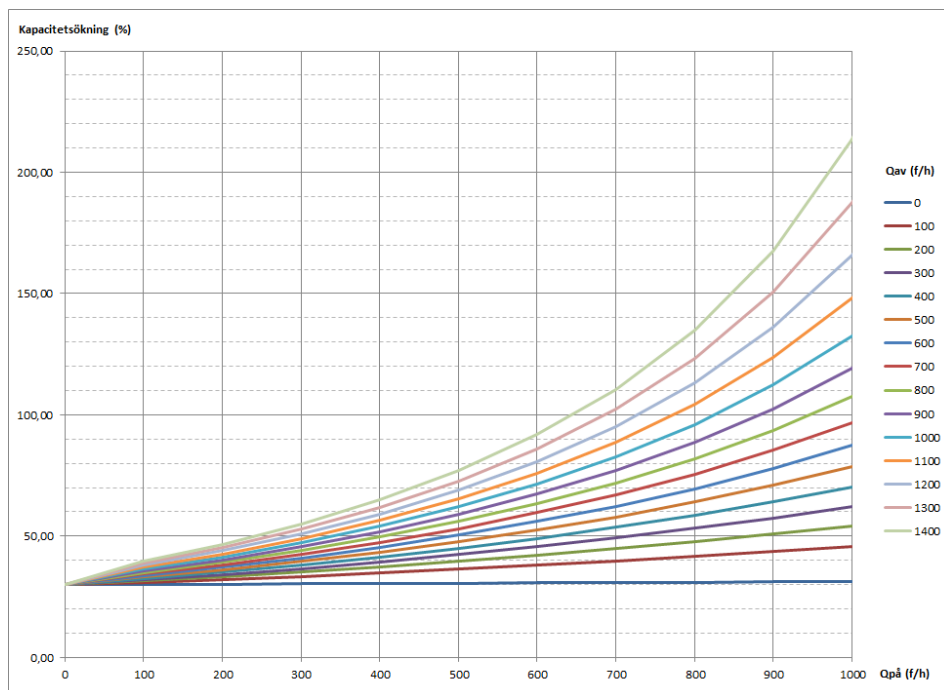
6.2.3 Växlingssträckor

Växlingssträckor uppkommer vid trafikplatser, där en påfart följs av en avfart.



Figur 6.3 Ingående flöden på segment med växlingssträcka samt definition av längd för växlingssträckan.

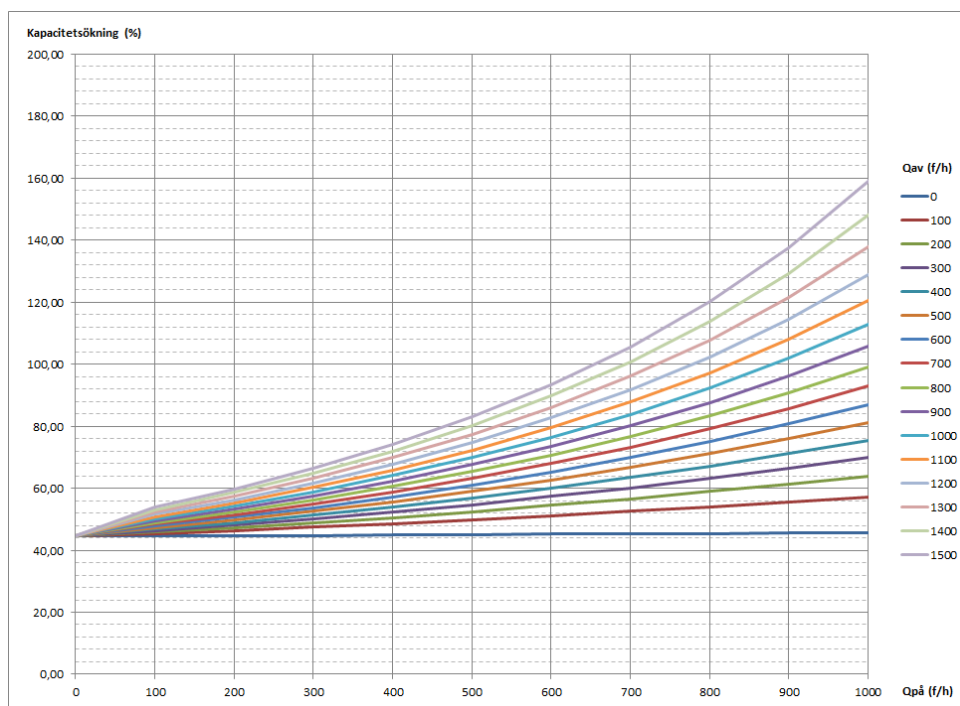
Kapacitetsökningen i jämförelse mellan autonoma fordon och dagens fordonspark vid växlingssträckor är gjord för kolonnstorlekar på tre respektive fem fordon. För kolonnstorlekar på tre fordon och två genomgående körfält, se Figur 6.4,



Figur 6.4 Kapacitetsökning för växling vid 3 fordon i kolonn på 2 genomgående körfält.

Vid måttliga flöden (< 300 f/h), tre fordon i kolonn och tre genomgående körfält blir kapacitetsökningen ca 30%.

Med tre genomgående körfält och tre fordon i kolonn blir ökningen något större, 45%, se Figur 6.5.

