

Självkörande bilar Rapport – utveckling och möjliga effekter 2015:6

Självkörande bilar Rapport
– utveckling och möjliga effekter 2015:6

Trafikanalys

Adress: Torsgatan 30

113 21 Stockholm

Telefon: 010 414 42 00

Fax: 010 414 42 10

E-post: trafikanalys@trafa.se

Webbadress: www.trafa.se

Ansvarig utgivare: Brita Saxton

Publiceringsdatum: 2015-03-30

Förord

På många håll i världen pågår för närvarande forskning och demonstration av koncept för självkörande fordon. Förväntningar är stora att detta ska bidra till förbättrad säkerhet, mindre emissioner och ökad kapacitet i vägnätet. En central fråga när det gäller självkörande fordon är i vilken utsträckning dessa kan bidra till att lösa förväntade framtida kapacitetsproblem på det svenska vägnätet.

Under hösten 2014 initierade Trafikanalys två studier på temat självkörande fordon, med fokus på personbilar. Det första projektet syftade till att undersöka vilka möjligheter som finns att följa utvecklingen av den svenska fordonsflottan i termer av automatisering. Det andra projektet syftade till att undersöka hur en automatiserad fordonsflotta kan påverka den framtida kapaciteten i det svenska vägnätet. Ambitionen har varit att en ökad kunskap kring utvecklingen och dess potentiella effekter ska bidra till goda transportpolitiska beslut som maximerar nyttan och minimerar negativa konsekvenser av teknikutvecklingen.

Projektledare och författare till rapporten har varit Johannes Berg.

Stockholm i mars 2015

Brita Saxton

Generaldirektör

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning	7
1 Inledning.....	9
2 Vad är självkörande fordon?	11
3 Forsknings- och utvecklingsläget	17
3.1 Internationellt.....	17
3.2 Möjliga utvecklingsscenarier	19
3.3 Potentiella hinder	23
3.4 Möjliga konsekvenser för resandet	24
4 Självkörande fordon och kapacitet	27
4.1 Motorväg	27
4.2 Stadstrafik	31
4.3 Resultat av simuleringar.....	33
5 Slutsatser	39
6 Referenser	43

Sammanfattning

Utvecklingen kring självkörande fordon går fort och flera bilmärken (inklusive Volvo) väntas ha självkörande eller semi-automatiska modeller på marknaden redan år 2020. Denna utveckling ställer krav på myndigheter att hänga med i utvecklingen. För att öka kunskapen kring denna utveckling initierade Trafikanalys under 2014 två studier på temat självkörande fordon. Dessa studier syftade dels till att försöka ge en bild av vilka möjligheter som finns att systematiskt följa utvecklingen och dels till att undersöka vilka konsekvenser en ökad automatisering av personbilsflottan kan få för kapaciteten i det svenska transportsystemet.

I dagsläget saknas en vedertagen definition av självkörande fordon, såväl nationellt som internationellt. Det finns inte heller någon globalt accepterad taxonomi för automation i fordon. Idag används många olika termer som till exempel; självkörande, förarlös, intelligent och robotisk, för att beteckna olika typer av manövreringskontroll som utförs av ett tekniskt system. Bristen på en vedertagen definition av fordonsautomation bidrar till att det är problematiskt att följa fordonsflottans utveckling avseende automatisering. Trots detta anser vi att det inom ramen för Trafikanalys nulägesbeskrivningar av fordonsflottan bör finnas en ambition att på kort sikt redovisa hur stor andel av fordonsflottan som är utrustad med vissa automatiska funktioner. Detta bör ge en grov bild av utvecklingen tills det finns en mer omfattande vedertagen klassificering.

Utgångspunkten för denna studie har varit att undersöka hur ett genomslag av självkörande fordon kan komma att påverka kapaciteten i det svenska transportsystemet. Av litteraturen på området att döma kommer det att dröja lång tid innan självkörande fordon har fått så pass stort genomslag att de får genomgripande konsekvenser för hur vi använder transportsystemet och planerar våra städer. Litteraturstudien ger inte heller någon enhetlig bild av hur självkörande fordon kan tänkas påverka hur vi reser. Den pekar istället på att synen på bilägande i framtiden sannolikt kommer att spela en viktig roll för hur självkörande teknik påverkar kapaciteten i transportsystemet. Fortsätter vi använda bilen på samma sätt som idag kommer det sannolikt att leda till ökat trafikarbete med bil och en kraftig ökning av efterfrågan på parkering. Om tekniken däremot ger upphov till fler delade ägarformer som bildelning, samåkning och taxi så finns möjlighet att kraftigt minska efterfrågan på parkering och antal fordon, trots en eventuell ökning av antalet körda personkilometer.

En central fråga när det gäller självkörande fordon är i vilken utsträckning tekniken kan bidra till att lösa förväntade framtida kapacitetsproblem på det svenska vägnätet, givet att vi använder bilen på samma sätt som idag. Enligt litteraturstudien kan självkörande fordon komma att bidra till att kapaciteten i transportsystemet ökar. För att detta ska ske krävs dock att tidluckorna mellan fordon blir mindre än vad de är idag. Om fordonen enbart är självkörande men i övrigt beter som vanliga fordon gör idag så kommer kapacitetsvinsterna att bli små och främst vara resultat av jämnare flöden och färre olyckor. För att riktigt stora kapacitetsvinster ska uppstå så krävs att fordon bildar kolonner och att tidluckorna minskar från dagens 1,5 sekunder till 0,1 sekund. För att detta ska vara möjligt i praktiken behöver fordon kommunicera med varandra genom så kallad V2V-kommunikation och med infrastrukturen genom så kallad V2I-kommunikation.

Resultaten från våra trafiksimuleringar visar att om detta sker så kan kapaciteten i en innerstadsmiljö fördubblas om alla fordon är självkörande. Beräkningarna för motorvägar visar att

genomströmningen i exemplet från Essingeleden skulle kunna öka med cirka 70 procent om 100 procent av fordonen är självkörande. Exemplet behöver dock inte vara representativt för alla delar av motorvägs- och innerstadsnätet.

I litteraturen förutsätts i många fall myndigheter inta en passiv roll i utvecklingen och som bäst svara mot den tekniska utvecklingen och tillhandahålla infrastruktur och regelverk. I praktiken torde dock en aktiv politik på området både kunna styra utvecklingen i olika riktningar och därmed också påverka vilka konsekvenser utvecklingen får. Genom styrmedel och lagstiftning finns stora möjligheter att påverka fordonsflottans sammansättning och hur vi använder bilar. Anser till exempel samhället att det finns potentiella vinster inom trafiksäkerhet och kapacitet genom en ökad andel självkörande bilar står flera styrmedel till buds för att stimulera utvecklingen. Exempel på dessa kan vara att under en introduktionsfas tillåta förläsa fordon i kollektivtrafikkörfält, erbjuda gratis parkering, undantag för trängselskatt, subventionerad försäkring etc. I ett senare skede kan vissa filer eller gator reserveras för sådana fordon.

Att finansiera och underlätta forskning på området är ett annat sätt att stödja utvecklingen. En fördel som talar för Europa och i synnerhet Sverige är att vi inte har samma preventiva försäkringstradition som till exempel USA. I Sverige delar vi på kostnader som uppstår till exempel i samband med behov av sjukhusvård vid olyckor. Detta kan bidra till att vi får betydligt lägre kostnader för att genomföra pilotprojekt.

På lång sikt när självkörande fordon utgör ett dominerande inslag i transportsystemet finns det skäl att börja titta på marginalkostnaden för att tillåta icke-självkörande fordon i system och överväga att reglera detta i avgiftssystem och lagstiftning. På vägen dit kan reglering av icke-självkörande fordon i farliga miljöer som gruvor eller miljöer där det är angeläget att trafikregler följs, som stadskärnor, övervägas och vara ett sätt att driva demonstrationsprojekt.

För att maximera nyttan av självkörande kommer det sannolikt även att vara nödvändigt med styrmedel som reglerar hur fordonen används. Givet att vi får en utveckling i enlighet med våra simuleringar kommer trafiken att kunna öka kraftigt utan större investeringar i ny infrastruktur. Om vi använder bilen på samma sätt som idag kommer det innebära en kraftig ökning av efterfrågan på parkering. Ett sätt att hantera detta är att förlägga stora parkeringsanläggningar i perifera lägen och låta bilarna hämta upp sina passagerare vid behov. Nackdelen med detta är att det skulle ge upphov till mycket tomkörning. Ett annat alternativ är bildelning och samåkning där varje fordon utnyttjas mer effektivt vilket ger många passagerarkilometer per parkeringsplats. En sådan utveckling skulle till exempel kunna stimuleras om fordonsägande beskattas högt, genom till exempel fordonskatt medan olika typer av bildelningstjänster momsbefrias.

Sammanfattningsvis väcker utvecklingen kring självkörande fordon många frågor som kommer att behöva hanteras, vissa på längre, andra på kortare sikt. Att utvecklingen kommer att påverka kapaciteten i transportsystemet framstår som högst troligt. På vilket sätt den kommer att påverka beror också på hur utvecklingen hanteras transportpolitiskt.

1 Inledning

Trafikanalys förser beslutsfattare inom transportpolitiken med goda och relevanta kunskapsunderlag. Genom analyser av transportpolitikens omvärld skapas ökad kunskap om dess framtida förutsättningar. I Trafikanalys perspektiv definieras "omvärlden" i dessa sammanhang som den svenska statliga transportpolitikens omvärld. Detta innebär att utöver teknisk, ekonomisk och marknadsmässig utveckling är relevant utveckling inom andra politikområden också en del av den omvärld som studeras. Detta inkluderar den transportpolitiska utvecklingen i andra länder, EU:s transportpolitiska utveckling utgör ett gränsland.

En del i detta arbete är att systematiskt följa hur personbilsflottan utvecklas för att identifiera de förändringar som kan komma att ställa nya krav på transportpolitiken. Till exempel följer Trafikanalys systematiskt utvecklingen av miljöbilarnas andel av fordonsflottan. Ett område som Trafikanalys överväger att följa närmare är automatiseringsgraden i den svenska fordonsflottan och vilka konsekvenser en ökat automatisering kan få. En ökad andel fordon med automatiska eller semiautomatiska funktioner som till exempel aktiv farthållare och parkeringsassistans skapar nya möjligheter, men ställer också nya krav på utformning av transportsystemet och på sikt lagstiftningen på området. För att på sikt systematiskt kunna följa denna utveckling kan det finnas behov att redan idag undersöka vilka möjligheter som finns att tillfredsställa ett framtida statistikbehov på området.

Vilka konsekvenser ett stort genomslag av självkörande fordon kommer att få är omöjligt att dra slutsatser kring idag då tekniken fortfarande har mycket utveckling kvar. Vi vet inte heller hur framtida resenärer kommer att se på skilda lösningar. Det pågår dock tester och pilotprojekt som kan ge oss viss vägledning inom ett antal olika områden, nedan listas några återkommande exempel:

- Taxi, förarlösa bilpool-/taxifordon som hämtar och lämnar på beställning.
- Parkering, här diskuteras allt från dagens automatiska fickparkeringsfunktion till att bilar på egen hand ska uppsöka parkering när de lämnat passagerare och sedan återkommer när det behövs igen.
- Autopilot på motorvägar, som en utvecklad farthållare där bilen även kan hålla sin position i relation till omgivande trafik och destination.
- Autopilot på stadsmotorvägar eller motorvägar i stadstrafik, en autopilot som kopplas in när bilen står i kö så att föraren kan ägna sig åt annat.
- Transporter i gruvor och andra miljöer där arbetsmiljön inte är optimal för människor.
- Fordonskolonner, självkörande fordon med V2V teknik gör att fordon kan kopplas samman med väldigt korta avstånd sinsemellan, detta kan antingen ske helt automatiskt eller genom att det första fordonet i kolonnen styr.

Tekniken som ligger till grund för fordonens självkörande funktioner inkluderar flera olika komponenter. Det är delvis genom positionering med GPS men också genom sensorer som känner av var bilen befinner sig i förhållande till omkringliggande fordon och infrastruktur. Genom kommunikation dels mellan fordon (V2V), dels kommunikation mellan fordon och infrastruktur (V2I) skapas ytterligare möjligheter att optimera flöden och minska olyckor. Den

snabba teknikutveckling inom ITS gör att lösningar som upplevdes som science fiction för några år sedan nu börjar dyka upp i demonstrationsprojekt.

