

Effekter av självstyrande bilar

Litteraturstudie och probleminventering



v1.0
2014-10-29



Gunnar Lind, Per Strömgren och Fredrik Davidsson

Innehåll

1	BAKGRUND.....	1
2	MÖJLIG FORDONSUTVECKLING	2
3	KOLONNKÖRNING	5
4	HINDER FÖR UTVECKLINGEN	11
5	INVERKAN PÅ RESANDET	14
6	INVERKAN PÅ MOTORVÄGSKAPACITET.....	16
7	INVERKAN AV VÄVNINGSSTRÄCKOR	19
8	INVERKAN PÅ STADSTRAFIK.....	21
9	UNDERLAG FÖR UTFORMNING AV SCENARIOSTUDIER	23
	REFERENSER	26
	BILAGA	28

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 (autonomous vehicles = AV) i samarbete med bl.a. Trafikverket. Transportstyrelsen har i en förstudie inventerat vilka lagar och bestämmelser som kan behöva ändras. Viktiga frågor är bl.a. trafikregler och ansvar om en olycka skulle inträffa. Centralt i detta sammanhang är frågan om ägar- resp. produktansvar.

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. Trafikanalys har bitt Movea skissa på en utredning där efterfrågan på ökad kapacitet, möjliga kapacitetsvinster och problem som måste lösas för att i realiteten nå de teoretiskt möjliga kapacitetsförbättringarna kartläggs.

Av tidigare studier att döma påverkas kapaciteten starkt av i vilken utsträckning kolonnkörning tillämpas och av spridning i bromsförmåga mellan olika fordon, vilket i sin tur påverkar vilket säkerhetsavstånd som är nödvändigt. I denna förstudie görs inledningsvis en genomgång av litteraturen för att få realistiska förutsättningar för översiktliga kapacitetsstudier med exempel från t.ex. Förbifart Stockholm och eventuellt andra vägar med kapacitetsproblem. Exempelvis är det intressant att studera hur vävning (påfart) och växling (på- och avfart) samt bildning och upplösning av kolonner påverkar den realiserade kapacitetsförbättringen.

Med utgångspunkt från litteraturstudien inventeras sträckor, där det kan finnas starkt intresse att öka kapaciteten. För dessa sträckor simuleras kapacitetsförbättringen för några olika scenarier som tar hänsyn till fördelningen mellan individuella och kolonnkörande fordon, mellan självstyrande och manuella fordon, mellan person- och lastbilar och förändrad körfältskonfiguration (smalare/separata körfält för självstyrande fordon).

Scenarierna som ska simuleras och ambitionsnivå bestäms gemensamt mellan Trafikanalys och Movea.

Följande arbetsmetodik tillämpas i studien:

1. Litteraturstudie och probleminventering (denna rapport)
2. Sammanställning av förutsättningar för scenariostudier
3. Fördjupning av behovsanalys och hantering av trafikplatser
4. Val av scenarier för kapacitetsberäkningar
5. Kapacitetsberäkningar och trafikanalys

Litteraturstudien, som presenteras här, utgör bara ett axplock av den flora av många hundratals teoretiska och praktiska studier som genomförts eller pågår hos biltillverkare och forskningsinstitutioner runt om i världen. Syftet är främst att få en inblick i olika delområden för att kunna göra någorlunda realistiska antaganden när det gäller kapacitetspåverkan inför fortsatta scenariostudier.

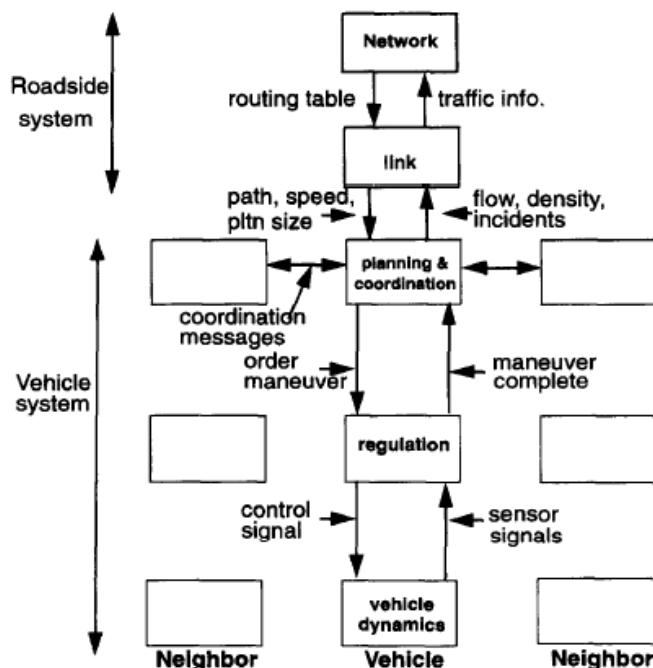
2 Möjlig fordonsutveckling

Bierstedt et al (2014) redovisar fem nivåer vad gäller definition av självstyrande bilar, som tagits fram av den amerikanska trafiksäkerhetsmyndigheten¹:

- Nivå 0** Ingen autonom körning. Nuvarande situation. Föraren har fullständig kontroll över fordonet. Varningsystem kan förekomma.
- Nivå 1** Funktionsspecifik automation. Moderat nivå på automation t.ex. stabilitetskontroll eller nödbromssystem som förstärker förarens aktioner.
- Nivå 2** Multifunktionell automation. Förmåga att styra två specifika funktioner samtidigt t.ex. där fordonet kan upprätthålla både hastighet och körfälsposition i trängselsituationer.
- Nivå 3** Begränsad självstyrning. Föraren förväntas inte konstant övervaka vägen under körningen, men kan överta kontrollen vid behov i speciella trafiksituationer.
- Nivå 4** Full självstyrning. Föraren behöver endast ange destination eller körväg.
- Nivå 5** Automattaxi/elektronisk chaufför. Nya tjänster utvecklas med bilar som är kapabla att kommunicera med varandra och hantera uppkommande konfliktsituationer.

Med självstyrande AV-fordon menas fortsättningsvis nivå 3 och högre.

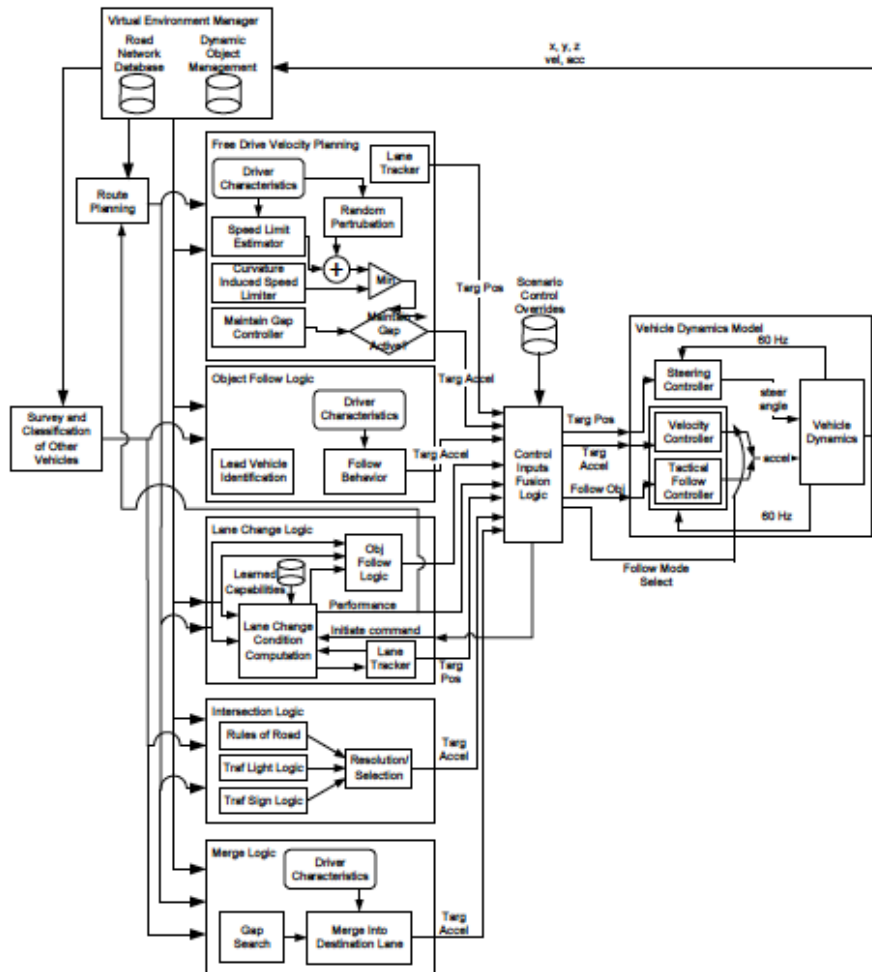
Avgörande för att uppnå kapacitetsvinster är möjligheten att bilda fordonskolonner. Enligt Li et al (1997) krävs hantering av de självstyrande bilarna i fem lager: nätverk, länk, planering och koordinering, reglering samt fysiskt lager. Nätverkslagret vägleder bilarna i nätverket. Länklagret skapar en bild av trafiksituationen, främst täthet och flöde. Koordinationslagret bestämmer när ett fordon ska genomföra en manöver. Regleringslagret styr sedan själva manövern.