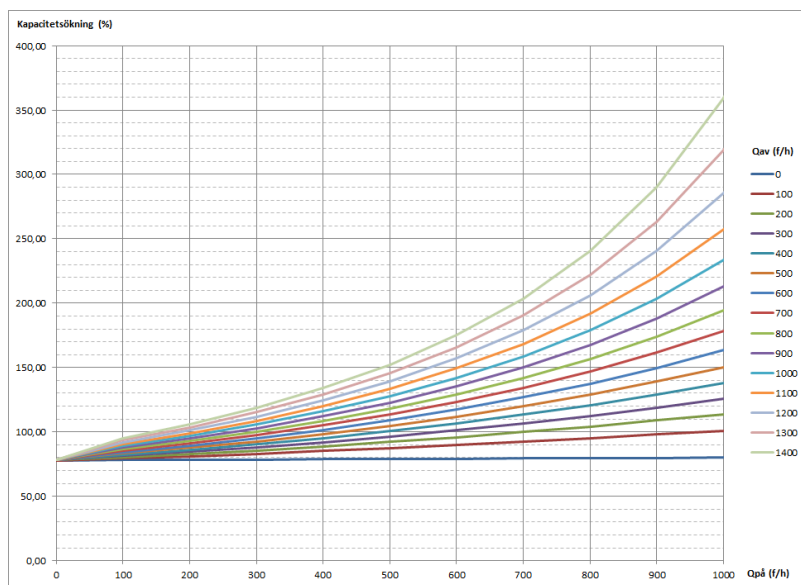


Figur 6.5 Kapacitetsökning för växling vid 3 fordon i kolonn på 3 genomgående körfält.

Ökningen blir ännu större framför allt då på- och avfartsflödena ökar. Orsaken till detta är att det sker en kraftig kapacitetsminskning med dagens modeller vid höga på- och

avfartsflöden. Eftersom punkten för kapacitetsminskningen förflyttas uppåt, sker en kraftig förändring.

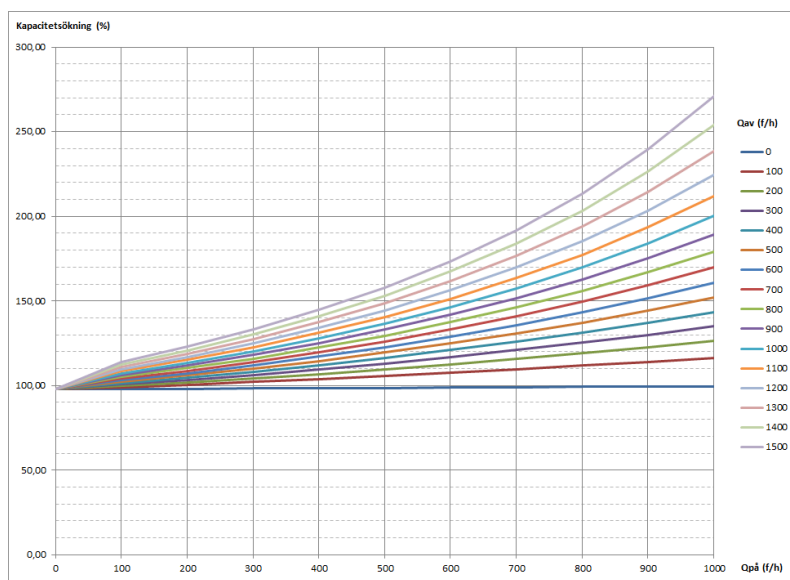
Motsvarande beräkningar har även gjorts med antagande om fem fordon i kolonn. *Figur 6.6* visar resultatet för två genomgående körfält.



Figur 6.6 Kapacitetsökning för växling vid 5 fordon i kolonn på 2 genomgående körfält.

Vid fem fordon i kolonn och två genomgående körfält ökar kapaciteten, vid måttliga på- och avfartsflöden (< 300 f/h) med ca 80 %.

Med tre genomgående körfält och tre fordon i kolonn blir ökningen något större, 100%, se *Figur 6.7*.



Figur 6.7 Kapacitetsökning för växling vid 5 fordon i kolonn på 3 genomgående körfält.