För att öka kunskapen kring denna utveckling initierade Trafikanalys under 2014 två studier på temat självkörande fordon. Dessa studier syftade dels till att försöka ge en bild av vilka möjligheter som finns att systematiskt följa utvecklingen, dels att undersöka vilka konsekvenser en ökad automatisering av personbilsflottan kan få för kapaciteten i det svenska transportsystemet.

Metod

Rapporten baseras på två rapporter som Trafikanalys beställt under slutet av 2014. Den första rapporten är tudelad och fokuserar på vilka konsekvenser självkörande fordon kan få för framtida förväntade kapacitetsbrister i transportsystemet. Arbetet är inriktat på personbilar. Den första delen av rapporten utgörs av en förstudie med syfte att undersöka hur kunskapsläget kring automatiserade fordon och kapacitet ser ut. Förstudien baseras huvudsakligen på litteraturstudier. Den andra delen av rapporten sammanfattar resultaten av ett antal trafiksimuleringar som har genomförts för att undersöka hur en personbilsflotta med 100 procent självkörande fordon kan komma att påverka kapacitet på motorvägar och stadstrafiken i Stockholm. Dessa simuleringar har genomförts med hjälp av Trafikverkets metod för kapacitetsberäkningar, Calmar och mesosimuleringsprogramvaran CONTRAM. Verktyn har fått anpassas utifrån de speciella förutsättningar som självkörande fordon innebär. Dessa båda studier är gjorda av Movea Trafikkonsult.

Den andra rapporten som ligger till grund för denna omvärldsrapport är framtagen av Viktoriainstitutet och belyser vilka möjligheter som finns att följa utvecklingen av den svenska fordonsflottan i termer av automatisering.

Denna rapport är en sammanfattning av resultaten av dessa studier och har kompletterats med information från den kontinuerliga kunskapsinhämtningen på området som sker inom ramen för Trafikanalys omvärldsbevakning.

I denna rapport använder vi oss främst av begreppet självkörande fordon. Med detta avser vi en teknik där alla manövrar som en mänsklig förare kan utföra, kan utföras automatiskt.

Vi har valt att i huvudsak avgränsa oss till personbilar i rapporten. Även om det sker utveckling även inom självkörande godstrafik och kollektivtrafik så är det inom personbilsindustrin som utveckling har kommit längst. För framtidsscenarier kring automatisering av citylogistik så rekommenderas Trafikanalys rapport 2014:8, Godstransporter i städer - scenarier för framtiden.

2 Vad är självkörande fordon?

För att kunna bedriva en transportpolitik som säkerhetsställer att fördelar med den självkörande tekniken utnyttjas väl och att negativa effekter minimeras är det sannolikt värdefullt om fordonsflottans utveckling över tid avseende automatisering kan följas. Utan kunskap kring hur fordonsflottans sammansättning avseende automation förändras är det svårt att veta hur effektiva politiska åtgärder för att stimulera utvecklingen är. Det kan till exempel röra sig om åtgärder för att stimulera förbättrad trafiksäkerhet, öka tillgängligheten eller förbättra den svenska fordonsindustrins konkurrenskraft genom satsningar på ökad automation.

En förutsättning för att kunna följa upp personbilsflottans automatisering är att det finns en definition av vad som är en automatisk funktion. Utan detta är det svårt att göra en strukturerad bedömning av hur stor del av fordonsflottan som är utrustad med teknik som tillåter automatisk körning.

I dagsläget saknas det en vedertagen definition av självkörande fordon, såväl nationellt som internationellt. Det finns inte heller någon globalt accepterad taxonomi för automation i fordon. Det är många termer som används som till exempel självkörande, förarlös, intelligent och robotisk för att beteckna olika typer av manövreringskontroll som utförs av ett tekniskt system.

För att beskriva automatisering av fordon används idag vanligen en klassificering där kontrollen av fordonet delas i tre automatiseringsgrader (icke-automatiserad, semi/delvis automatiserad, och helt automatiserad). Innebörden av dessa termer och grader är dock oftast oklar och varierar med vem som använder dem.

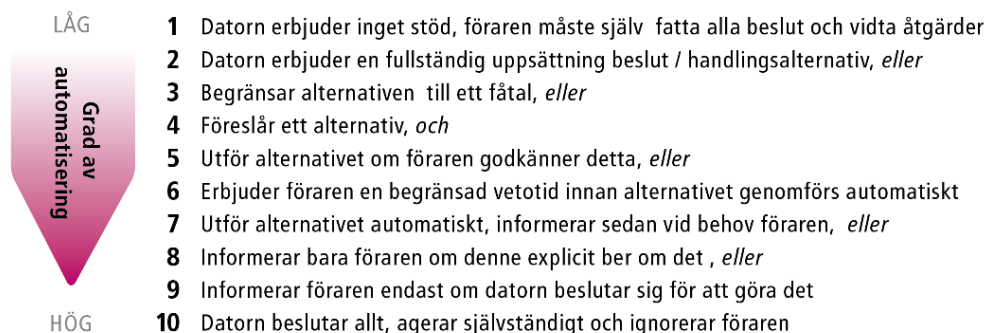
Det finns också skillnader i vilka tekniker som används för att skapa en funktion. Till exempel kan positionering av fordon ske med GPS, genom sensorer och/eller genom att fordonen kommunicerar med omkringliggande fordon.

Internationellt har flera försök att inrätta en mer generisk klassificering gjorts. I detta kapitel redogörs översiktligt för förslag till klassificeringar som har tagits fram inom ramen för olika studier. Här diskuteras också vilka problem och svårigheter som finns med att klassificera olika förarstödsfunktioner.

Klassificering av automatisering

Automatisering av uppgifter som historiskt har utförts av människor är inget nytt fenomen och redan 1978 föreslogs en klassificering av olika automatiseringsgrader i studien *Human and computer control of undersea teleoperators*.¹ Den föreslagna klassificeringen innehöll en 10-gradig skala för automatisering (se figur 2.1). Denna klassificering har dock inte fått någon större genomslagskraft inom fordonsindustrin. En möjlig förklaring till detta kan vara att schemat är svårt att tillämpa i praktiken på grund av alltför små skillnader mellan dess olika klasser.

¹ Sheridan T. B. och Verplank W. L., 1978.



Figur 2.1 Automatiseringsgrader enligt Sheridan och Verplank

I takt med att utvecklingen inom självkörande fordon gått framåt har behovet av att kunna klassificera olika förarstödsfunktioner ökat. Detta har resulterat i att det på senare år har tagits fram förslag på klassificeringar i både USA och i Tyskland, två länder vars fordonsindustri har kommit långt inom utvecklingen av självkörande fordon.

De klassificeringar som nyligen föreslagits i dessa länder har tagits fram av tyska Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)² och amerikanska National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)³. Som framgår av figur 2.2 nedan, definierar dessa system fem grader av automation. Inom dessa ryms fordon som inte har något kontrollsystem automatiserat (grad noll,) till helt självkörande fordon (grad fyra). Även om det finns likheter mellan dessa båda klassificeringar så skiljer de sig i terminologi och vad som ingår i respektive klass.

² Gasser T. M. and Westhoff D., 2012.

³ NHTSA, 2013.

NHTSA DEFINITION FÖR OLIKA GRADER AV FORDONSAUTOMATION

Full självkörning (Nivå 4): Fordonet är konstruerat för att utföra alla säkerhetskritiska körfunktioner och övervaka omgivningen under hela resan. Föraren förutsätts bara ange destination eller navigeringsangivelser. Föraren förväntas i övrigt inte vara tillgänglig för att ta över kontrollen under resan. Detta omfattar både fordon med och utan förare.

Begränsad självkörning (Nivå 3): Tillåter föraren att släppa kontroll över säkerhetskritiska funktioner i vissa trafikmiljöer. I dessa trafikmiljöer låter föraren fordonet övervaka förändringar som kan kräva en övergång tillbaka till förarkontroll. Fordonet meddelar i god tid innan övergång, för att säkerställa en bekväm övergång till manuell styrning. Googlebilen är ett exempel på begränsad självkörning.

Kombinerad funktionsautomatisering (Nivå 2): Innebär automatisering av minst två primära funktioner som är utformade för att arbeta tillsammans för att avlasta föraren. Ett exempel är aktiv farthållare och i kombination med körfältsassistans.

Funktionsspecifik automation (Nivå 1): Automation på denna nivå inkluderar en eller flera specifika styrfunktioner. Exempel är elektronisk stabilitetskontroll, (ESC) eller nödbromsassistans (EBA).

Ingen automation (Nivå 0): Föraren har hela tiden fullständig kontroll över basala kontrollfunktioner som bromsar, styrning och hastighet.

Grad av automatisering

BASt DEFINITION FÖR OLIKA GRADER AV FORDONSAUTOMATION

Full automatisering. Systemet tar fullständig och permanent kontroll över hastighet och position. Om systemet begär att föraren tar över kontrollen manuellt och detta inte åtföljs, kommer systemet att återgå till att kontrollera fordonet och riskminimera körningen.

Hög automatisering. Systemet tar över kontrollen av hastighet och position; föraren behöver inte längre permanent övervaka systemet. Om systemet begär att föraren ska ta manuell kontroll över fordonet så måste detta ske inom en viss tidsbuffert.

Partiell automatisering. Systemet tar över kontrollen av fordonet både avseende hastighet och position, föraren måste ständigt övervaka systemet och ska vara beredd att ta över kontrollen när som helst.

Förarstöd. Föraren kontrollerar permanent antingen fordonets hastighet eller fordonets position lateralt. Den uppgift som inte kontrolleras kan automatiseras till viss del genom förarstödsfunktioner.

Enbart förare. Föraren framför fordonet helt manuellt.

Figur 2.2. Automatiseringsgrader enligt BASt respektive NHTSA

Ett annat förslag på klassificering som återfinns i flera studier om självkörande fordon är det förslag som tagits fram av Society of Automotive Engineers (SAE). SAE har publicerat en standard som definierar sex grader av fordonautomation (figur 2.3).⁴ Jämfört med BASts och NHTSAs klassificeringar är automatiseringsgrad fyra hos SAE uppdelad i två klasser. SAE:s definition är intressant då organisationen är internationell och samlar 138,000 ingenjörer inom bland annat fordonsindustrin.⁵ Denna definition borde därför ha potential att få internationellt genomslag åtminstone inom dessa kretsar.

⁴ SAE International, 2014.

⁵ <http://www.sae.org>, 2015.

A-grad ^{*)}	Namn	Beskrivning
5	Full automatisering	Ett automatiserat körsystem har kontroll över köruppgiften i alla möjliga trafiksituationer och miljöer som den mänskliga föraren klarar av idag.
4	Hög automatisering	Ett automatiserat körsystem har kontroll över köruppgiften i vissa trafiksituationer även om föraren inte reagerar på ett lämpligt sätt när systemet begär att föraren ingriper.
3	Villkorlig automatisering	Ett automatiserat körsystem har kontroll över köruppgiften i vissa trafiksituationer under förutsättningen att föraren reagerar på ett lämpligt sätt när systemet begär att föraren ingriper.
2	Partiell automatisering	Ett eller flera förarstödsystem hjälper föraren i vissa trafiksituationer att styra och accelerera/bromsa under förutsättningen att föraren har kontroll över andra delar av köruppgiften.
1	Förarstöd	Ett förarstödsystem hjälper föraren i vissa trafiksituationer att antingen styra eller accelerera/bromsa under förutsättningen att föraren har kontroll över andra delar av köruppgiften.
0	Ingen automatisering	Föraren har fullständig kontroll över alla aspekter av köruppgiften, även om varnings- och interventionssystem stödjer föraren i detta.