Figur 2.1 Fem lager för reglering av självstyrande fordon

Komplexiteten när det gäller att bygga en förarmodell för självstyrande bilar kan även exemplifieras med denna bild från Ahmad och Tang (2003). Bilden visar bl.a. moduler för car-following, körfälsbyte, vävning vid trafikplatser och korsningsbeteende.

¹ NHTSA = National Highway Traffic Safety Administration

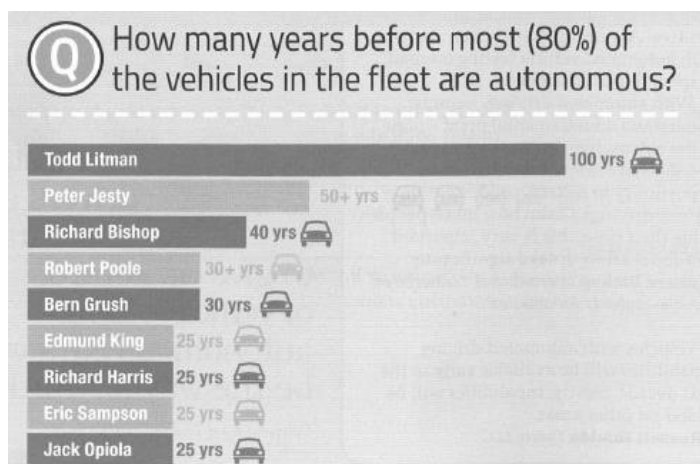


Figur 2.2 Blockdiagram över förarmodell för självstyrande bilar

När väntas självstyrande bilar finnas på marknaden?

Flera bilmärken inklusive Volvo väntas komma med självstyrande eller semi-automatiska modeller fram till år 2020. Regelverk skapas bl.a. i Kalifornien, som ger körtillstånd för automatstyrda bilar på allmänna vägar i liten skala från 2015. Försäkringspremierna är till en början skyhöga, 5 miljon dollar per fordon. Avgörande för utvecklingen är felsäker teknik, säkerhet och licensiering, juridiska frågor, ägar- och produktansvar, integritet, kundernas preferenser, inköps- och driftkostnader samt kompletterande utbyggnad av infrastrukturen.

I samband med 20-årsjubileet nyligen av Traffic Technology International (Aug/Sep 2014) har ledande experter fått frågan när 80% av fordonen är automatstyrda. Svaren skiljer sig kraftigt åt, från om 25 år till ända upp till 100 år.



Figur 2.3 Experters uppfattningar om introduktion av automatiska fordon

En expert menar att självstyrande bilar kommer att introduceras successivt på samma sätt som förbättrad navigation och fordonssäkerhet under de närmaste tjugo åren, men att det kommer att ta mycket längre tid innan självstyrande bilar är fullt operationella.

En annan expert tror att biltrafiken mer kommer att likna flyget. De flesta kommer att köra självstyrande bilar som används på prenumerationsbasis. En tredje menar att vi får en automatiserad chaufför, som släpper av passageraren ända framme vid destinationen. Parkeringsanläggningarna kommer att minska och flytta ut från centrumkärnorna.

En fjärde expert tror att trängseln så småningom kommer att minska. Trafiken kan också komma att öka när man kan göra andra saker i bilen än köra. Men effekten av automatiska bilar kommer att bli mycket liten under lång tid framöver.

Andra tror att antalet kollisioner kommer att minska till kostnaden av lägre hastigheter. Om bilarna delas i större utsträckning kan trängseln minska. Liknande synpunkter är att de kommer att reducera försäkringskostnaderna för småkollisioner och minska behovet av att äga bilen.

Bierstedt et al (2014) är en av flera framtidsbedömningar, som ger en bra översikt över möjlig utveckling och vilka faktorer som är avgörande för utvecklingen. Genomgången leder till följande bedömning av andelen självstyrande fordon i framtiden:

- 25% av fordonen blir automatiska genom samverkan mellan fordon (V2V) år 2035
- 50% av fordonen blir automatiska genom V2V år 2035-2050
- 75% AV-fordon senare än 2035 när självstyrning blir obligatoriskt eller det finns nya ägandeformer av prenumerationstyp
- 95% AV-fordon senare än 2040 när självstyrning blir obligatoriskt eller det finns nya ägandeformer av prenumerationstyp

Pinjari et al (2013) redovisar en liknande bedömning av experter inom IEEE² som menar att 75% av alla fordon kommer att vara självstyrande år 2040.

När man bedömer denna typ av kvalificerade gissningar bör man också tänka på att det skillnad mellan att en teknik finns på marknaden och att det ger påtagliga effekter i trafiken. Egna erfarenheter från DRIVE indikerar att det kan ta 5-10 år mellan prototyp och marknad och ytterligare 5-10 år mellan marknadsintroduktion och att 5% av antalet fordonskilometer använder sig av tekniken. Är förare inblandade kan det dessutom ta

² Institute of Electrical and Electronics Engineers

flera år innan tekniken används i alla trafiksituationer. Först då kan vi spåra påtagliga effekter på säkerhet och kapacitet i verklig trafik.

Eno (2013) bedömer att det tar fem år från introduktion av en teknologi tills den når massmarknaden.

Bierstedt et al (2014) redovisar även följande bedömning av på vilka vägar självstyrande fordon tillåts:

Tabell 2.1 Möjlig spridning av självstyrande bilar i olika trafikmiljöer

Typ av miljö	År
Separata körfält på motorvägar	2025-2030
Blandade körfält på motorvägar inkl ramper	2030-2035
Trafikleder med enbart bilar	2035-2040
Multimodala gator och korsningar	2040-2050
Fordon utan legal förare ombord:	
- privata gator och automatisk parkering på privata anläggningar	2040-2050
- allmänna gator och parkeringsanläggningar	Senare än 2050

3 Kolonnkörning

California PATH demonstrerade redan 1997 kolonnkörning med åtta bilar i San Diego. Bilarna körde med ett fixt avstånd (6,5 meter) vid alla hastigheter upp till 65 mph (105 km/h). Detta motsvarar 0,2 sek tidlucka. Kolonnerna separerades med ett avstånd på 60 meter.



Figur 3.1 Demonstration av kolonnkörning vid Demo '97 i San Diego

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. Verklig kapacitet 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.

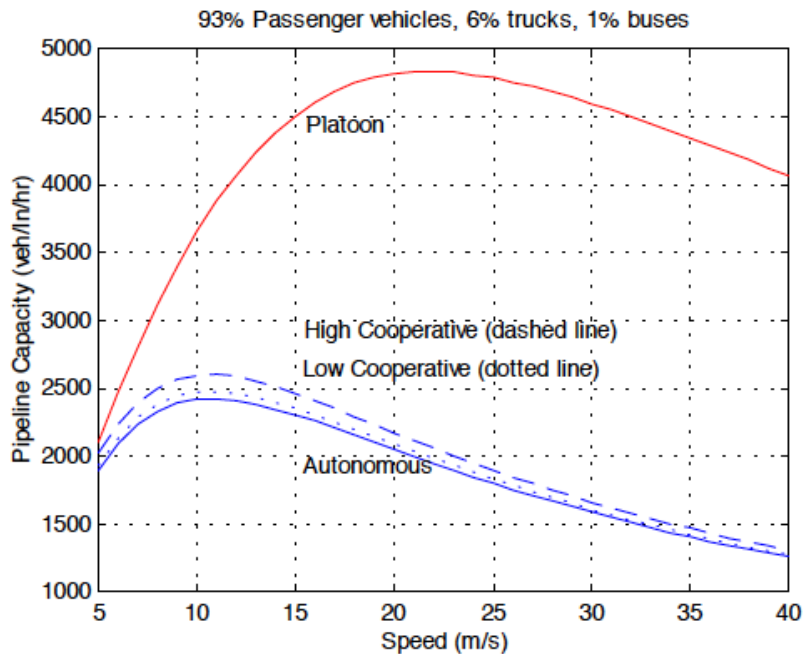
Förutom information från sensorer antas fordonen i kolonnen ha information om retardationen hos framförvarande fordon samt för kolonnledaren. Rörelser i kolonnen förstärks ju längre bak i kolonnen ett fordon ligger. Man behöver också ta hänsyn till variationer i bromsförmågan inom kolonnen. Som senare 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 kommunicerar 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 3.2 Kapacitet som funktion av hastighet för en typisk fordonssammansättning i tätort.