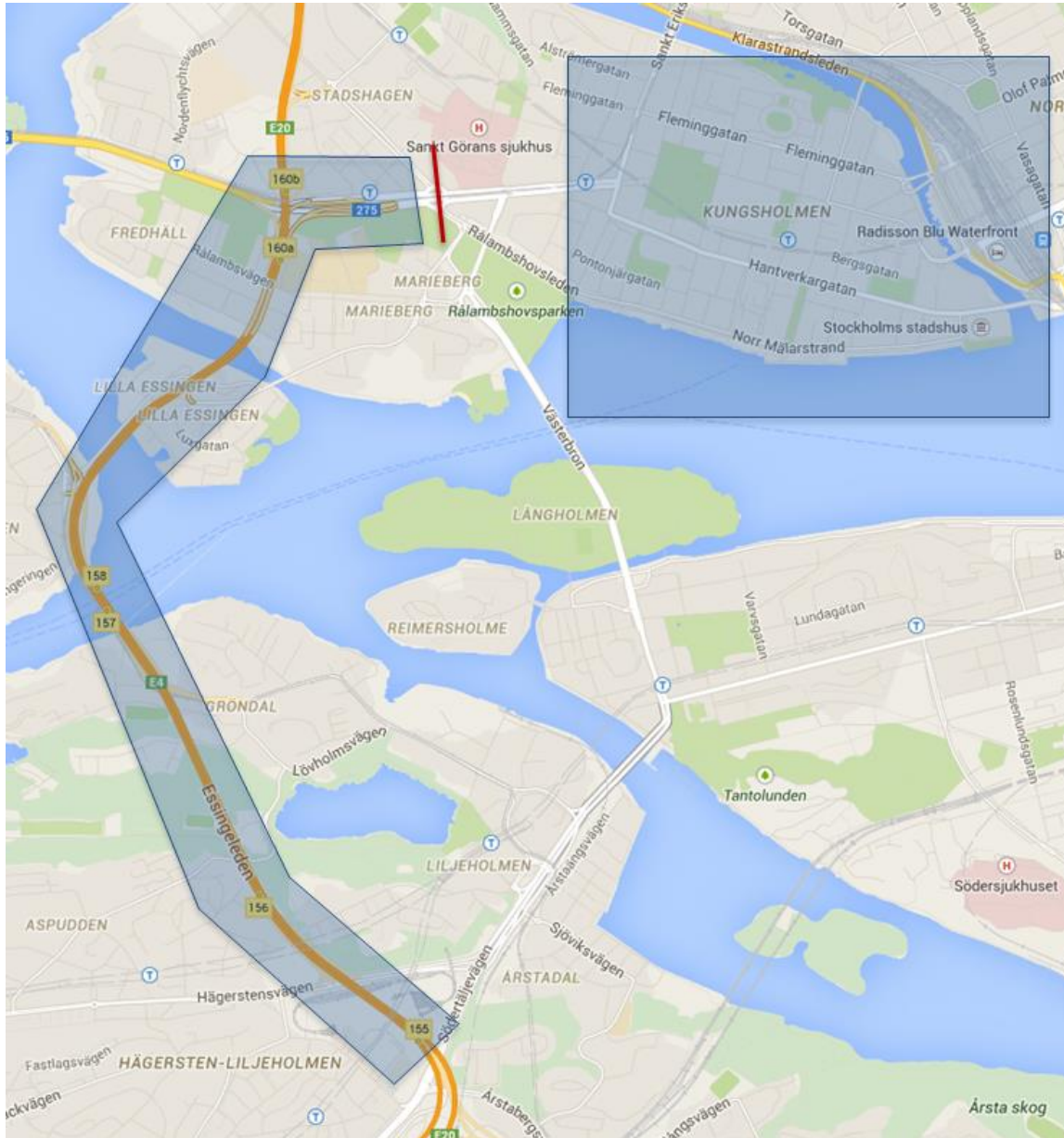
6.3 Självstyrande fordon i motorvägsmiljö

Kapacitet i vävningar och växlingar kännetecknas av de begränsningar som uppstår beroende på att vävande och växlande fordon söker efter en lämplig lucka i trafikflödet.

Beroende på densiteten blir det mer eller mindre svårt att finna dessa, vilket ger en effekt på kapaciteten.

6.3.1 Området

För att beräkna förändringar i kapacitet och restider i motorvägsmiljö har en del av Essingeleden använts. Trafiksituationen motsvarar 2014 års trafiknivåer och utformning av motorvägssträckan med på- och avfarter samt växlingssträckor. Denna del av Essingeleden tangerar den del av nedre Kungsholmen har skurits ut för detaljerade studier av självstyrande fordon i tätort, se Avsnitt 6.4.



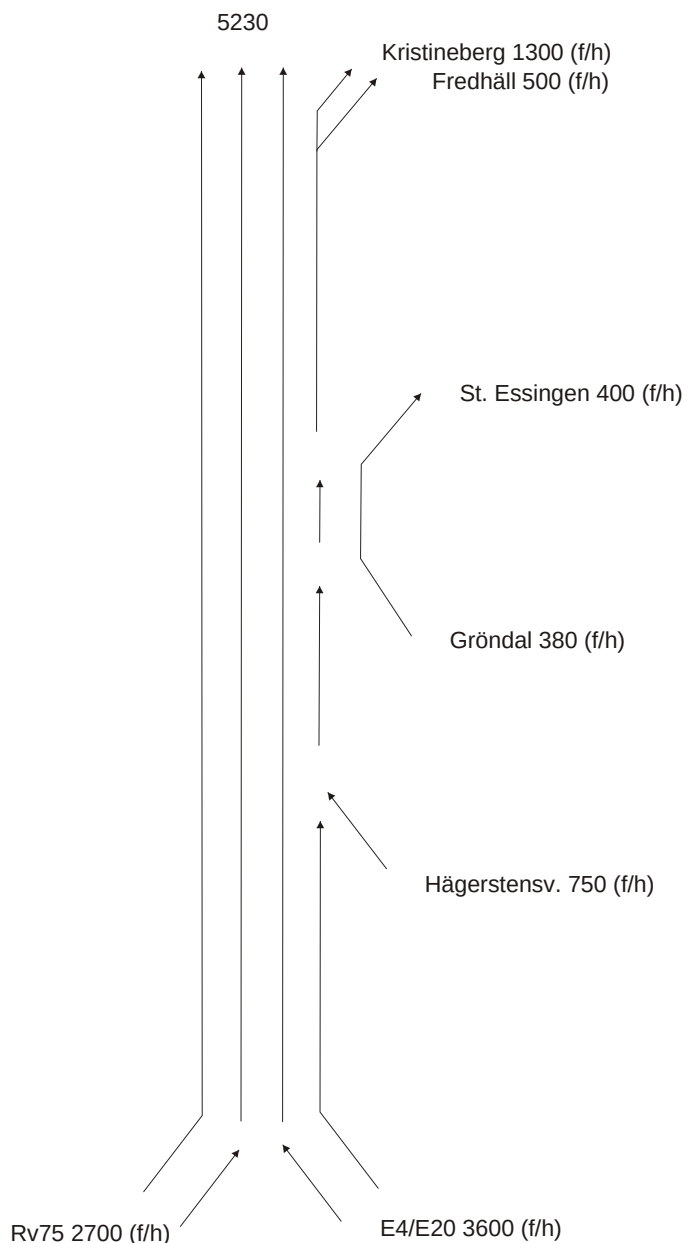
Figur 6.8 Essingeleden simuleras (skuggat frihandsområde) och snittet mot tätortsmodellen (skuggad rektangel) är markerat med rött streck.