^{*)} Automatiseringsgrad

Figur 2.3. Automatiseringsgrader enligt SAE

Att följa utvecklingen enbart avseende automatiseringsgrader kan dock vara svårt och riskerar att bli missvisande. En klassificering enligt automatiseringsgrader visar till exempel inte inom vilka hastigheter som ett system fungerar. Ett system kan klassificeras i en automatiseringsgrad i ett hastighetsspann och i en annan grad i ett annat hastighetsspann. För att försöka hantera denna svårighet och skapa klassificeringsscheman som är robusta har flera studier försökt sätta in olika grader av automatisering i större sammanhang och koppla dem till framförallt beslutfattande.

Ett exempel föreslås i L. Save m.fl. *Designing Human-Automation Interaction: a new level of Automation Taxonomy* från 2012. I denna studie presenteras en klassificering där människans fyra kognitiva funktioner: 1) samla in information, 2) bearbeta information, 3) fatta beslut, och 4) utföra uppgiften, kopplas till automatiseringsgrader.⁶

En vidareutveckling av klassificeringen har nyligen gjorts i Banks m.fl. *Sub-systems on the road to vehicle automation: Hands and feet free but not "mind" free driving*, där varje automatiseringsgrad kopplas till sju parametrar: övervaka, förutse, upptäcka, identifiera, besluta, välja och agera (figur 2.4).⁷

⁶ Save L., Feuerberg B., och Avia E., 2012.

⁷ Banks V. a., Stanton N. a, och Harvey C., 2014.

Nödbroms för fotgängare	Övervaka	Förutse	Upptäcka	Känna igen	Ta beslut	Välja åtgärd	Reagera
Helt manuellt	F	F	F	F	F	F	F
Beslutsstöd	F	F	F/S	F	F	F	F/S
Automatiskt åtgärdsval	F/S	F	S	S	S	S	S
Helt automatiskt	S/(F)	S	S	S	S	S	S

F=Förare, S=System, F/S=förare och system samverkar för att genomföra åtgärd
S/(F)= systemet är kapabelt att själv genomföra åtgärden men föraren förväntas ändå delta i genomförandet

Figur 2.4. Förenklad version av de 10 automatiseringsgraderna och motsvarande 7-stegs informationsbehandling applicerat på ett nödbromssystem för fotgängare enligt Banks m.fl.

Även i BAST:s, NHTSA:s och SAE:s definitioner av olika automatiseringsgrader tas hänsyn till hur föraren använder tekniken (figur 2.5). För att avgöra vilken automatiseringsgrad som ett förarstödsystem hör till föreslår SAE en något enklare klassificering där hänsyn tas till följande parametrar: om föraren eller funktionen utför styrning/acceleration/bromsning, om övervakning av trafikmiljön utförs av föraren eller funktionen, om funktionen eller föraren förväntas ta fordonet till säkert läge i fall att tekniska problem uppstår, och i vilka trafiksituationer som funktionen används.

A-grad	BAST	NHTSA	SAE	Utförande av styrning/acceleration/bromsning	Övervakning av trafikmiljön	Hantering av nödsituationer	Systemets förmåga (olika trafiksituationer)
0	Bara förare	Ingen automatisering	Ingen automatisering	Förare	Förare	Förare	NA
1	Förarstöd	Funktionsspecifik automatisering	Förarstöd	Förare och system	Förare	Förare	Vissa trafiksituationer
2	Partiell automatisering	Multifunktionell automatisering	Partiell automatisering	System	Förare	Förare	Vissa trafiksituationer
3	Hög automatisering	Automatisering med begränsad självstyrning	Villkorlig automatisering	System	System	Förare	Vissa trafiksituationer
4	Full automatisering	Automatisering med full självstyrning	Hög automatisering	System	System	System	Vissa trafiksituationer
5			Full automatisering	System	System	System	Alla trafiksituationer

Figur 2.5. En jämförelse mellan BAST:s, NHTSA:s och SAE:s automatiseringsgrader

På europeisk nivå pågår arbete med att hantera dessa frågor och inom det pågående EU-projektet *Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles (AdaptIVe)*. I AdaptIVe har det preliminärt föreslagits en klassificering med tio olika parametrar, inklusive automatiseringsgrader enligt SAE. Exempel på andra parametrar som föreslås är hastighet (låg, mellan, hög), hur systemet aktiveras (automatiskt, med förarens godkännande, helt initierat av föraren), och under hur långa tidsintervaller som systemet används (kort tid, kontinuerligt), se figur 2.6.

Nr	Parameter	Värdeområde
1	Fordonstyp	Lastbil, bil
2	Manövertid	Kort tid, kontinuerlig
3	Manöver- automatisering	Nivå 1–5
4	Manöverhastighet	Låg, medelhög
5	Manöverkraft	Låg, medelhög
6	Reaktionstid för manöver	Standard, reducerad, kort
7	Manöveraktivering	Systeminitierad, systeminitierad med förarens godkännande, förarinitierad
8	Manöverkoordinering	Med koordinering, utan koordinering
9	Förarens placering	I fordonet, utanför fordonen, fjärrstyrd
10	Vägtyp	1–17 (inkluderar oskyddade trafikanter, blandtrafik och övriga trafikmiljöer)

Figur 2.6. Klassificeringsparametrar som föreslås av AdaptiVe

Utbudet av olika försök att klassificera självkörande funktioner indikerar att det inte är oproblematiskt att hitta ett klassificeringssystem som fångar in alla aspekter av automatisk körning. Den klassificering som förefaller ha fått störst genomslag är den tagits fram av SAE, det är dock ännu för tidigt att säga om denna kommer att nå status av internationell standard.

För att kunna följa utvecklingen och även jämföra automatiseringsgraden i olika länders fordonspark vore det önskvärt om länderna inom EU kunde enas kring ett klassificeringssystem. Ett sådant system skulle sannolikt på sikt underlätta både det nationella och det europeiska transportpolitiska beslutsfattandet. Det förslag som tagits fram inom ramen för AdaptiVe kan förhoppningsvis vara ett steg i riktning mot en gemensam europeisk standard.

När det finns en internationellt accepterad taxonomi och definition av olika automatiseringsnivåer finns möjlighet att inkludera personbilsflottans automatiseringsgrad i Trafikanalys arbete med nulägesbeskrivningar av transportsystemet. Att utveckla ett eget definitionssystem för att följa utvecklingen innan det finns en vedertagen taxonomi och definitioner på åtminstone europeisk nivå, riskerar att leda till dålig internationell jämförbarhet.

Det kan likväl finnas en poäng med att ta fram en enklare uppsättning indikatorer kring specifika funktioner som till exempel aktiv farthållare och parkeringsassistans redan idag. Sådana indikatorer skulle kunna ge en grov bild av utvecklingen på kort sikt och innebära att Trafikanalys kan tillhandahålla viss statistik avseende fordonsflottans automatiseringsgrad redan nu. Detta förutsätter dock att denna data finns tillgänglig för insamling.

3 Forsknings- och utvecklingsläget

Intresset för självkörande fordon och den snabba teknikutveckling som sker på området har resulterat i att det publicerats mycket forskning de senaste åren. Forskningsområdet är mycket brett, multidisciplinärt och omfattar både den tekniska utvecklingen, den beteendevetenskapliga dimensionen och de juridiska aspekterna. I detta kapitel ges en överblick av forskningsläget på området för tillfället.

3.1 Internationellt

Internationellt pågår det mycket arbete både inom offentlig sektor och inom näringslivet för att främja utvecklingen av självkörande fordon. I USA har transportdepartementet tillkännagett ett nationellt program med syfte att utveckla fordonsautomation och i Kalifornien beslutades det i september 2014 om ny lagstiftning för att hantera tester av självkörande fordon på det allmänna vägnätet. Liknande lagstiftning har även fattats beslut om i Nevada, Florida, Washington DC och Michigan och flera stater väntas följa efter.

Även i Japan har utvecklingen inom självkörande fordon kommit långt. Här ligger mycket fokus på kommunikation mellan fordon och infrastruktur som en katalysator för utveckling inom självkörande fordon. För att stimulera denna utveckling har 1600 så kallade "ITS spots" upprättats. På dessa platser kan fordon kommunicera med infrastrukturen genom höghastighetsinternet. Vid årsskiftet 2014/2015 hade cirka 100 000 fordon denna teknik installerad. I dagsläget kommuniceras trafikinformation och varningar vid dessa "ITS spots". Detta kommer senare att kombineras med körfältsassistans och aktiv farthållare.

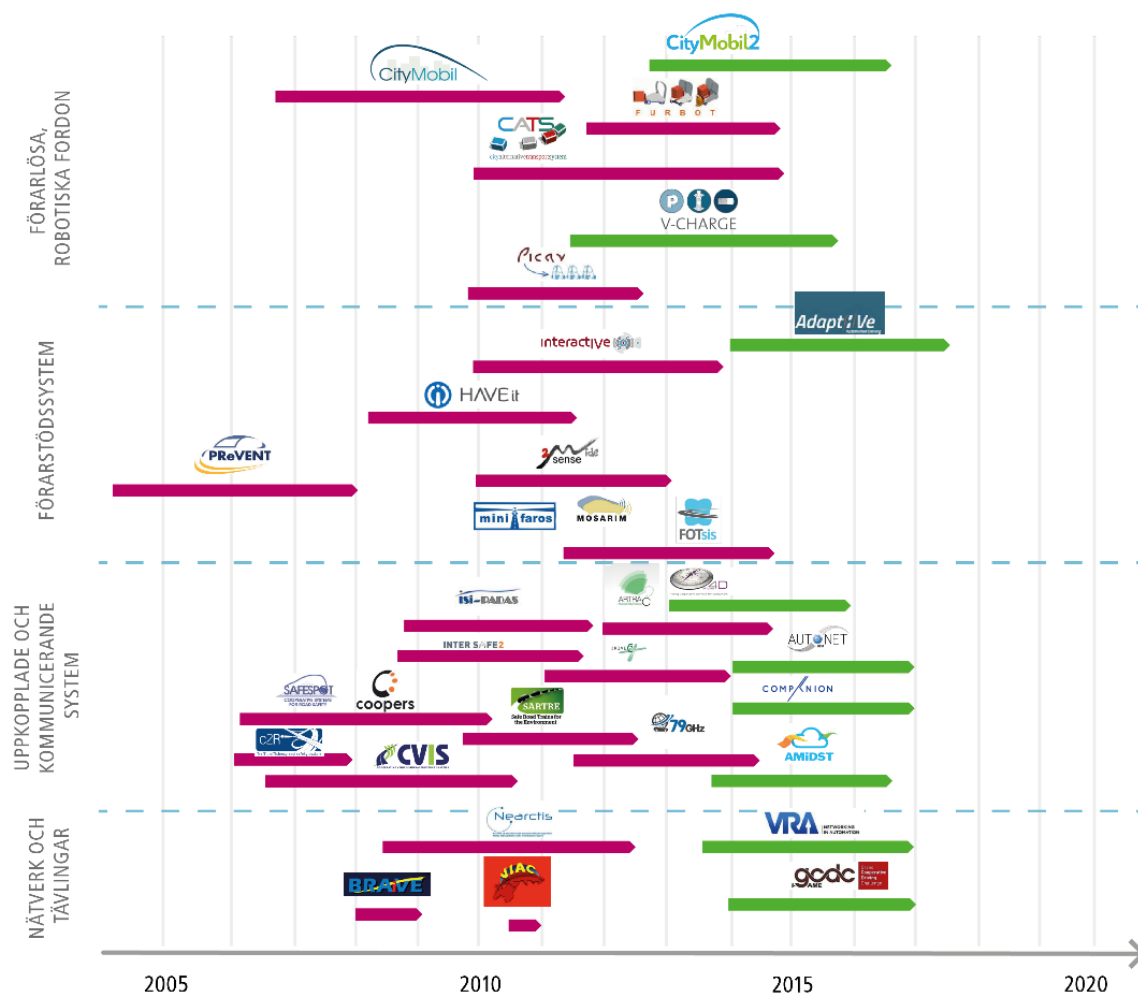
Japan tog redan 2013 fram en färdplan för hur fordon med en hög grad av automatisering ska vara i bruk 2020. Även i andra asiatiska länder som Sydkorea, Kina och Singapore sker mycket utveckling inom självkörande fordon och tekniken väntas spela en viktig roll för att förbättra trafiksäkerhet och minska trängsel.