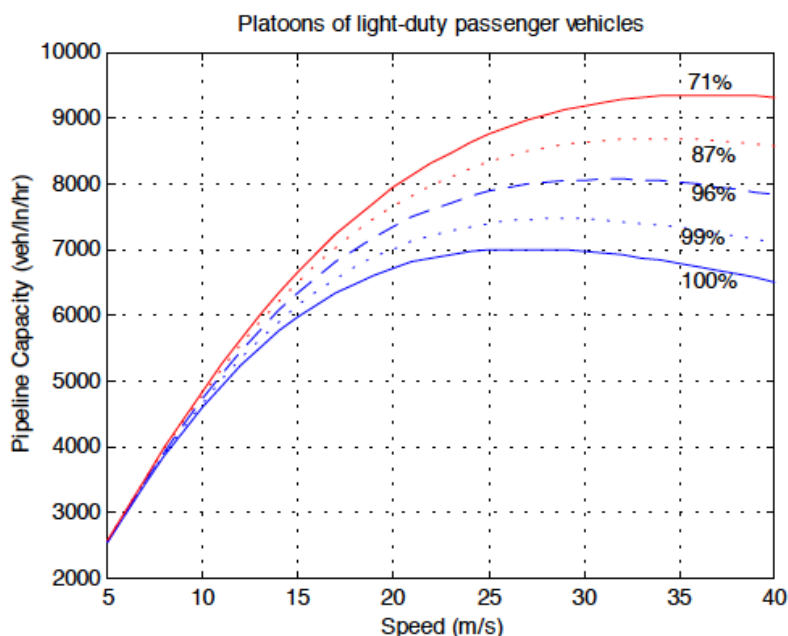
Maxkapaciteten kan med individuella fordon uppgå till ca 2500 fordon/h. Kolonnkörning ökar denna siffra dramatiskt. Som mest kan kapaciteten fördubblas. Förutsättningen är då att alla fordon kör i kolonn, vilket är orealistiskt åtminstone under de närmaste hundra åren.

Flera optimistiska tidningsartiklar pekar på att kapaciteten skulle kunna femfaldigas med automatiska fordon. Detta anges även i Transportstyrelsen (2014).

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

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. Det är även här svårt att tänka sig att detta är realistiskt under de närmaste hundra åren. Ingen hänsyn tas heller till variationer i efterfrågan, bildning och upplösning av kolonner eller effekter av körfältsbyten och begränsningar vid på- och avfarter.

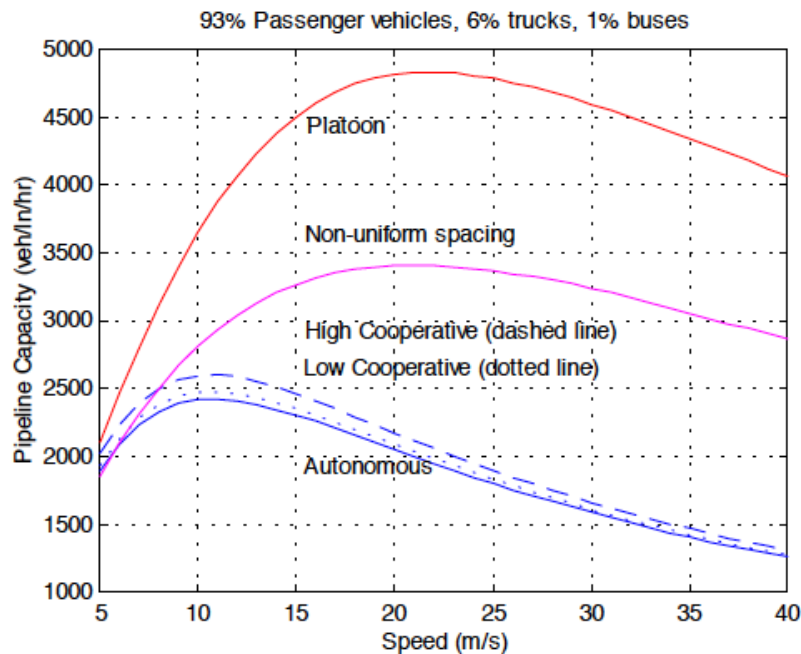


Figur 3.3 Känslighet av kapacitet för ett körfält mht andel tillåtna personbilstyper

Vid kolonnkörning har som redan sagts skillnader i bromsförmåga stor betydelse. Andelen lastbilar är därför avgörande. En kolonn, som enbart består av personbilar har enligt bilden ovan en maxkapacitet på 7000 fordon/h. Redan om lastbilsandelen uppgår till 20% har denna siffra 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.

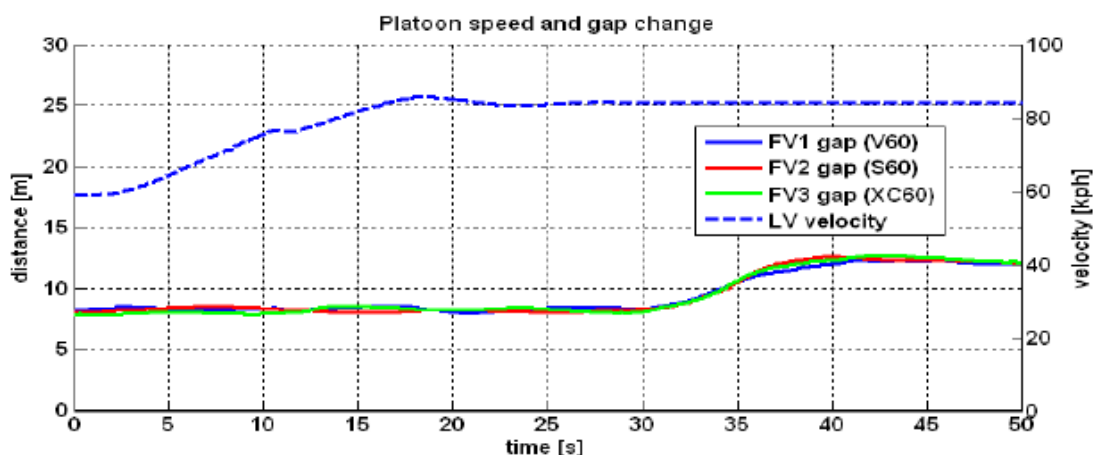
Med realistisk fordonssammansättning är maxkapaciteten ca 2500 f/h för individuella fordon och 4500 f/h vid kolonnkörning. Ökad kapacitet för individuellt styrda automatiska fordon skulle kunna åstadkommas om bromsförmågan för det egna fordonet och det framförvarande var känt. Det ger individuellt anpassade (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 3.4 Kapacitet hos ett körfält som funktion av hastighet vid typisk fordonssammansättning i tätort

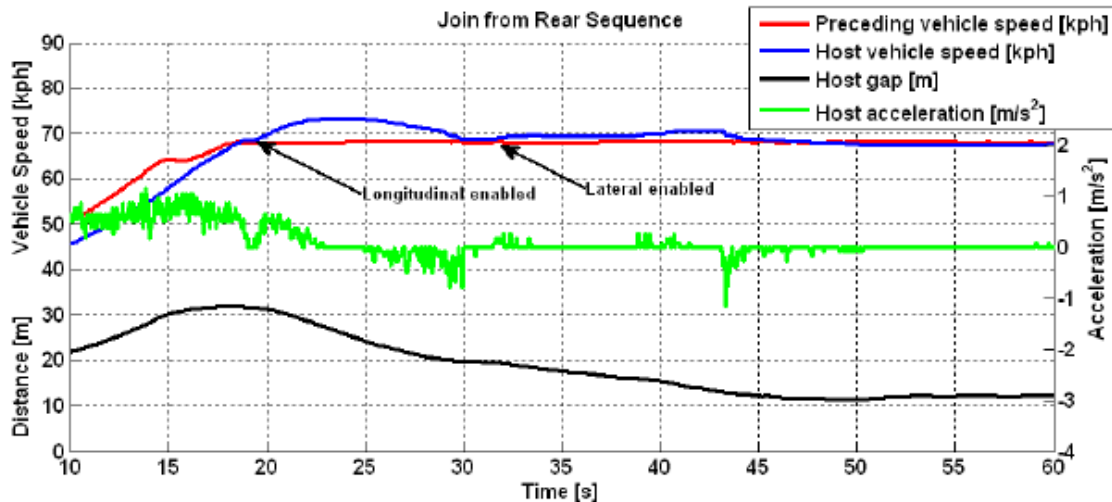
Chan et al. (2012) visar den mera näraliggande utvecklingen i det europeiska projektet SARTRE. Här består kolonnen av en manuell förare av det ledande fordonet medan alla följare består av automatiska fordon. Demonstrationssystemet bestod av upp till fem fordon, både personbilar och lastbilar och med 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 3.1). 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.



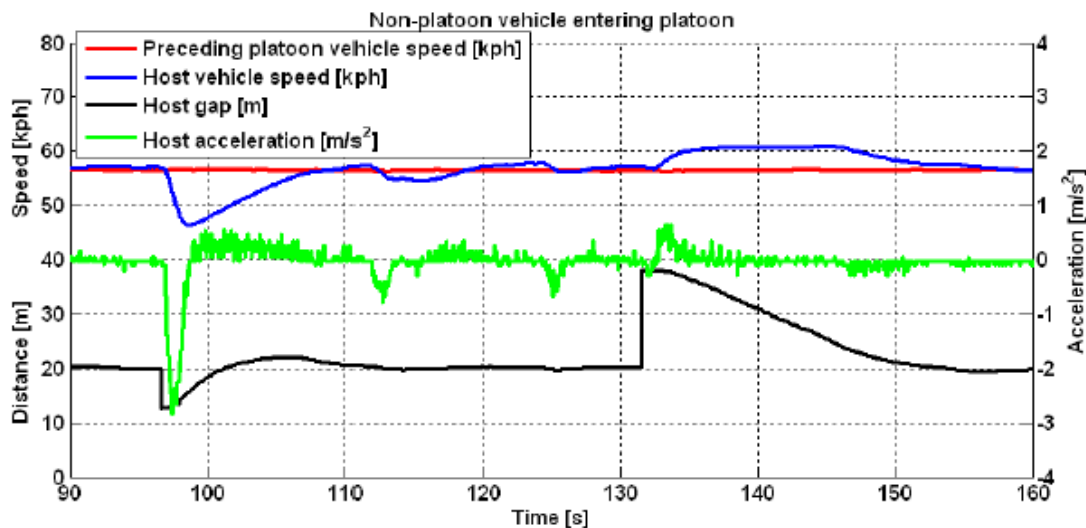
Figur 3.5 Hastighetsförändring följd av ändrad avståndshållning

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 3.6 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 3.7 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.