6.3.2 Jämförelsealternativ (JA)

Jämförelsealternativet består av dagens trafiksituation under morgonens rusningsperiod mellan kl. 06:45 och 07:45 där det finns en dimensionerande flaskhals, avfarten vid Fredhäll, dvs där kapaciteten överskrids under maxtimmen. Följden blir köupbyggnad som ökar restiderna.

Jämförelsealternativet behandlar Essingeleden med avgränsning till sträckan norrut från punkten där E4/E20 vävs samman med Rv 75 vid Årstälänken och fram till avfarten vid Fredhäll. En förenkling har skett vid påfarten vid Lilla Essingen som har utelämnats eftersom flödet är ringa.

Den beräknade fördröjningen med dagens flöden, se *Figur 6.9*, är 328 fordonstimmar under tidsperioden 06:45-07:45. Flaskhalsen uppstår vid Fredhäll och detta är därför den dimensionerande platsen där fördröjningen uppstår.



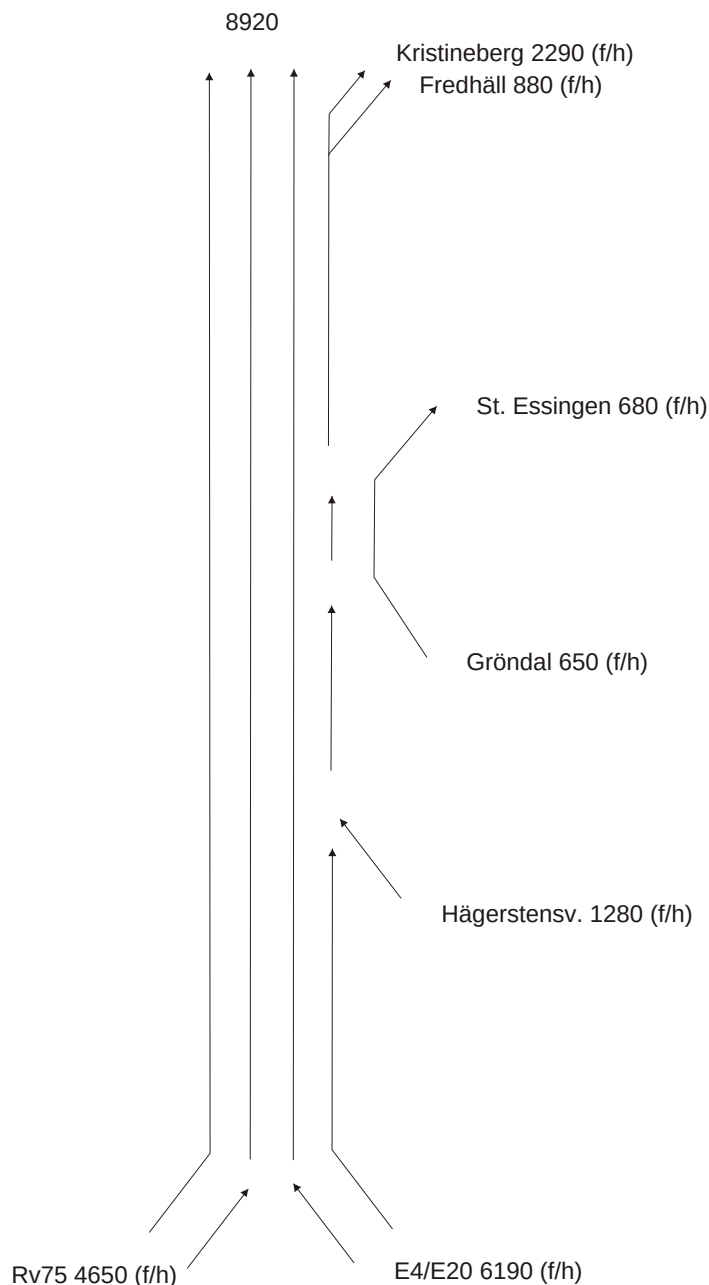
Figur 6.9 Dagens flöden utmed Essingeleden.

6.3.3 Utredningsalternativ (UA)

Scenariot avser en framtida situation, där alla bilar förutsätts vara självstyrande i kolonner om 5 fordon med en tidslucka på ca 0,1 sek och ett avstånd mellan kolonnerna på 60 m. I nästa steg ansätts nya kapacitetsvärden, se *Avsnitt 6.2.2 och 6.2.3*, i

modellen för 100 % autonoma fordonsflöden genom omprogrammering av modellen Calmar.

För att beräkna utredningsalternativets högre kapacitet ökades trafikefterfrågan iterativt till dess att kapacitetsbrister åter uppstod med samma fördröjning som i jämförelsealternativet. Fördelningarna mellan de olika på- och avfarterna har antagits oförändrade.



Figur 6.10 Flöden med 100 % autonoma fordon medför att med samma fördröjning fås 70 % ökat flöde.

6.3.4 Resultat av simuleringarna

Resultatet vid beräkningarna med Trafikverkets modell CALMAR innebär att flaskhalsens möjliga genomströmning ökar med 70 %. Kapacitetsförändringarna avser situationen med fem fordon i kolonn för genomgående körfält och tre fordon i anslutande kolonner på påfarter. Resultatet från simuleringen framgår av *Tabell 6.1*.

Tabell 6.1 Effekter mellan kl 06:45-07:45 för Essingelden.