I Europa är fordonsindustrin en stor sektor och flera europeiska biltillverkare ligger i framkant av teknikutvecklingen på området. Sektorns är betydelsefull för EU:s ekonomi och det investeras följaktligen stora summor i forskning och utveckling av både industrin, enskilda medlemsländer och på gemensam EU-nivå. Europeiska kommissionen och enskilda medlemsländer har under en längre tid finansierat forskning kring teknologi för självkörande fordon. Ett av de tidigaste projekten var PROMENTHEUS som bedrevs inom ramen för forskningsprogrammet EUREKA. Det hade främst som syfte att utveckla teknik för ökad säkerhet på europeiska vägar. Projektet anses ha bidragit stort till utveckling av radarteknik för bilar. Detta projekt pågick mellan 1987 och 1995 och var finansierad genom offentligt-privat samverkan med en budget på cirka 750 miljoner euro.

Ett annat intressant EU-finansierat forskningsprojekt är SARTE som pågick mellan 2009 och 2012. I detta projekt samarbetade sju europeiska företag för att utveckla kolonnkörning. I projektet ingick bland annat pilottester på spanska motorvägar utanför Barcelona.

Av de EU-finansierade projekten inom självkörande fordon som pågår just nu är AdaptIVe, som omnämns i kapitel två, ett av de största. Det drivs av ett konsortium bestående av 29 parter och syftar till att få fram demonstrationer av självkörande bilar i komplexa stadsmiljöer. Projektet startade 2014 och ska pågå i 42 månader.

Ovanstående projekt är endast ett axplock av de projekt inom självkörande fordon som bedrivits med finansiering av EU. Nedan finns en bild som visar alla projekt med bäring på självkörande fordon som EU har varit med och finansierat under de senaste 10 åren.⁸



Figur 3.1. Alla EU-finansierade projekt inom automatiserade fordon de senaste 10 åren (gröna är pågående, cerise avslutade)⁹

Tyskland är ett av de länder i Europa som utmärker sig inom utvecklingen. Här pågår det för närvarande rundabordsamtal mellan experter på fordonsutveckling och staten (transportpolitik och juridik) med syfte att ta fram ett juridiskt ramverk för självkörande fordon på det allmänna vägnätet.

⁸ EPoSS, 2015.

⁹ Ibid

Ett annat europeiskt land som utmärker sig är Frankrike. Där presenterade den franska regeringen nyligen en plan för framtida innovationer där bland annat teknik för självkörande fordon ingår. Tanken är att teknik för självkörande fordon ska utvecklas i sådan takt att teknik och fordon är ekonomiskt konkurrenskraftiga år 2020. Exempel på andra länder i Europa där utvecklingen går snabbt framåt är Sverige, Nederländerna, Spanien och Storbritannien. Alla dessa länder har genomfört eller är på väg att genomföra tester med olika typer av självkörande fordon på det allmänna vägnätet.

3.2 Möjliga utvecklingsscenarier

Utvecklingen kring självkörande fordon går således fort och flera bilmärken, inklusive Volvo, väntas ha självkörande eller semiautomatiska modeller på marknaden redan år 2020. I Kalifornien som varit en pionjär inom automatisk körning demonstrerades kolonnkörning med åtta bilar i San Diego redan 1997. Bilarna körde med ett fast avstånd på 6,5 meter, vid alla hastigheter upp till 65 mph (105 km/h). Detta motsvarar 0,2 sekunders tidlucka. Kolonnerna separerades med ett avstånd på 60 meter.¹⁰ Inom vissa branscher där transporter sker på isolerade platser och inte på det allmänna vägnätet finns redan exempel på fullskaliga tester med helt självkörande förarlösa arbetsfordon. Ett exempel på detta är gruvindustrin i Australien där gruvbolaget BHP Billiton sedan mitten av 2014 har haft 12 självkörande lastbilar i bruk.¹¹ Den snabba utvecklingen ställer generellt sett krav på myndigheterna att hänga med i utvecklingen.

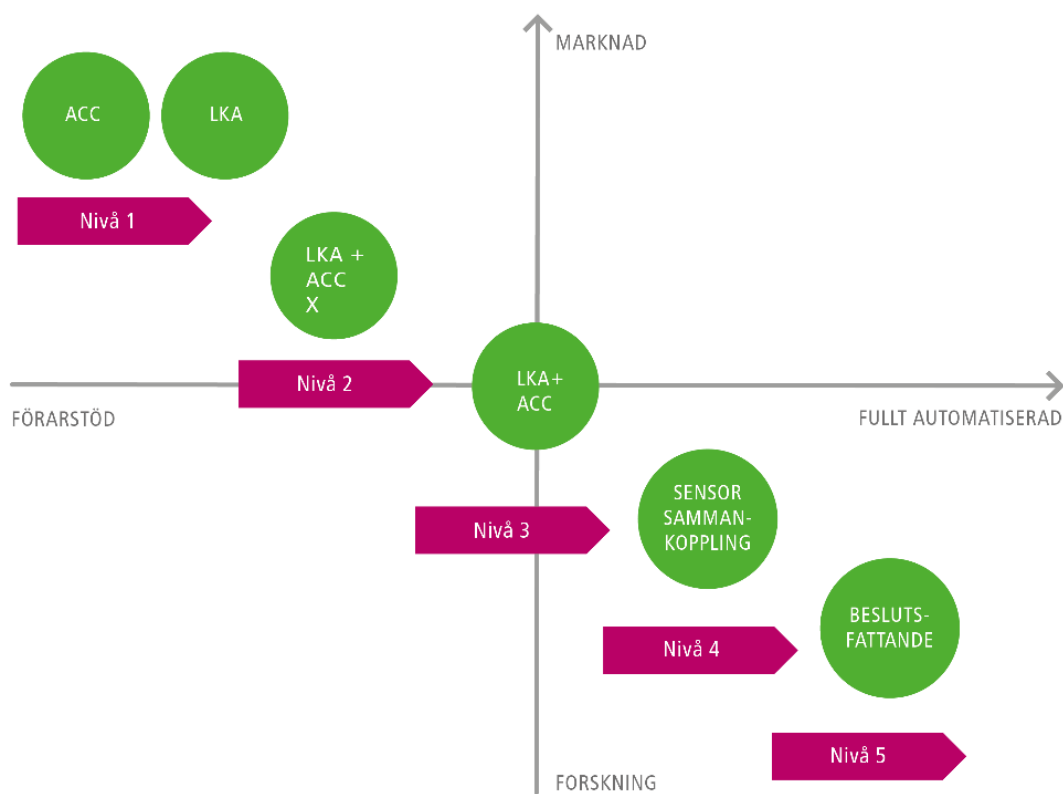
I dagsläget har som tidigare nämnts regelverk skapas i bland annat Kalifornien, där körtillstånd ges för automatstyrda bilar på allmänna vägar i liten skala från 2015. Försäkringspremierna är dock till en början skyhöga, 5 miljon dollar per fordon. Detta speglar dock snarast USA:s juridiska tradition och ger ingen grund för att bedöma risker och sannolika försäkringsvillkor på andra håll i världen.

Försäkringsfrågan är dock bara en av många frågor och i den fortsatta utvecklingen av tekniken finns ett antal frågor som kommer att behöva hanteras. Det inkluderar bland annat; felsäker teknik, säkerhet och licensiering, juridiska frågor, ägar- och produktansvar, integritet, kunders beteenden och preferenser, inköps- och driftkostnader samt kompletterande utbyggnad av infrastruktur. Hur fort implementeringen av självkörande fordon kommer att gå är också beroende av i vilken takt dessa frågetecken räts ut.

Som vi tidigare nämnt är nyproducerade bilar idag utrustade med olika typer av självkörande funktioner som fungerar som förarstöd. Dessa kan till exempel vara aktiv farthållare (ACC), där fordonen känner av hur långt det är till fordonet framför och anpassar farten efter detta, eller funktioner som känner av hur bilen förhåller sig till körfältet och varnar om bilen är på väg ur körfältet. Det finns även funktioner som aktivt kompenserar om bilen är på väg ur sitt körfält, så kallad körfältassistans (LKA). Detta kan ses som en naturlig förlängning av en utveckling där bilar utrustas med automatiska funktioner som ABS och antisladd system. Figuren nedan är tagen från en färdplan för införandet av självkörande fordon som tagits fram av European technology platform on smart systems integration (EPoSS) och visar marknadsmognad för olika självkörande funktioner.

¹⁰ Michael James B., Godbole Datta N., Lygeros John, och Senguptaet Raja, 1998.

¹¹ <http://www.bhpbilliton.com/>, 2015.



Figur 3.2 Marknadsmognad för olika typer av avancerad förarsöd¹²

Trots den att det pågår mycket forskning och viss självkörande teknik redan finns på marknaden är det svårt att dra slutsatser kring när tekniken är så vanlig att den ger märkbara systemeffekter.

En översyn av hur ett antal experter på området tror att utvecklingen kommer att se ut presenterades nyligen i samband med 20-årsjubileet av branschtidningen Traffic Technology International. I tidningen fick nio ledande experter inom självkörande fordon uttala sig kring när de tror att 80 procent av fordonen är kommer att vara automatstyrda. Svaren skiljde sig kraftigt åt, från om 25 år ända upp till 100 år, fyra av nio trodde dock att det skulle ske inom 25 år.¹³

Flera studier har de senaste åren presenterat mer eller mindre kvalificerade spekulationer kring utvecklingen av självkörande fordon. I en studie av Bierstedt m.fl. från 2014 återfinns en av flera framtidsbedömningar. Denna ger en bra översikt över möjlig utveckling och vilka faktorer som är avgörande för utvecklingen. Genomgången i studien leder författarna till följande bedömning av andelen självkörande fordon i framtiden:¹⁴

¹² EPoSS, 2015.

¹³ Traffic Technology International, 2014.

¹⁴ Bierstedt Jane, Gooze Aaron, Gray Chris, Peterman Josh, Raykin Leon och Walters Jerry, 2014.

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

Hur fort tekniken slår igenom beror som nämnts dock inte bara på teknikutvecklingen utan även på hur myndigheterna hanterar den nya tekniken. I Bierstedt m.fl. redovisas även en bedömning av när självkörande fordon kan förväntas tillåtas på olika vägtyper:¹⁵

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

Figur 3.3 Möjlig spridning av självkörande bilar i olika trafikmiljöer enligt Bierstedt m.fl.

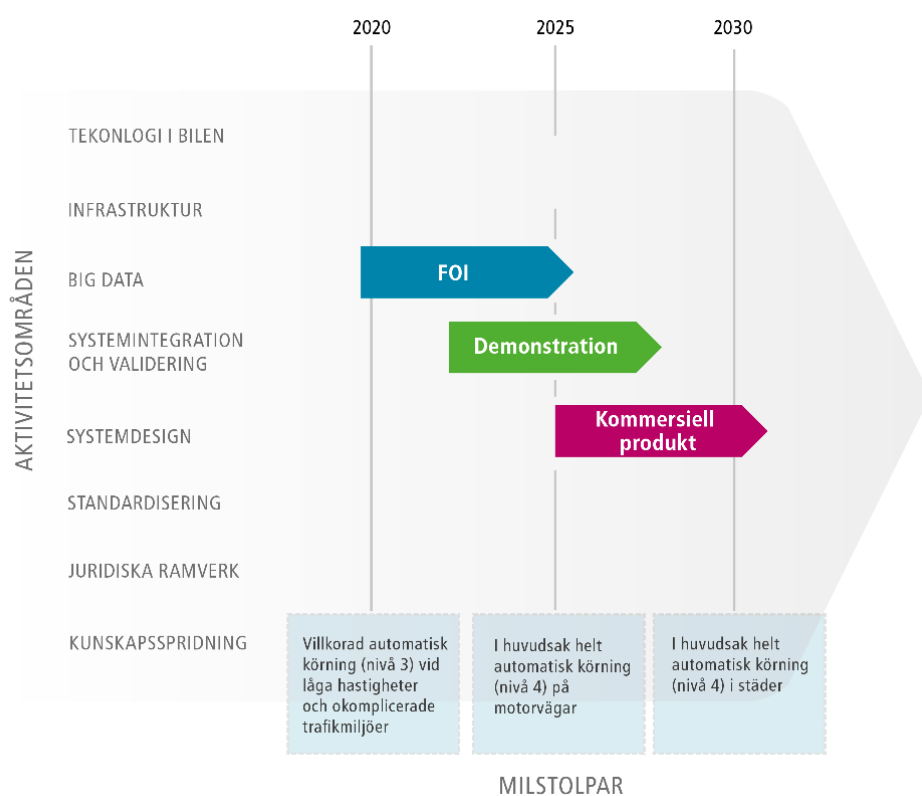
Det bör påpekas att denna bedömning gäller amerikanska förhållanden, dessa skiljer sig sannolikt delvis från svenska, framförallt gällande kapacitet på motorvägar. Det är mer sannolikt att självkörande fordon i Sverige initialt kommer att få dela körfält med andra personbilar eller kollektivtrafik än få egna körfält. Bedömningen gäller när allmänheten får tillgång till olika trafikmiljöer. Inom forskningen har redan till exempel Google genomfört tester i stadstrafik och inom det svenska projektet Drive Me förväntas Volvo testa självkörande bilar på blandade motorvägskörfält inom ett par år.