4 Hinder för utvecklingen

Bierstedt et al (2014) räknar upp ett antal faktorer som måste övervinnas för att visionen om självstyrande bilar ska utvecklas som optimisterna förutspått. Några av dessa kommenteras nedan.

Teknik

Googles team visade att konceptet med självstyrande bilar är möjligt, men det krävs ännu mycket utvecklingsarbete innan det kan vara var mans egendom. Kommunikationen mellan olika fordon och med infrastrukturen måste fungera. De futuristiska lösningar som finns på idéstadiet för stadstrafik kräver en perfektion, som ligger långt från dagens trafiksituation.

Pinjari et al (2013) lägger till att även om man redan visat att självstyrande bilar kan köra säkert på motorvägar, så är det inte säkert att tekniken är praktiskt möjlig på alla tänkbara vägar och alla möjliga trafikförhållanden. Dåligt väder (dimma, snö och kraftigt regn) innebär t.ex. en mycket stor utmaning för dagens sensorteknologi, vilket kraftigt försämrar körförmågan.

Kostnad

De första självstyrande bilarna kommer att vara dyra och bara överkomliga för personer med höga inkomster. Kostnaden kommer så småningom att minska men det kan ta tjugo år eller mer innan kostnaden är överkomligt för majoriteten av bilägarna.

Säkerhet

En större barriär kan bli typgodkännandet. En av fördelarna med självstyrande bilar är ökad säkerhet eftersom brister hos föraren elimineras (bristande synförmåga, långsamma reaktionstider, ouppmärksamhet, inverkan av alkohol och droger etc). Förarna gör å andra sidan taktiska bedömningar som ökar säkerheten. Tester är nödvändiga för att säkra att konsumenterna har fullt förtroende för tekniken. Man talar ibland om felsäkert som "sex sigma-nivån" dvs högst tre fel på miljonen.

Infrastruktur

I vissa fall krävs förändringar i infrastrukturen för att tillåta självstyrande bilar. Till en början väntas det krävas separata körfält eller separata anläggningar, där bilarna inte blandas med annan trafik. I USA är detta mer realistiskt, då t.ex. ett av sex körfält reserveras för självstyrande bilar. Det är mycket svårare i Sverige med t.ex. ett av tre körfält.

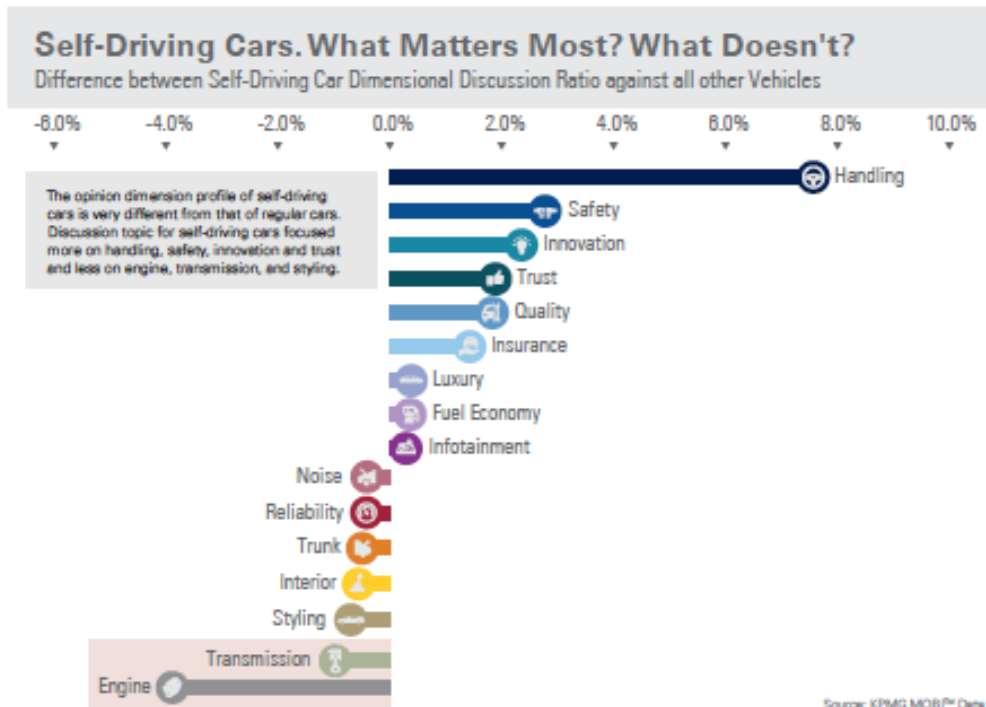
Juridiskt ansvar

En annan barriär är ansvarsfrågan i samband med att olyckor inträffar. Här måste ägar- och produktansvar förtydligas. Otydligt ansvar kan göra konsumenterna osäkra och hindra utvecklingen.

Preferenser

Konsumenterna preferenser är givetvis mycket viktiga. Självstyrande bilar kan ge ökad status, men det kan också vara så att konsumenterna inte vill släppa ifrån sig kontrollen av fordonen.

KPMG (2013) har genomfört fokusgrupper i tre amerikanska städer för att fånga konsumenternas attityder. Man konstaterar att prestationsförmåga och design spelar mindre roll för attityden till självstyrande bilar. Det är också stor skillnad mellan Los Angeles med mycket stora trängselproblem, Iselin i New Jersey med långa pendlingsavstånd och Chicago där kollektivtrafiken är väl utbyggd. Man är mest positiv i Los Angeles och mest skeptisk i Chicago.



Figur 4.1 Faktorer av störst betydelse för valet av självstyrande bil

Komfort

Komfort anges inte uttryckligen i enkäten ovan. Med självstyrande bilar ökar sannolikt komfortkraven, eftersom man inte styr själv utan är utelämnad till systemet, som i flyg och tåg. Le Vine et al (2014) har analyserat vad det skulle innebära om det skulle krävas att komfortnivån för självstyrande bilar skulle ligga i nivå med kraven på höghastighetståg.

- Max acceleration/retardation i längsled: 0,58/0,54 m/s²
- Max acceleration i tvärläge vid svängrörelser: 0,49 m/s²

Om signalstyrningen i korsningar är oförändrad så får de självstyrande fordonen inte färdas snabbare än 13 km/h för att inte hamna i 'dilemmazonen', dvs då det är svårt att avgöra om man hinner köra igenom korsningen innan det blir rött. Kapaciteten reduceras därigenom med 21%.

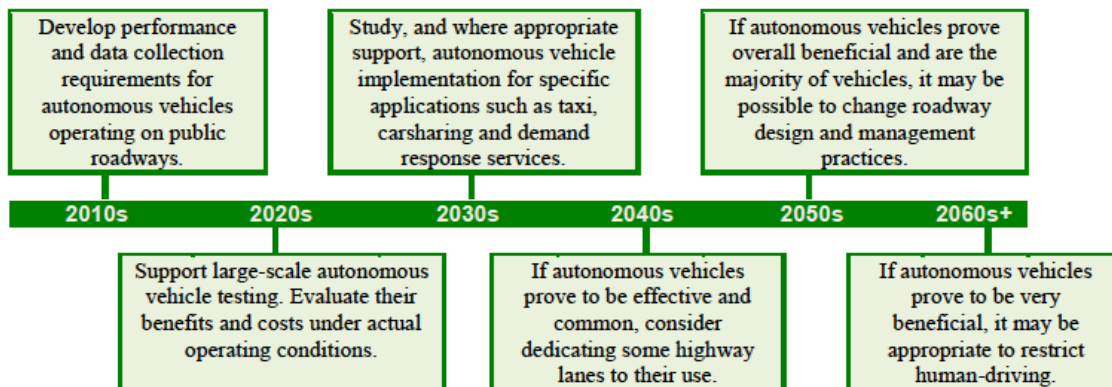
Anpassning av signalstyrningen så att den följer kraven på höghastighetståg innebär längre tid med orange och för utrymning (ca 12 resp. 10 sekunder). Kapaciteten minskar då med 46%.

Om man dessutom antar att AV-fordonet måste anpassas till att ett manuellt fordon närsomhelst bromsas med maximal bromsförmåga, blir kraven ännu större. Denna begränsning minskar kapaciteten med 54%.

Trafikplanering

Litman (2013)³ har funderat vad utvecklingen har för konsekvenser för trafikplaneringen. En del fördelar (högre hastighet, minskad trängsel och automatstyrda korsningar) kräver särskilda körfält för självstyrande fordon. Detta kommer sannolikt att leda till debatt om rättvisa och kostnadseffektivitet, vilket kan göra mänskliga förare frestade att använda dessa körfält t.ex. för att följa tätt inpå en kolonn och därmed introducera nya säkerhetsrisker.