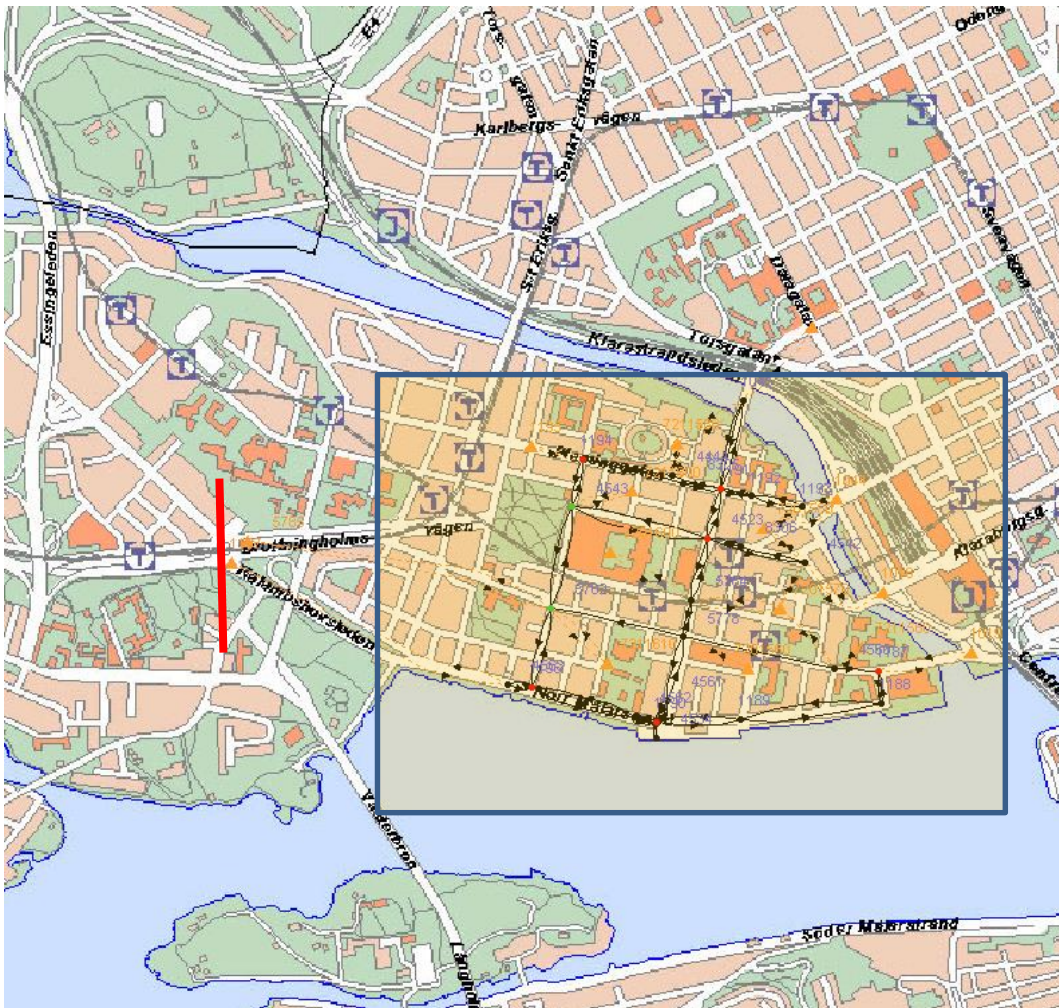
Avsnitt	Flöde JA	Flöde UA
Länk RV 75	2700	4650
LänkE4/E20	3600	6190
Påfart Hägerstensvägen	750	1280
Påfart Gröndal	380	650
Avfart St. Essingen	400	680
Avfart Fredhäll	500	880
Avfart Kristineberg	1300	2290

6.4 Självstyrande fordon i innerstadsmiljö

Simulering har gjorts med trafikanalysmodellen Contram för att utröna möjlig kapacitetsökning med självstyrande fordon, som förutsätts kunna starta i trafiksinal vid grönt utan tidsfördröjning och följa varandra genom korsningen med 0,1 sek tidslucka. Detta motsvarar 1 meter vid 36 km/h (10 m/s). Genom effektivare utnyttjande av gröntiden väntas mättnadsflödena öka.

6.4.1 Området

En mindre del av innerstaden bestående av nedre Kungsholmen har skurits ut för detaljerade studier av självstyrande fordon.



Figur 6.11 Nedre Kungsholmen simuleras (rektangel) och snittet mot motorvägsmodellen är markerat med rött streck

För att beräkna förändringar i kapacitet och restider i innerstadsmiljöer har en befintlig simuleringsmodell för Stockholmstrafiken använts. Trafiksituationen motsvarar 2014 års trafiknivåer och utformning av gatunätet.

6.4.2 Jämförelsealternativ (JA)

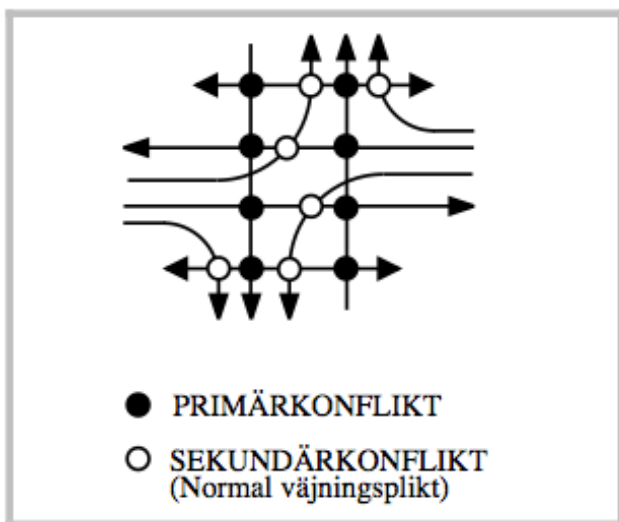
Jämförelsealternativet består av dagens trafiksituation under morgonens rusningsperiod mellan kl 6.30 och 9.30 där det finns ett flertal dimensionerande flaskhalsar i gatunätet, dvs där kapaciteten överskrids under maxtimmen. Följden blir köuppbyggnad som ökar restiderna och även försvårar framkomligheten för busstrafiken i området. Korsningspunkterna är i flera fall signalreglerade med en tidssättning hämtad från dagens signalstyrning. Kapaciteten begränsas även av interaktion mellan oskyddade trafikanter och bilrörelser i blandtrafik.