I januari 2015 släppte sammanslutningen av europeiska teknikföretag och forskningsmiljöer, EPoSS, en färdplan för införandet av teknologier kopplade till självkörande fordon. Färdplanen tar avstamp i det klassificeringsschema som tagits fram av SAE och identifierar tre milstolpar:¹⁶

¹⁵ Bierstedt Jane, Gooze Aaron, Gray Chris, Peterman Josh, Raykin Leon och Walters Jerry, 2014.

¹⁶ EPoSS, 2015.

- Den första milstolpen är 2020 och då spås villkorad automatisk körning ske vid låga hastigheter och i okomplicerade trafikmiljöer, till exempel på parkeringar och i bilköer.
- Den andra milstolpen ska inträffa senast 2025 och då ska en högre nivå av automatisk körning finnas tillgänglig (nivå fyra enligt SAE). Vid denna nivå förväntas fordon vara helt självkörande på motorvägar, genom så kallad autopilot. Teknikutveckling kring sensorer bedöms ha kommit så långt att bilarna kan läsa av vad som sker runt omkring och agera omedelbart för att undvika till exempel en kollision med ett djur och hantera farliga situationer som järnvägsövergångar.
- Den tredje milstolpen bedöms inträffa senast 2030. Denna milstolpe innebär att självkörande fordon tillåts i stadsmiljö. För att denna milstolpe ska nås behöver fordonen ha utvecklat teknik för att kunna kommunicera med infrastruktur, hålla koll på cyklister och fotgängare och kommunicera med andra fordon.



Figur 3.4. EPOSS milstolpar för införandet av självkörande fordon (nivåer enligt SAE)¹⁷

Sammanfattningsvis bör vi inte dra några långtgående slutsatser av de utvecklingsscenarier som presenteras i olika studier. Det förefaller dock som om de flesta är överens om att det kommer att dröja innan tekniken har fått så pass stort genomslag att den kan komma att få genomgripande konsekvenser för hur vi använder transportsystemet och planerar våra städer. En mer påtaglig inverkan på kapaciteten i enskilda trafikmiljöer tycks enligt litteraturen inte kunna väntas förrän vid 50 procent självkörande bilar. Ännu högre andelar krävs för att få påtagliga effekter vid trafikplatser.

¹⁷ EPOSS, 2015.

Trots att de riktigt stora effekterna inte förväntas på kort sikt finns det ändå anledning att ta hänsyn till utvecklingen i dagens transportpolitik. Även 10 till 25 procent är betydande effekter, det motsvarar till exempel ett nytt körfält på en motorväg eller att utnyttja vägrenen som på E4 mellan Hallunda och Södertälje. 10 procent ökad kapacitet kan mycket väl halvera fördröjningarna i samband med köer. Ledtiderna inom infrastrukturplaneringen är dessutom långa och när flera av de stora investeringsprojekten som planeras idag står färdiga kommer sannolikt en stor del av fordonsflottan vara utrustad med olika automatiska funktioner.

3.3 Potentiella hinder

I de utvecklingsscenarier som presenteras ovan är teknikutvecklingen i princip synonymt med utvecklingen av självkörande fordon i transportsystemet. I praktiken finns dock många hinder utöver tekniken som måste övervinnas innan självkörande fordon kan få ett brett genomslag.

Det ekonomiska hindret ska inte underskattas då en introduktion av självkörande bilar sannolikt kommer att kräva investeringar i så väl fysisk som digital infrastruktur. Flera av de studier som genomförts på området räknar med att självkörande fordon åtminstone initialt kommer att kräva separata körfält eller separata anläggningar, där bilarna inte blandas med annan trafik. I USA är detta mer realistiskt, då amerikanska motorvägar i vissa städer har upp till sex körfält. Det innebär att om ett av sex körfält reserveras för självkörande bilar uppstår det inte ett särskilt stort procentuellt avbräck i kapacitet. Detta är betydligt svårare i Sverige där kapaciteten på motorvägar sällan överskrider tre körfält. En möjlighet i svenska förhållanden kan istället vara att låta självkörande fordon initialt nyttja kollektivtrafikkörfälten, givet att de inte innebär en negativ påverkan på bussarnas framkomlighet.

Det finns också en risk att även om investeringar sker, så sker de för långsamt, vilket riskerar att hämma utvecklingen. Redan idag upplever myndigheter i USA att nuvarande resurser är alltför knappa och de kan svårtigen se hur ny infrastruktur och ökat underhåll till stöd för självkörande fordon kan finansieras. Biltillverkarna i USA konstaterar därför att bilarna måste fungera väl såväl med som utan kommunikation med infrastrukturen.¹⁸

Kommunikation mellan fordon och mellan fordon och infrastruktur kommer sannolikt att kräva en digital infrastruktur med hög kapacitet där stora mängder data kan flyttas snabbt. För att få denna på plats kommer det krävas stora investeringar och det är inte självklart vem som ska ansvara för att dessa investeringar genomförs. Teknik för självkörande bilar är dock inte beroende av möjligheten att kunna kommunicera med andra bilar eller med infrastrukturen. Vinst i kapacitet kan uppstå även utan intelligent infrastruktur finns på plats, då främst genom jämnare flöden och färre olyckor leder till mindre störningar.

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

Konsumenterna preferenser är givetvis också mycket viktiga. Självkörande bilar kan ge ökad status, men det kan också vara så att konsumenterna inte vill släppa ifrån sig kontrollen av fordonen. I en studie från 2013 genomförde KPMG fokusgrupper i tre amerikanska städer för att fånga konsumenternas attityder. I studien konstaterades att prestationsförmåga och design spelar mindre roll för attityden till självkörande bilar. Det är också stor skillnad mellan Los Angeles med mycket stora trängselproblem, landsbygdstrafik (Iselin) i New Jersey med långa

¹⁸ Wagner Jason, Baker Trey, Goodin Ginger och Maddox John, 2014.

pendlingsavstånd och Chicago där kollektivtrafiken är väl utbyggd. Konsumenterna i Los Angeles var mest positiva medan de i Chicago var mest skeptiska.¹⁹

3.4 Möjliga konsekvenser för resandet

Det är sannolikt att självkörande fordon kommer att förändra hur vi reser. I studier spekuleras både i att det kommer leda till att vi åker mer bil och att vi kommer att åka mindre, att det kommer att leda till ökat bilinnehav eller att det kommer leda till minskat. Till exempel kan "tomkörning" som idag förekommer inom godstransporter på sikt också bli ett problem inom persontransportområdet (även utanför taxinäringen). Flera studier har mer eller mindre underbyggt försökt redovisa hur resandet kommer att förändras när fordonsflottan blir självkörande.

I Bierstedt m.fl. diskuteras olika faktorer som kan leda till ökat eller minskat resande. I studien anges att en faktor som talar för att bilresandet kan komma att öka, är att körning i självkörande bilar sannolikt kommer att upplevs som mindre stressande. Detta skulle i så fall kunna innebära att grupper som idag undviker att köra bil kommer att öka sitt bilresande. Detta är dock effekter som kommer att få fullt genomslag först vid full självkörning.²⁰

Den intressantaste utvecklingen och som kanske kan påverka bilresandet allra mest är när tidigare icke-bilister får tillgång till bilresande. Det gäller bland annat äldre, handikappade och barn.

Ytterligare en faktor som talar för att självkörande fordon kommer att leda till ökat bilresande är att det blir minskad köbildning när effektivare trafikstyrning kan införas och olycksfrekvensen minskar, vilket skapar plats för fler bilar i systemet. En rapport från KPMG skattar att 90 procent av alla olyckor skulle kunna elimineras med självkörande fordon.²¹ Dessa stora effekter uppstår dock inte förrän självkörande fordon har fått ett mycket stort genomslag. Tidigare erfarenheter visar att trafikanter riskkompenserar om de vet att andra fordon är självkörande, vilket innebär att stora effekter inte kommer att nås så länge fordonsparken är blandad.

En faktor som talar mot ökat bilinnehav och möjligen även mot ökat bilresande är de högre kostnaderna som tekniken för självkörande bilar kan förväntas föra med sig. Om kostnaderna för att införskaffa ett fordon ökar kan det stimulera en utveckling mot ökad bildelning. Detta leder sannolikt till minskad bilanvändning då de rörliga kostnaderna för bil synliggörs. Framtida kostnadsökningar för tekniken kan dock kompenseras av minskade kostnader för säkerhetsrelaterad utrustning om olyckorna minskar. Det kan också innebära att bilarna kan göras mindre och att det går att använda lättare material vilket tillsammans med automatisk "eco-driving" skulle innebära lägre bränsleförbrukning.

Bierstedt m.fl. bedömer att med 50 procent marknadspenetration kommer antalet fordonskilometer att öka med 5 till 20 procent. När marknadsandelen så småningom når 95 procent och det blir tillåten att köra robotbilar utan körkort, så kan trafikarbetet mätt i fordonskilometer öka med så mycket som 35 procent.²²

¹⁹ KPMG, 2013.

²⁰ Bierstedt Jane, Gooze Aaron, Gray Chris, Peterman Josh, Raykin Leon och Walters Jerry, 2014.

²¹ KPMG, 2013.

²² Bierstedt Jane, Gooze Aaron, Gray Chris, Peterman Josh, Raykin Leon och Walters Jerry, 2014.

En annan studie som behandlar dessa frågor är Pinjari m.fl. I denna studie diskuteras även hur livsstilsfrågor kan påverka hur vi kan komma att nyttja den nya tekniken. Studien konstaterar att en av de stora fördelarna med självkörande bilar på lång sikt är att det inte kräver någon mänsklig förare. Tiden bakom ratten kommer då av många 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 att vi får en ny våg av stadsutglesning.²³

Detta är den ena sidan av myntet, den andra sidan är att självkörande fordon kan främja en ökad bildelning vilket sannolikt frigör parkeringsytor. Detta skapar förutsättningar för en fortsatt trend mot mer kompakta städer. Huruvida självkörande bilar kommer att innebära tätare eller glesare stadsutveckling är därför svårt att sja om.

Där Bierstedt ser en utveckling mot mindre bilar som ett resultat av självkörande fordons genomslag så ser Pinjari en utveckling mot större bilar. Skälet är att individer önskar göra andra aktiviteter i bilen än bara sitta. Ökat utrymme behövs för underhållning och arbete under resan, det finns till och med tankar på sängplats och toalett i bilen, som vi idag ser på husbilar. Om denna trend visar sig vara korrekt, kan det emlligt Bierstedt i sin tur komma att påverka önskemål om körfältsbredd, parkeringsutrymme och bränslekonsumtion.

Ett flertal faktorer kommer att påverka om bilägandet utvecklas mot personligt ägande, delade ägarformer som bildelning, taxi eller en kombination. En del konsumenter är ovilliga att släppa kontrollen över fordonet medan andra vill utnyttja möjligheten att äga självkörande bilar utan att dela dem med andra. Det kan även komma att utvecklas nya service och ägandeformer som inte finns idag.