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.



Figur 4.2 Behov av trafikplanering under introduktionsförloppet för självstyrande bilar

Litman (2013) menar med exempel tagna från bilindustrin och bankväsendet att utvecklingen snarare kommer att bli en evolution än en revolution och att många andra externa faktorer är avgörande för samhällsutvecklingen. Det är till exempel svårt att tro att trafiktätheten kan öka väsentligt, att parkeringskraven kan sänkas väsentligt, att körfälten kan göras smalare och att trafiksignalerna kan tas bort innan de flesta fordon i trafiken är självstyrande.

Samspel mellan biltillverkare och myndigheter

Wagner et al (2014) har genomfört intervjuer med biltillverkare och myndigheter i USA.

Biltillverkarna är rädda för att regler och restriktioner för att köra med självstyrande bilar blir så strikta att detta hindrar utvecklingen. Samtidigt är man oroad för att någon mindre tillverkare av utrustning orsakar en allvarlig olycka, som skadar hela branschen. Man är särskilt oroad för att ansvarsfrågan kommer att utgöra ett hinder. Helst skulle man vilja få en del av ansvaret bortlyft, så som skett med vissa vacciner och privata flygplan.

Vissa biltillverkare var också oroad för cybersäkerheten, dvs. att fordonen skulle kunna bli hackade. Här tyckte flera att myndigheterna har en viktig roll för att organisera och lösa problemet. En annan fråga handlade om dataintegritet. Tillverkarna behöver data för att förbättra fordonssäkerhet, finjustera tekniken och avgöra ansvarsfrågan i samband med händelser. Reglerna måste vara tydliga så att såväl tillverkarnas som allmänhetens intresse tillgodoses.

En gemensam oro handlar om komplettering av infrastruktur, som ofta sker för långsamt för att driva på utvecklingen. Myndigheterna menar att redan nuvarande resurser är alltför knappa och kan svårtligen se hur ny infrastruktur och ökat underhåll till stöd för autonoma fordon kan finansieras. Biltillverkarna konstaterar därför att bilarna måste fungera väl såväl med som utan kommunikation med infrastrukturen.

³ En av experterna i Traffic Technology Internationals expertpanel ovan

Myndigheterna saknade tillräckliga motiv – ett Business Case – för sitt engagemang i utvecklingen. Man konstaterar att kommunikationsinfrastrukturen behöver utvecklas, men saknar beslutsunderlag för att gå vidare med investering i V2I-kommunikation.

Ett illustrativt exempel är diskussionen om självstyrande bilar potential när det gäller att minska trängseln. Biltillverkarna och myndigheterna har olika syn på detta och effekten är osäker. Både litteraturen och en del intervjuer indikerar att självstyrande bilar till en början kommer att styras med konservativa tidluckor, som leder till ökad trängsel. Det finns indikationer på stora vinster på lång sikt när det gäller ökad säkerhet och minskad trängsel med bevisen är svaga och kostnaderna är ännu inte klargjorda. En hel del ytterligare forskning krävs för att beslutsunderlaget ska bli tillräckligt övertygande.

5 Inverkan på resandet

Bierstedt et al (2014) diskuterar olika faktorer som kan leda till ökat eller minskat resande. Några av dessa redovisas nedan.

Erfarenheter

Om självstyrande bilar upplevs som mindre stressande kan man vänta sig att vissa grupper kommer att öka sitt bilresande. Detta kan också innebära att fler cyklister och kollektivtrafikresenärer åker mer bil. Uppgifter som kan upplevas som jobbiga är bl.a. ständig uppmärksamhet på vägen, ryckig körning vid tät trafik, frustrationer vid köer, hitta rätt väg och stillasittande. Tydliga förändringar nås dock ej förrän vid nivå 4, full självstyrning.

Trygghetskänsla

En rapport från KPMG skattar att 90% av alla olyckor skulle kunna elimineras med självstyrande fordon. Tidigare erfarenheter visar dock att trafikanterna riskkompenserar så att den resulterande effekten blir väsentligt mindre. Förväntningarna om stora kapacitetsvinster och stora säkerhetsvinster står delvis mot varandra. Även med lägre nivå på säkerhetsvinsterna kan man emellertid vänta sig att köer i samband med olyckor minskar, vilket ger utrymme för en något ökad mobilitet.

Fordonskostnader

Förväntade ökade kostnader för självstyrande bilar kan påverka utvecklingen på olika sätt. Om säkerheten ökar kan detta leda till minskad fordonsstorlek och lättare material, vilket kan kompensera för den ökade teknologikostnaden. Kraftigt ökad säkerhet kan också ge lägre försäkringspremier. Om ändå kostnaden blir högre, kan utvecklingen mot ökad 'car-sharing' ta fart, vilket kan minska bilanvändningen.

Äldre, handikappade och berusade

Den intressantaste utvecklingen som kanske kan påverka bilresandet mest är när tidigare icke-bilister får tillgång till bil. Det gäller bl.a. äldre, handikappade och barn. Bierstedt et al (2014) nämner inte berusade, som också måste vara en grupp som är av intresse i detta sammanhang.

I Bilaga redovisas en sammanfattande tabell från Bierstedt et al över faktorer som talar för att antal fordonskilometer ökar eller minskar som följd av utvecklingen mot självstyrande bilar.

Sammanfattningsvis bedömer Bierstedt et al att med 50% marknadspenetration kommer antalet fordonskilometer att öka med 5 till 20%. När marknadsandelen så

småningom når 95% och det blir tillåten att köra robotbilar utan körkort, så kan trafikarbetet mätt i fordonskilometer öka med så mycket som 35%.

Pinjari et al (2013) diskuterar också livsstilsfrågor som kan påverka resandet.

Markanvändning

En av fördelarna med självstyrande bilar på lång sikt är att det inte krävs någon mänsklig förare. Tiden bakom ratten kommer då att upplevas som mindre onyttig. Det skulle kunna innebära att tiden utnyttjades för produktivt arbete eller fritidssysselsättningar. Konsekvensen av detta kan bli att man bosätter sig längre från sitt arbete och vi får en ny våg av utglesning. Å andra sidan kan frigörande av parkeringsytor innebära en fortsatt trend mot mer kompakta städer. Det är därför oklart om självstyrande bilar på sikt ger glesare eller tätare städer.

Större bilar

Tvärtemot Bierstedt et al ser Pinjari et al en utveckling mot större bilar. Skälet är att individer önskar göra andra aktiviteter i bilen än bara sitta. Ökat utrymme behövs för TV, datorer m.m. Det finns t.o.m. tankar på sängplats och toalett i bilen, som vi idag ser på husbilar. Om denna trend visar sig vara korrekt, kan det i sin tur komma att påverka körfältsbredd, parkeringsutrymme och bränslekonsumtion.

Alternativa ägandeformer

Ett flertal faktorer kommer att påverka hur bilägandet utvecklas mot personligt ägande, delat ägande i form av 'car sharing' eller taxi eller en kombination. En del konsumenter är ovilliga att släppa kontrollen över fordonet medan andra vill utnyttja möjligheten att äga självstyrande bilar utan att dela dem med andra. Det kan också komma att utvecklas nya serviceformer vid sidan av hyrbilar, där man betalar enbart vid utnyttjandet.

Pinjari et al skissar på två motstridiga utvecklingsscenarier:

Scenario 1: Självstyrande bilar ger en skjuts uppåt när det gäller den privata bilmarknaden. Resandet kommer då att öka och även reslängderna.

Scenario 2: Självstyrande bilar blir dyrare och ger en skjuts uppåt när det gäller bildelning. Bilen används mer behovsstyrt, vilket begränsar resandet.

Det finns flera exempel på reglertekniska utopier som bygger på automatiska fordon. Burns et al (2013) kommer fram till att fordonskostnaderna skulle kunna minskas med 75% med samutnyttjade AV-fordon. Fagnant och Koppelman (2013) menar att ett enda delat AV-fordon skulle kunna ersätta 11 personbilar. Problemet med dessa utopier är att de inte hanterar organisatoriska, finansiella och sociala aspekter, som antagligen kommer att vara avgörande för utvecklingen. Hushållen kan behöva sin personbil för inköps-, fritids- och semesterresor, inte bara bostads-arbetsresor. Det ligger därför närmast till hands att anta att det är bilpooler, hyrbilar, taxi och färdtjänst, som är de första utnyttjarna av AV-fordon.

För att systemet ska fungera väl krävs avancerade algoritmer, som minimerar väntetider till ett par minuter och som hittar bästa resväg. Denna typ av effektiviseringar, som ibland kallas systemoptimum, skulle till viss del vara möjliga även med dagens manuellt styrda fordon, om man kunde bortse från människors fria val och egna preferenser. Exempelvis skulle de avancerade algoritmerna redan idag i större utsträckning kunna utnyttjas av färdtjänst och skolbussar. Ofta förekommande klagomål tyder dock på att servicenivån för denna typ av tjänster ligger långt ifrån de utopiska antagandena.