6.4.3 Utredningsalternativ (UA)

Scenariot avser en framtida situation, där alla bilar förutsätts vara självstyrande med tidslucka på ca 0,1 sek och en accelerationsförmåga på ca 1,5 m/s². Hastigheten maximeras till 40 km/h på innerstadsgator.

Sekundärkonflikter utgörs av konflikter mellan vänstersvängande och mötande fordon eller mellan högersvängande fordon och gående. För att undvika sekundärkonflikt i korsningarna har signalregleringen ändrats till all-gå-fas, dvs alla gångströmmar ges

grönt samtidigt utan några konflikter mellan GC och bil. Detta bör ge trafiksäkerhetsvinster som förstärks då antalet ensamma bilar i gatunätet minskar drastiskt med självstyrande fordon. Sekundärkonflikt bil/bil antas lösas med tidsluckor som är hälften så stora som under normal körning med dagens fordon. Tidssättningen i trafiksignalerna, dvs omloppstid och gröntidsfördelningen, har optimerats för det nya mättnadsflödet. Normala säkerhetstider mot fotgängare som utrymmer korsningen har använts för en realistisk interaktion mellan oskyddade trafikanter och självkörande fordon. Enkelt uttryckt kan korsningen vara i två lägen, dels enbart oskyddade trafikanter utan inblandning av bilar, dels avveckling av biltrafik med enbart interaktion bil-bil.



Figur 6.12 Exempel på primär- och sekundärkonflikter i korsning

För att beräkna gatunätets kapacitet ökades trafikefterfrågan stegvis från 100% till ca 250% för att se på vilken nivå kapacitetsbrister åter uppstod.

6.4.4 Resultat av simuleringarna

Resultatet från simuleringarna framgår av *Tabell 6.2*. Jämförelsealternativet (JA) med dagens trafik innebär en reshastighet på 22,2 km/h. Om efterfrågan fördubblas utan självstyrande bilar skulle reshastigheten minska med två tredjedelar till 7,7 km/h.

Med självstyrande bilar går passagen av korsningarna smidigare. Trots fördubblad efterfrågan blir reshastigheten högre, 25,3 km/h, än i nuläget. Men om efterfrågan ökar ännu mer (+150%) blir kösituationen betydligt värre och reshastigheten halveras till 12,9 km/h.

Tabell 6.2 Effekter mellan kl 7-9 nedre Kungsholmen (UA innebär korsningsutformning utan sekundärkonflikt med GC-trafik)

Beräkningsfall	Restid bil (ford.tim)	Kötid bil (ford.tim)	Genomsnittlig hastighet (km/h)
JA-dagens trafik/utformning	745	230	22,2
UA-0%, efterfrågan 200%	2150	1640	7,7
UA-100%, efterfrågan 200%	652	139	25,3
UA-100%, efterfrågan 250%	3210	1580	12,9

Slutsatsen från simuleringen är att kapaciteten i en innerstadsmiljö kan fördubblas om alla fordon är självstyrande samtidigt som korsningsutformningen och signalregleringen anpassas till den nya trafikmiljön.

7 Diskussion och slutsatser

Beräkningsexempel med 100% självstyrande bilar

Beräkningarna visar att med antagandet att fordonskolonner går att bilda i motorvägs-miljö med 0,1 sek tidslucka och att avståndet mellan dessa är tillräckligt stort (60 meter) för att inte hindra anslutande kolonner från påfarterna, så skulle genomströmningen i exemplet från Essingeleden kunna öka med ca 70%.

Beräkningarna som genomförts avser idealiska förhållanden, där inga variationer mellan fordonen förekommer. Antar man istället att det finns en fördelning av fordon som har lite varierande tidsluckor, lite varierande bromsförmåga och lite varierande styralgoritmer skulle den beräknade kapacitetsökningen bli lägre. Resultaten är därför enbart giltiga i en framtida situation med långtgående standardisering av fordonens egenskaper.

Exemplet från innerstadsmiljön visar samtidigt att kapaciteten i korsningarna om fordonen kan passera korsningen med 0,1 sek tidslucka även den kan öka i motsvarande mån. Flaskhalsen kommer även fortsättningsvis att ligga på Essingeleden och inte i korsningarna. Den ökande trafiken från Essingeleden skulle således teoretiskt kunna absorberas av innerstadskorsningarna.

Exemplet behöver dock inte vara representativt för alla delar av motorvägs- och innerstadsnätet. Men om kapaciteten kan öka på många håll får man naturligtvis trimma systemet som idag på andra håll där kapaciteten lokalt inte räcker till.

Ökad trafik i innerstaden har även påverkan på bl.a. parkeringssituationen. Om inte markbehovet för parkering ska öka måste fler dela på de fordon som utnyttjar gatorna. Det har bl.a. spekulerats om ökad bildelning och att bilparkeringar förläggs mer perifert där de inte konkurrerar med den rörliga trafiken.