Pinjari m.fl. skissar på två motstridiga utvecklingsscenarier:²⁴

Scenario ett: Självkörande bilar ger en skjuts uppåt när det gäller den privata bilmarknaden. Antal resor kommer då att öka liksom reslängderna.

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

Ett svenskt bidrag till diskussionen görs i Burghout m.fl. från 2014. Det handlar då om självstyrda taxibilar med möjlighet att dela taxi. Studien utgår från en simulering av biltrafiken i Stockholm. I studien antas att resenärerna kan tänka sig att samåka, acceptera upp till tio minuter tidsfönster vid beställning av taxi och upp till 30 procent ökad restid för att ta upp andra passagerare. Tid för lastning och lossning uppgår till tre minuter. Referenshastigheten antas vara 20 km per timme i hela nätet.

Resultaten av studien visar att detta skulle leda till att trafikarbetet minskade med 11 procent. Det mest intressanta är dock att antalet fordon som behövdes för att hantera resandet endast skulle bli 5 procent av antalet i referensscenariot med privat ägda manuellt styrda fordon. Bilarna skulle utnyttjas mer och bara vara parkerade 45 procent av tiden.²⁵

Sammanfattningsvis är det uppenbart att det finns osäkerheter kring såväl hur fort utvecklingen kommer att gå som vilka konsekvenser den kommer att få. Det blir därmed inte särskilt meningsfullt att spekulera kring vid vilka specifika årtal som vi kommer att nått någon viss punkt i utvecklingen.

²³ Pinjari Abdul Rawoof, Augustin Bertho och Menon Nikhil, 2013.

²⁴ Pinjari Abdul Rawoof, Augustin Bertho och Menon Nikhil, 2013.

²⁵ Burghout Wilco, Rigole Pierre-Jean och Andréasson Ingmar, 2014.

I litteraturen förutsätts i många fall myndigheter inta en passiv roll och som bäst svara mot den tekniska utvecklingen genom att tillhandahålla infrastruktur och regelverk. I praktiken torde dock en aktiv politik på området kunna styra utvecklingen i olika riktningar och därmed också påverka vilka konsekvenser utvecklingen får. Genom styrmedel och lagstiftning finns stora möjligheter att påverka fordonsflottans sammansättning och hur vi använder bilar. Anser till exempel samhället att det finns potentiella vinster inom trafiksäkerhet och kapacitet genom en ökad andel självkörande bilar så står flera styrmedel tillbuds för att stimulera utvecklingen. Exempel på dessa kan vara att tillåta förarlösa fordon i kollektivtrafikkörfält, erbjuda gratis parkering, undantag för trängselskatt, subventionerad försäkring, etc.

På lång sikt när självkörande fordon utgör ett dominerande inslag i transportsystemet finns det skäl att börja titta på marginalkostnaden för att tillåta icke-självkörande fordon i systemet och överväga att reglera detta i lagstiftning. På vägen dit kan reglering av icke-självkörande fordon i farliga miljöer som gruvor eller miljöer där det är angeläget att trafikregler följs som stadskärnor övervägas.

4 Självkörande fordon och kapacitet

En central fråga när det gäller självkörande bilar är i vilken utsträckning utvecklingen kan bidra till att lösa förväntade framtida kapacitetsproblem på det svenska vägnätet. För att få en uppfattning av hur en utveckling mot en självkörande fordonsflotta kan påverka framtida kapacitet genomförde Trafikanalys under vintern 2014/2015 en trafiksimulering.

För att det skulle vara möjligt att genomföra en trafiksimulering inleddes studien med en undersökning kring vilka trafikala konsekvenser som kan förväntas när fordon blir självkörande. Dessa konsekvensbeskrivningar fick sedan utgöra förutsättningar för simuleringarna.

Baserat på dessa förutsättningar beslutade Trafikanalys att genomföra en simulering av ett scenario där hela fordonsflottan består av självkörande fordon och korta tidsluckor mellan fordonen tillåts. Syftet med simuleringen var att ge en bild av vilka konsekvenser självkörande fordon potentiellt kan få för kapaciteten i det svenska vägnätet, i synnerhet i områden där det finns kapacitetsproblem.

Studien utgår från dagens infrastruktur, eventuella framtida kapacitetsvinster som kan uppstå till exempel genom smalare körfält har inte räknats hem. Möjligen kan kolonnbildning och avveckling av kolonner komma att kräva vissa förändringar av ramputformning, detta har inte tagits hänsyn till.

I studien har kända beräknings- och simuleringsmodeller som nyttjas av Trafikverket använts. Dessa har sedan modifierats för att kunna hantera kortare tidsavstånd med självkörande fordon och fordonskolonner.

4.1 Motorväg

Kapaciteten på en motorväg brukar anges till omkring 2000 fordon per timme och körfält. Utgår man från ett genomsnittligt tidsavstånd mellan fordon på 1,5 sekunder får man kapaciteten 2400 fordon i timmen. Detta innebär en mer aggressiv körstil än den så kallade tresekundersregeln som brukar anges i Sverige eller tumregeln om 1,8 sekunder som anges i Tyskland för säker körning. Kortare tidsavstånd än 1,5 sekunder är till och med olagligt i flera länder.

Om vi vill öka kapaciteten måste vi acceptera kortare tidsavstånd. I Holland och USA anses 0,8 till 0,9 sekunders minsta tidlucka (mellan främre bilens akter och följande bils front) spegla beteendet hos dagens trafikanter med dagens fordon i tät motorvägstrafik. En studie av Minderhoud menar att det är nödvändigt med inställningar för tidluckor hos självkörande fordon under 1,0 sekunder för att inte kapaciteten i vägnätet ska minska.²⁶

För närvarande pågår en utveckling där fler och fler bilmodeller utrustas med aktiv farthållare (ACC). Den bygger på sensorer som beräknar avstånd till framförvarande bil, reglerar hastigheten och gör inbromsningar om avståndet blir för kort. Moderna bilar med aktiv

²⁶ Minderhoud M.M., 1999.

farthållare är oftast programmerade med tidsavstånd på 1,0 till 2,5 sekunder, vilket inte självklart leder till ökad kapacitet. Det kan däremot harmonisera flödet och därmed minska risken för störningar. Föraren anger själv det önskade tidsavståndet till framförvarande fordon.

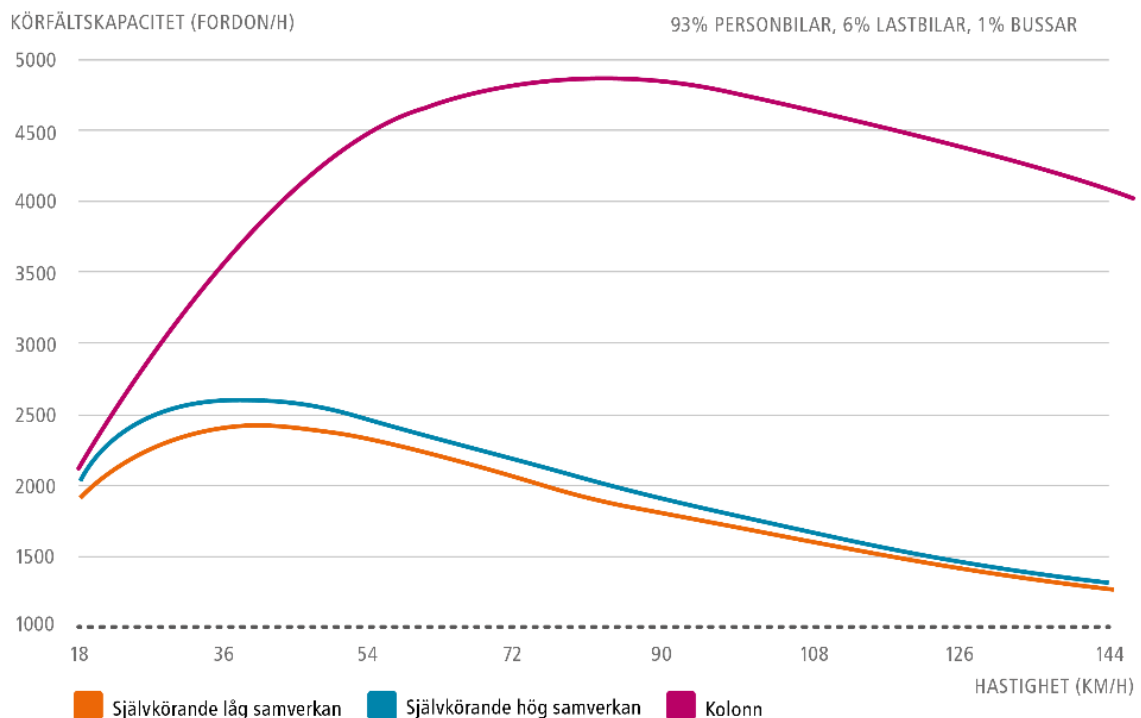
Nästa steg i utvecklingen innebär fordon med aktiv farthållare som också är självstyrande. Till en början kan man vänta sig att säkerhetsfrågorna står i förgrunden, varför bilarna kommer att följa hastighetsgränsen och inte tillåta kortare tidsavstånd. Det finns därför en uppenbar risk att de första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

Kommunikationsmöjligheter ökar sannolikheten för att kortare tidsavstånd ska tillåtas. 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 med mera till angränsande bilar. Detta gör olika manövrar säkrare och tidsavstånd på 0,5 till 1,0 sekunder mellan bilarna kan komma att tolereras.

Det stora språnget i kapacitet sker med övergången till fordonskolonner. Här tänker man sig 2 till 10 fordon som styrs i grupp med 0,1 till 0,5 sekunders tidlucka inom gruppen och 2 till 3 sekunders tidlucka till nästa grupp. Genom högnivåkommunikation styrs samverkan inom gruppen. Om många sådana grupper med korta tidluckor bildas ökar kapaciteten kraftigt.

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 av fordon i kolonner, lossning av kolonner och passering av kolonnkörande fordon. Det gäller även styrning av vävning och växling vid trafikplatser samt möjliggörande av kapacitetstillskott även i stadstrafik med cyklister och fotgängare i trafikmiljön. Detta förutsätter mer avancerad styrning, som föreslås ske genom centraliserade, hierarkiska eller decentraliserade lösningar med styrapparater på flera nivåer i trafiksystemet.

Figur 4.1 visar den idealt högsta kapaciteten som kan nås utan hänsyn till dessa faktorer.



Figur 4.1: Kapacitet som funktion av hastighet för en typisk fordonssammansättning på stadsmotorvägar (i USA).²⁷

Maxkapaciteten kan med självkörande uppgå till ca 2500 fordon/h. Om fordonen däremot kan kommunicera med varandra och köra i kolonn ökar denna siffra dramatiskt. Som mest kan kapaciteten fördubblas. Förutsättningen är då att alla fordon kör i kolonn.

Flera optimistiska tidningsartiklar pekar på att kapaciteten skulle kunna femfaldigas med automatiska fordon. Detta anges bland annat i en studie av Transportstyrelsen.²⁸

Förutsättningarna är att:

- alla bilar kör i kolonn
- lastbilar och bussar är uteslutna
- bilar med en bromsförmåga under en viss nivå utesluts (0,65 g)

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 då till variationer i efterfrågan, bildning och upplösning av kolonner eller effekter av körfältsbyten och begränsningar vid på- och avfarter.