Ett svenskt bidrag till diskussionen görs i Burghout et al (2014). Det handlar då om självstyrda taxibilar med möjlighet att dela taxi. Man antar därvid att man accepterar upp till 10 min tidsfönster vid beställning av taxi och upp till 30% ökad restid för att ta upp andra passagerare. Tid för lastning och lossning uppgår till 3 min. Referenshastigheten antas vara 20 km/h i hela nätet.

Resultaten visar att detta skulle leda till att trafikarbetet minskade med 11% och antalet fordon som behövdes för detta resande endast skulle bli 5% av antalet i referensscenariot med privat ägda manuellt styrda fordon. Bilarna skulle merutnyttjas och bara vara parkerade 45 av tiden.

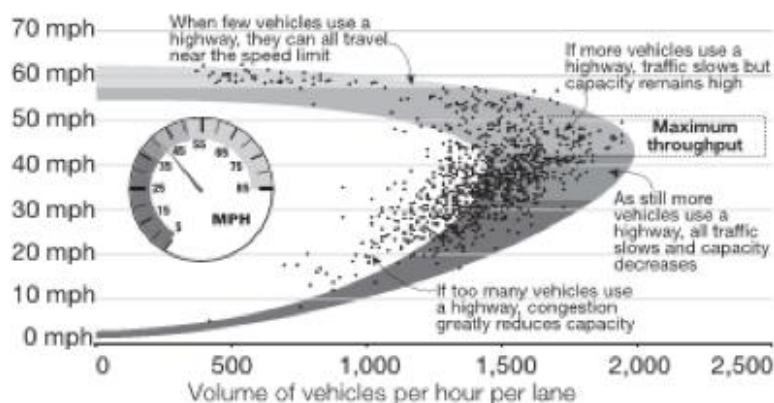
6 Inverkan på motorvägskapacitet

Pinjari et al (2013) konstaterar att trafikbeteendemodeller måste justeras vid introduktion av självstyrande fordon. Trafikflödesanalys måste inkorporera car-following-modeller som ger realistiska körmönster för AV-fordon. Idag anses mindre än en sekunds tidlucka vara en stor säkerhetsrisk. Vid kolonner kommer 0,1-0,5 sek tidlucka att vara normalt.

Andra förändringar i trafikmodeller:

- Körfältsbredd. Körfälten kan göras smalare med AV, som har funktioner för körfältshållning (lane keeping support)
- Acceleration/deceleration. Andra värden med AV. Kraftigare nödbromsning.
- Växlingsbeteendet vid påfarter/avfarter ändras. Särkilt om kolonner bildas och upplöses
- Korsningsbeteende. Algoritmer vid trafiksignaler bör kunna innebära mindre förlorad tid vid start av gröntid och förändringar i car-following-beteende
- Definitionen av servicenivå (LOS) som avser bekväm tidlucka och baseras på flöde måste göras om för att återspegla nya komfortnivåer

Bierstedt et al (2014) visar hur självstyrande bilar kan påverka motorvägskapaciteten. Diskussionen nedan avser individuellt styrda fordon, inte kolonner, som behandlas i kap. 3. Med kapacitet menar man fordon per timme per körfält. Ett typiskt värde som ofta anges för dagens trafik är 2000 fordon/h. Som nämndes tidigare är detta uppräknande värde från 5-minutersperioder eller kortare. Verkligen genomströmning per timme är ofta ca 15% lägre.



Figur 6.1 Samband mellan hastighet och trafikvolym

Bilden visar hur trafikvolymen ökar från 0 till 2000 f/h vid den optimala fordonstätheten. Ökar tätheten ännu mer minskar trafikvolymen igen tills stillastående kö uppstår. Då är trafikvolymen och hastigheten åter noll.

Självstyrande bilar kan påverka sambandet olika mycket beroende på bl.a. nedanstående faktorer:

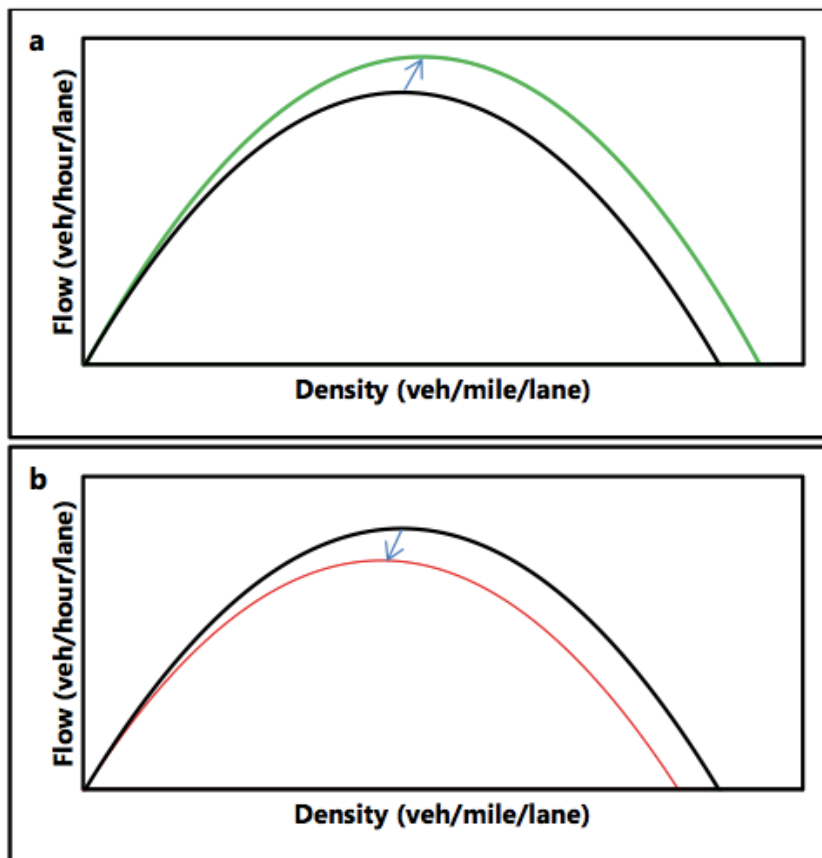
- Fordonsflottans sammansättning
- Car-following-parametrar
- Omfattning av tät trafik och trängsel
- Samverkande fordon

Trafiksimuleringar har gjorts av flera forskare för att bedöma hur andelen AV-bilar påverkar kapaciteten med skilda resultat:

- Davis (2005) fann att 50% samverkande adaptiva farthållare (CACC) gav effektivare trafik
- van Arem (2006) menar att andel AV-bilar måste överstiga 40% innan några väsentliga effekter kan spåras
- Tientrakool (2011) kom fram till att kapaciteten påverkas lite så länge inte andelen CACC överstiger 85%
- Shladover (2012) rapporterar att kapaciteten förbättras linjärt från 2000 f/h till 2300 f/h vid 50% CACC, men växer sedan snabbare och når 4000 f/h vid 100%.
- Jones och Philips (2013) kommer fram till att positiva effekter på flödets stabilitet och kapacitet nås först när andelen CACC överstiger 40%

Sammanfattningsvis tycks signifikanta effekter av adaptiva farthållare som innefattar distanshållning samt kommunikation och samverkan mellan fordon kunna förväntas när andelen CACC överstiger 50%.

Variationer i önskemål om hastighet, inbromsning och distanshållning hos mänskliga förare begränsar kapaciteten. Om AV-bilar kommer att innebära mindre variation och kortare tidsavstånd mellan bilar så bör detta leda till att högre kapacitet är möjlig, vilket illustreras i nästa bild (*Figur 6.2a*). Men det kan istället innebära att hastigheten reduceras för att uppnå ett mer stabilt flöde. Då kan kapaciteten vid flaskhalsar begränsas (*Figur 6.2b*) och fördröjningen öka.



Figur 6.2 Inverkan av AV-bilar på flöde

Förutom tidsavstånd och hastighet kan AV-bilar minska störningar och öka homogeniseringen i flödet. Om fordonen kan programmeras så att minst två av de tre faktorerna hastighet, tidsavstånd och homogenitet effektiviseras, så kan man vänta sig kapacitetsökningar.

I Sverige får vi lära oss i körskolan att minst ha en tidlucka på 3 sek, men detta överensstämmer sällan med praxis. Normala tidluckor med mänskliga förare i tät trafik innebär en minimitidlucka på 1,2 sek i Sverige och 0,8 sek i Nederländerna. De första AV-bilarna från Toyota och Google var försiktigt programmerade med längre tidluckor (över 2 sek) än i normaltrafik.

Shladover et al (2012) fann att förare som konfronteras med AV-bilar tenderar att välja tidluckor nära deras eget beteende och inte de mer aggressiva tidluckor på 0,5 sek eller mindre som krävs för att nå större kapacitetsvinster. När de senare övertygats om att bilen kör tryggt i en kolonn, ökar benägenheten efterhand att välja kortare tidsavstånd.

AV-bilar kan således öka kapaciteten på en sträcka genom kortare tidsavstånd. Om bilarna dessutom kan kommunicera med varandra kan effektiviteten öka i samband med vävning vid trafikplatser. Ökad säkerhet innebär också färre olycksrelaterade störningar och mindre köer.