Självstyrande bilar kan komma att påverka många delar av trafiksystemet. En fördel med bilar som inte behöver en förare är tillgängligheten för den tredjedel av befolkningen som inte har körkort. Dessa består främst av barn och ungdomar under 18 år, blinda och andra med synsvårigheter samt äldre över 65 år. Leveranser, shoppingresor och besöksresor utgör resor som kan tänkas öka om självstyrande bilar också innebär att transportkostnaden minskar.

När kan vi förvänta oss kapacitetsförbättringar?

Även om det finns en marknad för självstyrande bilar är detta inte likvärdigt med att kapaciteten på vägarna självklart ökar. Marknaden utvecklas sannolikt om bilarna tillfredsställer krav på ökad bekvämlighet och är säkra och enkla att handha. Klara fördelar finns ju också för grupper som annars inte har tillgång till bil.

Avgörande för förbättring av vägkapaciteten på sträcka tycks vara att minsta tidlucka kan minska från nuvarande 0,8-1,2 sek för manuellt styrda fordon ner till 0,5 sek för automatiskt styrda individuella fordon och till 0,1 sek för automatstyrd kolonnkörning.

En mer påtaglig inverkan på kapaciteten tycks inte kunna väntas förrän med 50% självstyrande bilar, dvs omkring år 2050. Ännu högre andelar krävs för att få påtagliga effekter vid trafikplatser.

Samverkan mellan fordon tycks vara avgörande för att förbättra kapaciteten vid trafikplatser och i korsningar. Chansen att två fordon ska vara samverkande är andelen självstyrande fordon i kvadrat. Sannolikt krävs därför mer än 75% självstyrande bilar för att få signifikanta effekter vid trafikplatser och i korsningar.

Samverkan med föraren

En viktig aspekt på utvecklingen togs upp av Neville Stanton (2015) vid årets Transportforum i Linköping. Erfarenheter från flyget visar att autopiloten riskerar att koppla bort de mänskliga piloterna så att dessa inte är i stånd att göra de insatser som behövs i nödsituationer. Det är därför viktigt att redan från början utveckla fordonets HMI så att samverkan med föraren blir så effektiv som möjligt. Studier av arbetsbelastning visar att denna snarare ökar än minskar med autopilot. Det kan därför behöva finnas ett särskilt körkort för att köra en självstyrande bil.

En reflexion med tanke på Stantons föredrag är därför att det vore rimligare att autopiloten, så länge föraren behövs i nödfall, bara kan utnyttjas under en begränsad tid. Denna tid borde vara avpassad så att föraren alltid kan hålla sig alert och kunna ta över i nödsituationer eller när bilen behöver annan assistans t.ex. för att ta sig ur blockeringar. Under denna begränsade tid skulle det då vara möjligt att skicka sms, titta på e-mail eller liknande, men tiden skulle inte vara längre än att föraren åter tvingades ta kontroll över bilen en stund för att därmed hålla sig tillräckligt alert.

Trafiktekniska problem

Vi har trots kompletterande litteraturstudier inte hittat några trovärdiga lösningar, som inte är begränsande för den förväntade kapacitetsökningen, när det gäller:

- packning och lossning av kolonnkörande fordon i hög fart och med liten tidlucka
- vävning och växling vid trafikplatser i blandad trafik
- stadstrafik med cyklister och fotgängare i korsning

Vägen framåt när det gäller självstyrande fordon är osäker och skiljer mellan olika trafikmiljöer:

På motorvägar tänker man sig att man till en början tillåter självstyrande bilar på separata smalare körfält. Det kan dock vara svårt i Sverige där det i normalfallet bara finns två körfält på motorvägarna. Inledningsvis kan försiktig inställning av distanshållningen innebära att kapaciteten begränsas genom självstyrande bilar. Det kan då vara lämpligt att begränsa användningen till landsbygden utanför rusningstrafik i tätorterna.

Stora vinster med kolonnkörande fordon innebär att man i Sverige såväl kör över hastighetsgränsen och har en olagligt kort tidlucka till framförvarande fordon. Lagarna

måste således ändras om detta ska kunna accepteras. Detta kräver att alla säkerhetsmässiga frågor är lösta.

Stora vinster vid trafikplatser och korsningar kan innebära ökad intelligens både som styrapparater i infrastrukturen och styralgoritmer hos fordonen. Dessa måste också kunna samverka med varandra genom V2I- och V2V-kommunikation. De tekniska lösningarna för dessa problem är ännu okända. I båda fallen tycks en mycket hög marknadsandel krävas för att få påtagliga vinster.

Framtida potential

Om alla tekniska problem kan lösas har självstyrande bilar potential att öka kapaciteten i vägnätet. En rimlig förväntan baserat på litteraturgenomgången kan vara 25-35% eller i bästa fall något mer för hela vägsystemet. Vi har fått högre värden i våra simuleringar med detta avser idealiserade förhållanden med enhetliga fordonsegenskaper. De mycket höga siffror som nämnts avser speciella förhållanden för separata körfält på motorvägssträckor utan trafikplatser.

Först på mycket lång sikt skulle det kunna vara motiverat att diskutera begränsning av användningen av manuellt styrda fordon. Det skulle då kunna bli aktuellt att begränsa användningen till utanför rusningstrafik för att inte orsaka kapacitetsbegränsningar.

Myndigheternas roll

Simuleringarna indikerar att kapacitetsförbättringar skulle kunna åstadkommas genom självstyrande fordon. Slutsatsen är att det ger en intressant framtidsperspektiv, men att slutresultatet vad gäller kapacitetstillskott och inverkan på markanvändningen inte är givet. Vissa lösningar kräver särskilda körfält för självstyrande fordon och nya mer avancerade styrapparater i korsningar och trafikplatser eller kräver ytterligare insatser i form av trafikledning.