I Bierstedt et al (2014) görs experiment med olika antaganden för att se hur AV-bilar kan påverka fördröjningar på motorvägar. VISSIM-simuleringar görs för en motorvägssträcka, som också innehåller två påfarter och två avfarter. Car-following-modellen ändras på olika sätt för att beakta olika programmering av distanshållningen hos bilar med ACC. Konservativa antaganden (som är mer säkerhetsorienterade) med längre

tidluckor (1,2 sek) ger sämre resultat än för nuvarande trafik (0,9 sek), medan mer aggressiva antaganden (0,5 sek) ger förbättringar.

Tabell 6.1 VISSIM-resultat för en motorvägssträcka

PRELIMINARY VISSIM SIMULATION RESULTS – FREEWAY PERFORMANCE WITH CONSERVATIVE AND AGGRESSIVE ACC SCENARIOS			
Performance	Base	50% Conservative	50% Aggressive
Total Delay [hours]	39	80	21
Average Delay per Vehicle [seconds]	16	34	9
Total Travel Time [hours]	331	370	312

Tabellen visar på ett tydligt sätt att det är nödvändigt med aggressiv programmering av AV-bilarna för att vinsterna ska bli påtagliga. I en senare simulering kommer även Bierstedt et al (2014) fram till att med en mellanform mellan konservativ och aggressiv programmering av distanshållning (0,8 sek), krävs mer än 50% AV-fordon för att trängseln ska minska.

Slutsatsen är alltså att kapaciteten kanske, men inte helt säkert ökar med AV-fordon. I Bilaga återges Bierstedts et al (2014) bedömning av faktorer som talar för ohämmad optimism och mer försiktig entusiasm när det gäller ökad kapacitet på motorvägar. Självstyrande autonoma bilar kan förväntas införas på marknaden inom en 25-årsperiod. Stora kapacitetsvinster kräver dock att bilarna är uppkopplade och samverkande. Denna utveckling kommer att ske mycket långsammare. Vissa tillämpningar kräver t.o.m. att alla inblandade bilar har V2V-teknologi.

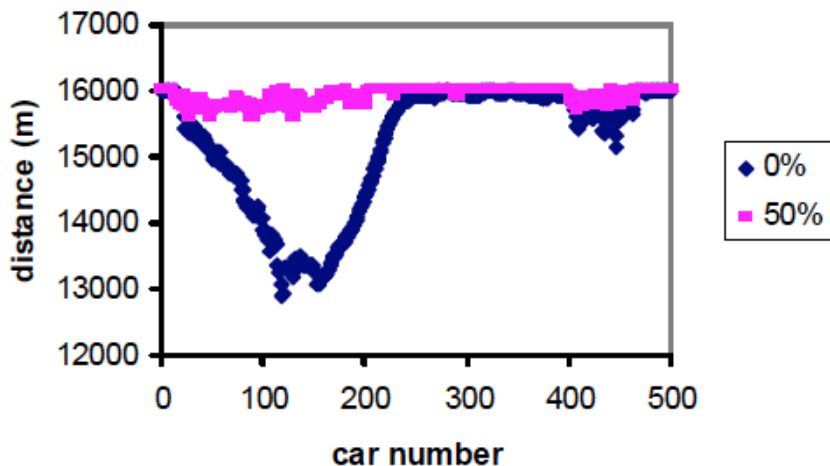
7 Inverkan av vävningssträckor

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 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 effektiva. 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 7.1 (rosa linje).



Figur 7.1 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.

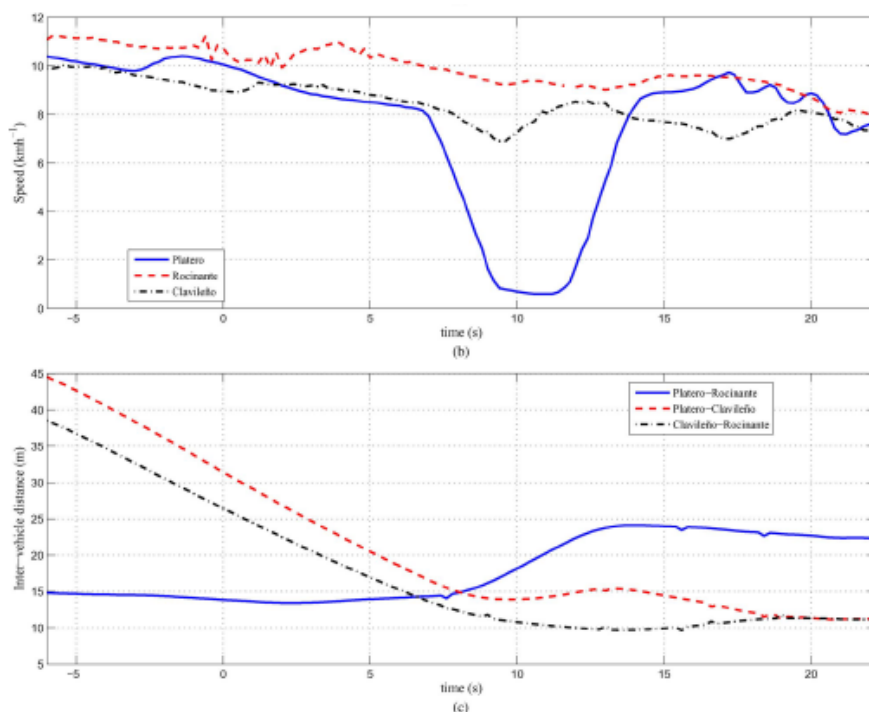
Ett automatisk vävningssystem utvecklas med två huvudmål:

- 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 7.2 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 AV-fordon. Utvecklingen i introduktionsskedet 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 Milanés lösning kanske kan fungera även om vissa fordon körs av mänskliga förare, men då kanske den förväntade kapacitetsökningen blir betydligt mer begränsad.

8 Inverkan på stadstrafik

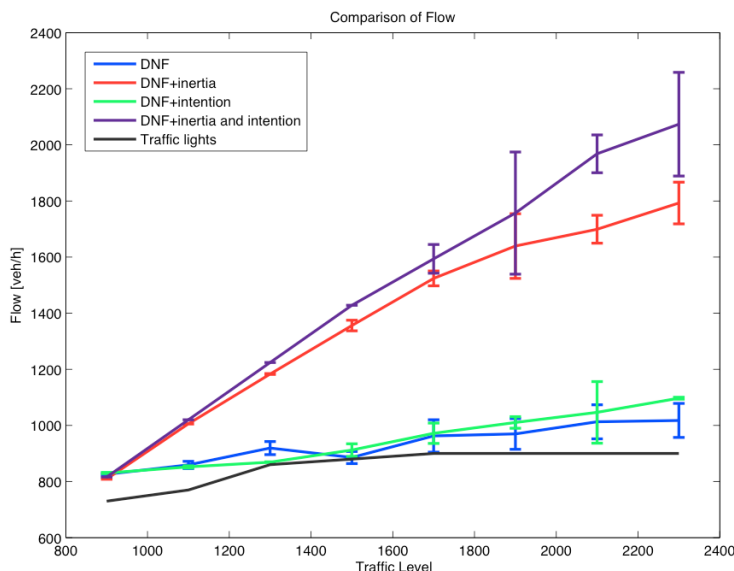
Pinjari et al (2013) utgår från dagens trafiksignaler och konstaterar att många av dessa i USA är förprogrammerade för situationen under rusningstid. Ofta är detta inte optimalt under övrig tid. Det finns redan självreglerande intelligens i trafiksignaler, men med självstyrande fordon som kan kommunicera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

Eno (2013) pekar på att fördelarna med AV-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, vilket sannolikt inte blir aktuellt inom hundra år.

Fordonen 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 8.1 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.

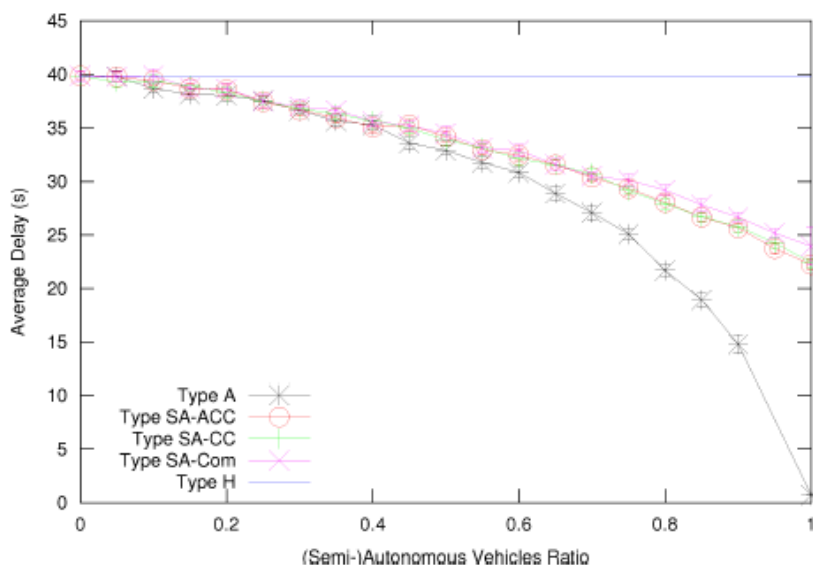
Ett annat exempel på tänkbara framtida futuristiska styralgoritmer framgår av Au et al (2014). Här låter man AV-fordon få fri lejd genom korsningen även när signalerna står på rött. I detta fall antas att det finns en blandning av manuellt styrda fordon, semi-automatiska fordon och helautomatiska fordon. I ett tidigare arbete har man visat att effekten av reglertekniska styralgoritmer går förlorad 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 8.2 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 AV-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 AV-fordon.

9 Underlag för utformning av scenariostudier

Möjlig fordonsutveckling

Av litteraturen att döma kan en bästa gissning vara:

- 25% självstyrande bilar år 2030, 50% år 2050 och 75% år 2060

Vid 25% tillåts självstyrande bilar på separata körfält på motorvägar, men också i blandad trafik på motorvägar. Car-following (distanshållning) är försiktigare än för nuvarande trafik. Minsta tidlucka ligger på 1,2 sek mellan fordonen.

Vid 50% tillåts självstyrande bilar även på övriga huvudtrafikleder. Distanshållningen ligger mellan försiktig och aggressiv (0,8 sek).

Vid 75% tillåts självstyrande bilar överallt och det är också tillåtet att köra utan körkort. En mer aggressiv car-following tillåts med en tidlucka på 0,5 sek.

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 tidluckan 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.

Trafiktekniska problem

Vi har hittills 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 AV-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%. De högre siffror som nämnts avser speciella förhållanden på separata körfält på långa motorvägssträckor. 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.

Tänkbara scenarier för fortsatt analys

Intressanta frågor för scenariostudier kan i detta läge vara att undersöka

- vilka flaskhalsar som förväntas finnas kvar år 2030 resp. 2050
- om självstyrande bilar minskar eller flyttar flaskhalsarna
- om självstyrande bilar påverkar behovet av att reglera efterfrågan på andra sätt t.ex. genom påfartsreglering och trängselskatter

Ett scenario skulle kunna utgå från försiktig inställning av distanshållningen, som representerar inledningsfasen med låg andel AV-bilar.

Ett ytterligare scenario skulle kunna utgå från effektiv (aggressiv) inställning av distanshållningen, som representerar mognadsskedet, med hög andel AV-fordon och hög andel kolonnfordon.

Som en del i den fortsatta analysen av kapacitetseffekter av självstyrande fordon bör litteraturen fördjupas för att kunna göra så realistiska antaganden som möjligt när det gäller de tre huvudproblemen ovan dvs. packning och lossning av kolonner, vävning och växling vid trafikplatser samt korsningar i stadstrafik.

Vi föreslår att Trafikanalys medverkar genom att kontakta parterna i Drive Me-projektet, dvs Volvo Car Group, Trafikverket, Transportstyrelsen, Lindholmen Science Park och Göteborgs Stad. Dessa bör tillfrågas vilka lösningar de ser på huvudproblemen ovan (kolonnbildning, trafikplatspåfarter och korsningar) och gärna peka på litteratur som kan belysa frågeställningarna.

Referenser

- Ohmar Ahmad and Huidi Tang (2003) A Controller for Merging Traffic onto a Highway.
- Bart van Arem, Cornelie J.G. van Driel, and Ruben Visser (2006) The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics; *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, vol 7. No 4, December 2006.
- Tsz-Chin Au, Shun Zhang and Peter Stone (2014) Autonomous Intersection Management for Semi-Autonomous Vehicles. *In Handbook of Transportation*.
- 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*.
- Wilco Burghout, Pierre-Jean Rigole and Ingmar Andréasson (2014) Impacts of Shared Autonomous Taxis in a Metropolitan Area. *Royal Institute of Technology, Stockholm*.
- Lawrence Burns, William Jordan and Bonnie Scarborough (2013) Transforming Personal Mobility. *The Earth Institute, Columbia University, New York*.
- 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*.
- Eno Center for Transportation (2013) Preparing a Nation for Autonomous Vehicles. Opportunities, Barriers and Policy Recommendations.
- Daniel Fagnant and Kara Kockeman (2013) Environmental Implications for Autonomous Shared Vehicles Using Agent-Based Model Simulation. *University of Texas at Austin, USA*.
- Alain Girault (2003) A Hybrid Controller for Autonomous Vehicles Driving on Automated Highways.
- Stephen Jones and Brian H. Philips (2013) Cooperative Adaptive Cruise Control: Critical Human Factors Issues and Research Questions. *Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*.
- KPMG (2013) Self-Driving Cars: Are We Ready?
- Scott Le Vine, Alireza Zolfaghari, John Polak and Stanley E. Young (2014) The Tension Between Autonomous Cars' Impacts on Junction [Intersection] Capacity and Occupant Comfort . *Imperial College, London*.
- Perry Y. Li, Roberto Horowitz, Luis Alvarex, Jonathan Frankel and Anne M. Robertson (1997) An Automated Highway System Link Layer Controller for Traffic Flow Stabilization. *Transpn Res.-C, Vol 5, No 1*.

- Todd Litman (2013) Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implementation for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute, Canada
- 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.
- NY Daily News: Autonomous cars could nearly quadruple highway capacity, says study
- Abdul Rawoof Pinjari, Bertho Augustin and Nikhil Menon (2013): Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles: An Assessment. *Centre for Urban Transportation Research. Florida, USA.*
- Steven E. Shladover (2012) Highway Capacity Increases from automated Driving. California PATH Program.
- Patcharinee Tientrakool, Ya-Chi Ho and Nicholas F. Maxemchuk (2011) Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance. *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*.
- Traffic Technology International (2014) The Road to 2034. *August/September 2014.*
- Transportstyrelsen (2014) Litteraturstudie. Autonom körning – HF/MTO.
- Jason Wagner, Trey Baker, Ginger Goodin and John Maddox (2014) Automated vehicles: Policy implications scoping study. *Texas A&M Transportation Institute, USA.*

Bilaga

Faktorer som talar för ökat och minskat resande enligt Bierstedt et al (2014)

TABLE 1.
ELEMENT VARIATIONS ON VMT IMPACTS

Element	Reasons for VMT increase	Reasons for VMT decrease
Driver Experience	Levels 3 and 4 allow for multi-tasking and improved riding position Change in passenger layout and seating configuration Reduced level of stress for "driver"	Change in driver experience is not significant at Level 3, and stress levels remain constant due to continued congestion
Mode Split Variation	Cost per mile rivals transit and time-value equation shifts toward autonomous vehicle instead of transit/bike/walking	Cost per mile increases significantly, placing more value on transit and other modes
Safety	Safety improvements reduce need for added vehicle weight, reducing fuel need and cost of driving Safety improvements improve roadway operation with reduction in incidental congestion Increased perception of safety relative to other modes results in higher vehicle usage	Risk compensation leads to offsetting increase in other accidents Shared liability in Level 3 requires vehicle to operate "too safely", negating improved roadway operational benefits Uncontrollable factors such as debris or weather place a limit on improvements to safety and reductions in vehicle safety features for high-speed operation
Vehicle Cost of Ownership	Decreased vehicle size due to safety improvements decrease vehicle cost Reduction in insurance premiums	Costs for technology increase, leading to continued downward trend in ownership rates
Previous Non-Drivers	Added population of new drivers who can afford the technology (elderly, disabled)	Technology is still out of reach for low-income and many current non-drivers
Regional Variations	Rural and smaller urban areas provide no alternative to autonomous vehicle travel	Robust transit network works in conjunction with autonomous vehicle technology to solve "last-mile" problem

Faktorer som talar för ohämmad optimism resp. måttlig entusiasm när det gäller motorvägskapacitet och trängsel enligt Bierstedt et al (2014)

EFFECTS OF AUTONOMOUS VEHICLES ON FREEWAY CAPACITY AND CONGESTION		
	Reasons for Optimism	Reasons to Reign in Enthusiasm
Capacity Benefit Potential	When fleet mix approaches 100% (V2V ¹⁷), freeway lane capacity could reach 4,000 vphpl, double the present capacity	Capacity benefits are likely to occur only on freeways initially (pre-2030) and will only begin to be apparent when the fleet mix is at least 40% (V2V ¹⁸) autonomous
Driver Acceptance	Drivers will be convinced through experience that they are safe in closely spaced automated freeway platoons	Driver comfort with close vehicle following headways is a critical concern. In tests of ACC, most chose headways that closely matched their own driving behavior, resulting in little capacity benefit, though CCAC may change this
Early Wins	With high fleet penetration, efficiency and capacity of weaving at ramp junctions and adjacent freeway segments could be markedly improved, even before headway functions are perfected for line haul freeway segments.	On line-haul freeway segments, our VISSIM tests indicate that capacity of freeway segments would be significantly reduced with conservative AV parameter programming. Capacity benefits at locations other than freeways may be many decades away.
Speed of Adoption	Given the high stakes ¹⁹ , interests including the automakers, Google and other tech companies and universities are ambitiously refining the technology and machine-learning algorithms. They may achieve our aggressive parameter capabilities and high fleet penetration sooner than our projected 2035+ time frame. Per our VISSIM tests, aggressive programming could reduce vehicle delays by about 45% once half the fleet is operating autonomously.	Even with higher-level technology capabilities vehicle occupants may not become comfortable with aggressive performance. Intermediate parameter settings require 75% autonomous fleet mix to achieve moderately high capacity benefit (25-30%).