Introduktionsförloppet för självstyrande fordon ställer krav på testning, datainsamling, utvärdering av effekter, samt planering och byggande av separata körfält. Om detta faller väl ut kommer det att ha stor betydelse för personer utan tidigare tillgång till bil och påverkar förutsättningarna för bl.a. taxi, hyrbilar, bilpooler och kollektivtrafik.

Referenser

- Ohmar Ahmad and Huidi Tang (2003) A Controller for Merging Traffic onto a Highway.
- Bart van Arem, Alexander de Vos and Marianne Vanderschuren (1997) The effect of a special lane for intelligent vehicles on traffic flows
- Tsz-Chin Au, Shun Zhang and Peter Stone (2014) Autonomous Intersection Management for Semi-Autonomous Vehicles. *In Handbook of Transportation.*
- L.D. Baskar (2009) Traffic Management and Control in Intelligent Vehicle Highway Systems
- Carl Bergenhem, Qihui Huang, Ahmed Benmimoun and Tom Robinson (2013) Challenges of Platooning on Public Motorways
- Christian Berger and Bernhard Rumpe (2012) Autonomous Driving—5 Years after the Urban Challenge: The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System
- Jane Bierstedt, Aaron Gooze, Chris Gray, Josh Peterman, Leon Raykin and Jerry Walters (2014): Effects of Next-Generation Vehicles on Travel Demand and Highway Capacity. *FP Think.*
- Mark Campbell, Magnus Egerstedt, Jonathan P. How and Richard M. Murray (2010) Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges
- Jason Carbaugh, Datta N. Godbole and Raja Sengupta (1998) Safety and capacity analysis of automated and manual highway systems
- Erik Chan, Peter Gilhead, Pavel Jelinek, Petr Krejci and Tom Robinson (2012) Cooperative control of SARTRE automated platoon vehicles. *19th ITS World Congress. Vienna, Austria.*
- L. C. Davis (2005) Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Mixed Traffic Flow Near an On-Ramp. *Physics Department, University of Michigan, USA.*
- Kurt Dresner and Peter Stone (201X) Human-Usable and Emergency Vehicle-Aware Control Policies for Autonomous Intersection Management.
- Tyler C. Folsom (2011) Social Ramifications of Autonomous Urban Land Vehicles
- Alain Girault (2003) A Hybrid Controller for Autonomous Vehicles Driving on Automated Highways.
- Simon Hallé (2005) Automated Highway Systems: Platoons of Vehicles viewed as a Multiagent System
- S.P. Hoogendoorn and M.M. Minderhoud (2001) ADAS Impact Assessment by Micro-Simulation
- Petros A. Ioannou and C.C. Chien (1993) Autonomous Intelligent Cruise Control

- Umer Khan, Pavlos Basaras, Lars Schmidt-Thieme, Alexandros Nanopoulos and Dimitrios Katsaros (2014) Analyzing Cooperative Lane Change Models for Connected Vehicles
- Gerdien Klunder (2013) Methodology for classification of ITS
- Todd Litman (2013) Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implementation for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute, Canada
- Michael Le Maistre (2004) An Investigation into the Effects on Motorway Traffic with the Systematic Introduction of Autonomous Vehicles through Micro-Simulation
- Laleh Makarem and Denis Gilet (2012) Information sharing among autonomous vehicles crossing an intersection. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Lausanne, Switzerland*
- James B. Michael, Datta N. Godbole, John Lygeros, and Raja Senguptaet (1998) Capacity Analysis of Traffic Flow over a Single-Lane Automated Highway System. *California PATH*
- Vicente Milanès, Jorge Godoy, Jorge Villagrà and Joshué Pérez (2011) Automated On-Ramp Merging System for congested Traffic Situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, vol 12. No 2, June 2011.
- M.M. Minderhoud (1999) Supported Driving: Impacts on Motorway Traffic flow
- Abdul Rawoof Pinjari, Bertho Augustin and Nikhil Menon (2013): Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles: An Assessment. *Centre for Urban Transportation Research. Florida, USA.*
- Malte Risto and Marieke Martens (2011) Early user participation in the identification of use case scenarios for "Connected Cruise Control"
- Steven E. Shladover, Mark A. Miller, Yafeng Yin, Tunde Balvanyos, Lauren Bernheim, Stefanie R. Fishman, Faidr Amirouche, Khurran T. Mahmudi, Pedro Gonzalez-Mahino, Joseph Solomon, Gerald Rawling, Ariel Iris and Claire Bozic (2008) Assessment of the Applicability of Cooperative Vehicle-Highway Automation Systems (CVHAS) to Bus Transit and Intermodal Freight: Case Study Feasibility Analyses in the Metropolitan Chicago Region. *California PATH Program.*
- Bryant Walker Smith (2012) Managing Autonomous Transportation Demand
- Neville Stanton (2015) HMI-aspekter vid autonom körning. Föredrag vid Transportforum 2015.
- Masaki Suzuki (2013) Efficient Communication for Platooning and Overtaking in Intelligent Transport Systems
- Chuck Thorpe, Todd Jochem and Dean Pomerleau (1998) Automated Highways And The Free Agent Demonstration
- Trafikverket (2013) TRVMB: Kapacitet och framkomlighetseffekter. Trafikverkets metodbeskrivning för beräkning av kapacitet och framkomlighetseffekter i vägtrafikanläggningar. TRV 2013:64343

Chris Urmson et al (2008) Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge