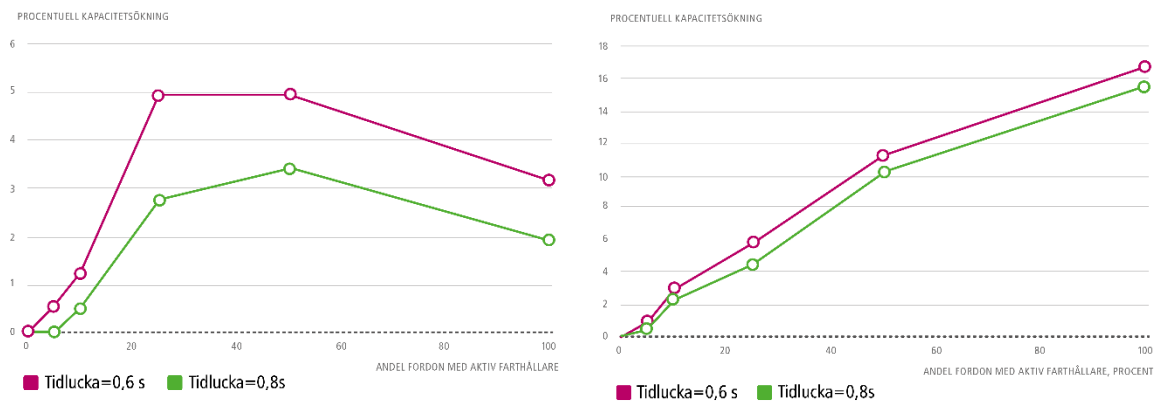
Ju fler fordon kolonnerna innehåller, desto högre blir kapaciteten. Om avståndet mellan fordonen i kolonnen ökar, minskar sannolikheten för olyckor. Men nackdelen är att olyckorna inom kolonnen istället kan ske i högre relativa hastigheter och då sannolikt leda till allvarigare olyckor. Det krävs alltså en avvägning mellan kapacitet och säkerhet när fordonskolonnerna vidareutvecklas.

²⁷ Michael James B., Godbole Datta N., Lygeros John, och Senguptaet Raja, 1998.

²⁸ Transportstyrelsen, 2014

Det är ett välkänt faktum att effektiviteten i vägnätet bestäms av dess svagaste länkar, det vill säga flaskhalsarna (påfarter, växling och vävning). Hur effektiviteten vid flaskhalsar kan påverkas av bilar utrustade med aktiva farthållare (ACC) undersöktes redan 2001 i en studie av Hoogendoorn och Minderhoud. I sin studie utgick de från den första generationens aktiva farthållare och genomförde trafiksimuleringar med dessas tekniska specifikationer som underlag.²⁹

Bilderna nedan visar resultatet av simuleringarna för ett scenario med en flaskhals vid en avfart där tre körfält övergår i två körfält respektive motsvarande för påfarter där två körfält blir tre körfält.



Figur 4.2: Relativ förändring av kapacitet med aktiv farthållare vid avfarter (vänster) resp. påfarter (höger)

Vid avfarter väntades tekniken som mest ge 5 procent ökning av kapaciteten vid den kortare tidlucka mellan fordonen (0,6 sekunder) som modellerades. Ett intressant resultat är att kapacitetsvinsten vid avfarter är störst vid cirka 50 procent penetration. Vid högre införandegrad reduceras vinsten på grund av högre kritisk hastighet vid kapacitetsmaximum, vilket leder till att högra körfältet blir mer outnyttjat. Vid påfarter ökar kapaciteten närapå linjärt med införandegraden. Vid 100 procent är ökningen cirka 17 procent för 0,6 sekunders tidlucka.

Den svenska modellen för beräkning av kapacitet vid trafikplatser har tagits fram av Trafikverket. Enligt denna minskar kapaciteten på grund av trafikplatsens inverkan med 4 till 8 procent, beroende på påfartsflödets storlek. Motsvarande samband bör gälla även i framtida trafik med kolonnkörande självkörande bilar.³⁰

Ett fullt genomslag av självkörande fordon skapar dock andra förutsättningar och en mer futuristisk lösning som kräver full implementering redovisas i Milanès m.fl. från 2011. Här förutsätts att det finns en styrapparat i trafikplatsen, som kan kommunicera med fordon på passerande väg och på ramp. I denna modell utvecklas ett automatiskt vävningssystem 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

²⁹ Hoogendoorn S.P. och Minderhoud M.M. 2001

³⁰ Trafikverket, 2013.

Systemet består av tre delar:

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

Med denna typ av system blir det möjligt att smidigt bilda kolonner utan någon större negativ påverkan på kapaciteten.³¹

Sammanfattningsvis framstår det som om en 100-procentig marknadspenetration av självkörande fordon kommer att ge en del positiva effekter på kapaciteten på motorvägar. Effekten blir dock inte särskilt stor så länge fordonen beter sig på samma sätt som vanliga förare beter sig idag. De vinster som uppstår är främst mindre effektivitetsvinster som uppstår på grund av minskat antal olyckor och jämnare flöden.

De riktigt stora vinsterna uppstår när kolonnkörning börjar appliceras och tidsluckorna kan krympas ner mot 0,1 sekund. Kan detta dessutom kombineras med teknik för kommunikation mellan fordon och infrastruktur (V2I och V2V) så att det går att skapa styrapparater vid på- och avfartsramper finns sannolikt stora effektivitetsvinster att hämta hem.

Dessa förutsättningar gäller en infrastruktur som i huvudsak inte är optimerad för självkörande fordon, med en sådan på plats är det sannolikt att ännu större kapacitetsvinster kan uppnås.

4.2 Stadstrafik

En avgörande faktor för hur självkörande fordon kommer påverka kapaciteten i städer är hur väl de kan underlätta ett tätt flöde vid trafiksignaler. En av fördelarna med självkörande 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.³² Det finns redan självreglerande intelligens i trafiksignaler, men med självkörande fordon som kan kommunicera med infrastrukturen och andra fordon ökar möjligheterna dramatiskt att utveckla betydligt smartare tidssättning av trafiksignalerna.³³

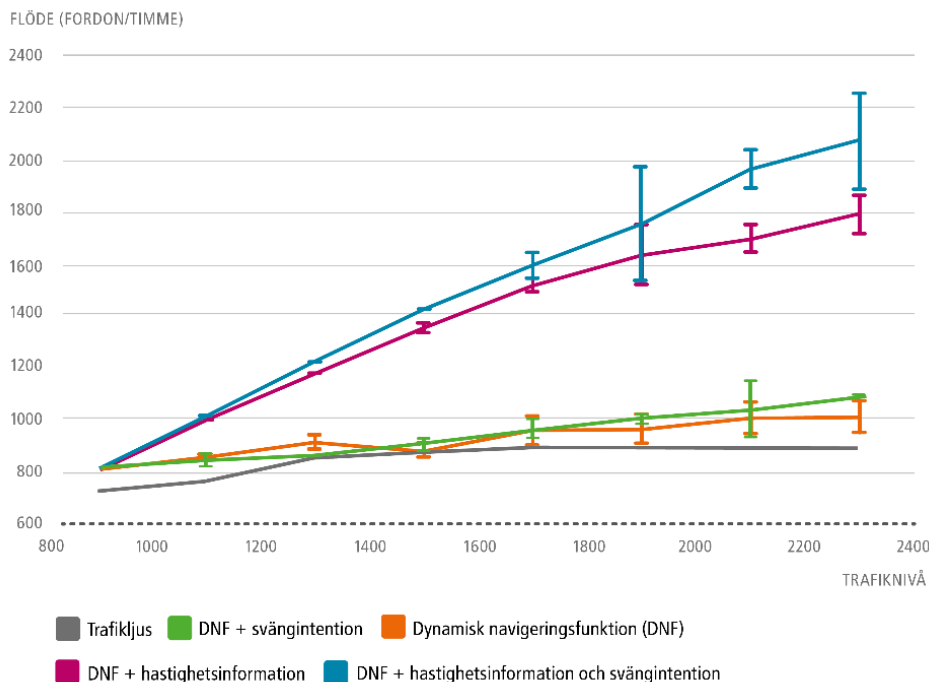
En studie av Makareem och Gilet från 2012 har undersökt potentialen för tänkbara förbättringar av styralgoritmer för tätortskorsningar med automatiska fordon. I studien förutsätts 100 procent automatiska fordon. Dessa antas vara av två typer, personbilar och lastbilar. Hastighetsgränsen är 50 km/h och 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 korsande ben i korsningen. Fordonen kan kommunicera att de ska svänga höger, vänster eller köra rakt fram, vilket ökar effektiviteten.

³¹ Milanès V, Godoy J, Villagrà J och Pérez J. 2011

³² Eno Center for Transportation, 2013.

³³ Pinjari Abdul Rawoof, Augustin Bertho och Menon Nikhil, 2013.



Figur 4.3: Totalt flöde för fyra skilda fall med informationsutbyte mellan fordon.

Enligt studien kan kapaciteten fördubblas i relation till dagens trafiksignaler (svart). Med enbart navigeringsfunktionen (DNF, orange) ökar kapaciteten cirka 15 procent. Om denna kompletteras med information om svängintention (grön) ökar kapacitet ytterligare till 25 procent. De verkligt stora förändringarna nås med positions- och hastighetskommunikation (cerise), särskilt om även svängintentionen anges (blå). Det skulle då teoretiskt vara möjligt att dubbla kapaciteten i korsningarna.³⁴

Ett annat exempel på lösningar för självkörande fordon i korsningar återfinns i Au m.fl., i detta fall antas att det finns en blandning av manuellt styrda fordon, semiautomatiska fordon och helautomatiska fordon.

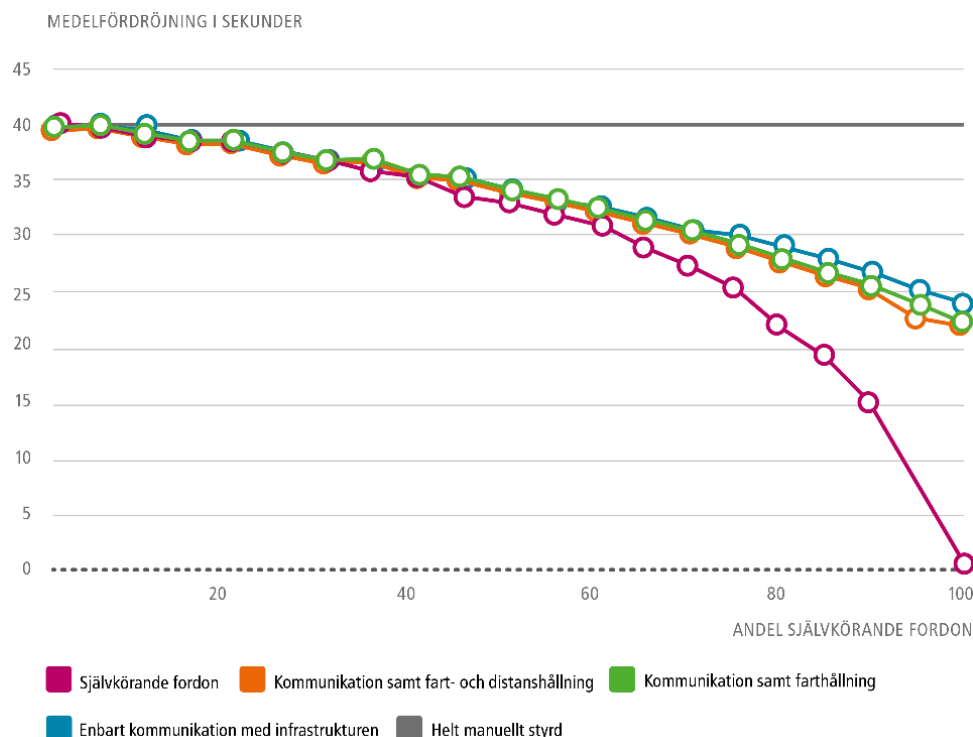
Semiautomatiska fordon kan vara av tre slag:

- enbart kommunikation med infrastrukturen
- kommunikation samt farthållning
- kommunikation samt fart- och distanshållning (ACC)

Styrningen utgår från att självkörande 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 självkörande eller semiautomatiskt 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.

³⁴ Makarem Laleh och Gilet Denis, 2012.



Figur 4.4: Semi-automatiska fordon jämfört med manuellt styrda fordon

Referensnivån med trafiksignaler innebär 40 sekunders fördröjning per fordon. Förbättringar kan ske successivt. Med hälften semiautomatiska fordon är förbättringen 10 till 15 procent. Av bilden framgår också de oerhört stora vinster som är möjliga med fullt självkörande fordon vid införandenivåer på 80 till 100 procent.³⁵

4.3 Resultat av simuleringar

Nedan redovisas resultaten av trafiksimuleringarna som gjort för innerstadsmiljö och stads-motorväg med kapacitetsproblem i Stockholm. För respektive trafikmiljö återfinns initialt en redogörelse för vilka ingångsvärden som använts i simuleringarna.

Självkörande fordon i motorvägsmiljö

I motorvägsmiljöscenariot utgås från 0,1 sekunders tidlucka i alla körfält för alla fordon och högst 5 fordon per kolonn i simuleringarna. Kapaciteten reduceras med avseende på vävande och växlande andel med personbilslängd plus 0,1 sekunder i trafikplatsen.

Vi antar här att tidluckan mellan kolonnerna måste vara relativt stor, 60 meter, vilket motsvarar 2 till 3 sekunder vid hastigheter på 70 till 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.

Problemet med packning och lossning av kolonnkörande fordon i hög fart och med liten tid-lucka antas löst i och med att vi antagit 60 meters avstånd mellan kolonner i huvudströmmen.

³⁵ Au Tsz-Chin, Zhang Shun och Stone Peter, 2014.

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 personbilsekvivalenter. Hypotesen är tills vidare att det är för svårt att kolonnbilda trafiken vid avfart. Därför antas denna vara slumpmässigt fördelad i tiden, precis som dagens trafik.

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

Vävning och växling

Beräkningarna och simuleringarna bygger på de grundläggande modellerna som närmare beskrivs i Trafikverkets metodbeskrivning för beräkning av kapacitet i trafikanläggningar.³⁶ I de beräkningar och simuleringar som har gjorts för att uppskatta kapacitetsökningarna i samband med 100 procent självkörande fordon har således följande beräkningsantaganden använts:

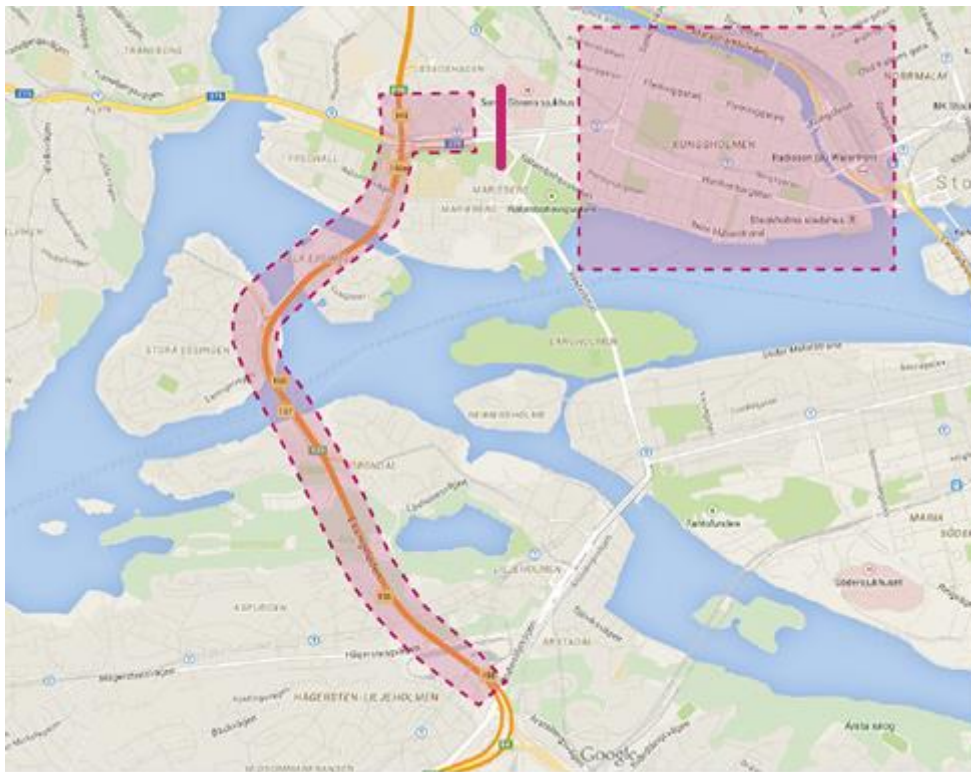
- Fordonskolonner i genomgående körfält består i analyserna av tre (alternativt fem) fordon
- Avståndet mellan fordonskolonnerna i genomgående körfält är 60 meter
- Fordonskolonner i påfartsrampen består i samtliga fall av tre fordon
- Ankomsten för kolonnerna i påfartsrampen är slumpmässig
- Fordon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

Beräkningarna har varit relativt komplicerade och krävt viss omprogrammering av Trafikverkets modeller.

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 ligger nära den del av nedre Kungsholmen som har skurits ut för detaljerade studier av självkörande fordon i tätort.

³⁶ Trafikverket, 2013



Figur 4.5 Essingeleden simuleras (skuggat frihandsområde) och snittet mot tätortsmodellen (skuggad rektangel) är markerat med rött streck.

Jämförelsealternativ (JA)

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

Jämförelsealternativet behandlar Essingeleden med avgränsning till sträckan norrut från punkten där E4/E20 vävs samman med riksväg 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.

Utredningsalternativ (UA)

Scenariot avser således en framtida situation, där alla bilar förutsätts vara självkörande i kolonner om 5 fordon med en tidlucka på cirka 0,1 sekunder och ett avstånd mellan kolonnerna på 60 meter. I detta steg ansätts nya kapacitetsvärden i modellen för 100 procent självkörande 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.

Resultat av simuleringarna

Resultatet vid beräkningarna med Trafikverkets modell Calmar innebär att flaskhalsens möjliga genomströmning ökar med drygt 70 procent. Kapacitetsförändringarna avser

situationen med fem fordon i kolonn för genomgående körfält och tre fordon i anslutande kolonner på påfarter. Resultatet från simuleringen framgår av figur 4.6.

Avsnitt	Flöde JA	Flöde UA	Ökning
Länk RV 75	2 700	4 650	72%
Länk E4 / E20	3 600	6 190	72%
Påfart Hägerstensvägen	750	1 280	71%
Påfart Gröndal	380	650	71%
Avfart St. Essingen	400	680	70%
Avfart Fredhäll	500	880	76%
Avfart Kristineberg	1 300	2 290	76%

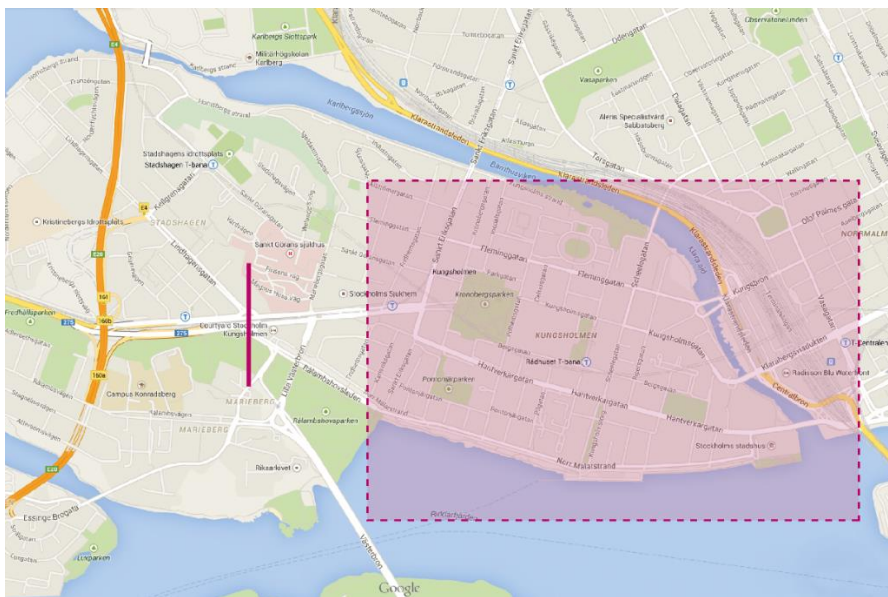
Figur 4.6 Effekter mellan kl. 06:45-07:45 för Essingeleden.

Självkörande fordon i innerstadsmiljö

För att simulera självkörande fordon i innerstadsmiljö används simuleringsmodellen Contram. Sekundärkonflikter mellan fordon undviks genom ökad kommunikation mellan dem. Fordon förutsätts kunna starta i trafiksignal vid grönt utan tidsfördröjning och följa varandra genom korsningen med 0,1 sekunders tidlucka. Detta motsvarar 1 meter vid 36 km/h. Genom effektivare utnyttjande av gröntiden väntas mättnadsflödena öka. 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, det vill säga att alla gång- och cyklistströmmar ges grönt samtidigt utan några konflikter mellan dem och bil. Detta bör även ge trafiksäkerhetsvinster som förstärks då ensamma bilar i gatunätet ersätts av "fordonståg" (kolonner) med självkörande fordon.

Området

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



Figur 4.7 Nedre Kungsholmen simuleras (rektangel) och snittet mot motorvägsmodellen är markerat med rött streck

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

Jämförelsealternativ (JA)

Jämförelsealternativet består av dagens trafiksituation under morgonens rusningsperiod mellan klockan 6.30 och 9.30 där det finns ett flertal dimensionerande flaskhalsar i gatunätet, det vill säga där kapaciteten överskrids under maxtimmarna. 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.

Utnedningsalternativ (UA)

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

Tidssättningen i trafiksignalerna, det vill säga 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.

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

Resultat av simuleringarna

Resultatet från simuleringarna framgår av figur 4.8 Jämförelsealternativet (JA) med dagens trafik innebär en reshastighet på 22,2 km/h. Om efterfrågan fördubblas utan självkörande bilar skulle reshastigheten minska med två tredjedelar, till 7,7 km/h.

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

Beräkningsfall	Restid bil (fordonstimmar)	Kötid bil (fordonstimmar)	Genomsnittlig hastighet (km/h)
JA-dagens trafik/utformning	745	230	22,2
UA-0 %, efterfrågan 200 %	2 150	1 640	7,7
UA-100 %, efterfrågan 200 %	652	139	25,3
UA-100 %, efterfrågan 250 %	3 210	1 580	12,9

Figur 4.8. Effekter mellan kl. 7-9 nedre Kungsholmen (UA innebär korsningsutformning utan sekundärkonflikt med GC-trafik)

Slutsats

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

Beräkningarna visar att med antagandet att fordonskolonner går att bilda i motorvägsmiljö med 0,1 sekunders tidlucka 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 drygt 70 procent.

Exemplet från innerstadsmiljön visar samtidigt att kapaciteten i korsningarna om fordonen kan passera korsningen med 0,1 sekunders tidlucka 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.

Beräkningarna som genomförts avser i vissa avseenden 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. I simuleringen har dock inga förändringar av infrastrukturen genomförts. Självkörande fordon behöver inte samma körfältsbredd som förarstyrda fordon vilket innebär att det sannolikt skulle gå att få plats med fler körfält i en infrastruktur som är optimerad för självkörande fordon. Sannolikt skulle också på- och avfartsfiler optimeras på ett annat sätt om de utformats för en helt automatiserad fordonsflotta.

Exemplen är sannolikt inte representativa för alla delar av motorvägs- och innerstadsnätet. Men om kapaciteten kan öka på många håll får man trimma systemet som idag på andra håll där kapaciteten lokalt inte räcker till.

Ökad kapacitet behöver naturligtvis inte tas i anspråk för ytterligare motoriserade fordon. Ett alternativ är att ta mer gatuutrymme i anspråk för cyklister och gående. Ett annat alternativ är att använda frigjort utrymme till icke-trafikala ändamål.

5 Slutsatser

Utvecklingen av teknik för självkörande fordon går fort och det pågår redan tester med fordon på automatiseringsnivå tre enligt SAE i det allmänna vägnätet och helt självkörande i avgränsade miljöer. Likväl visar litteraturgenomgången att det fortfarande är långt kvar innan självkörande fordon kommer utgöra ett dominerande inslag i transportsystemet. Enligt litteraturen tycks en mer påtaglig inverkan på kapaciteten inte kunna väntas förrän hälften av fordonsparken utgörs av självkörande bilar. Osäkerheterna är så stora att det knappast är meningsfullt att spekulera kring hur långt utvecklingen har nått vid olika tidpunkter.

Trots att de riktigt stora effekterna i termer av kapacitet inte förväntas på kort sikt finns det ändå anledning att ta hänsyn till utvecklingen i dagens transportpolitik. Även 10 till 25 procent är betydande effekter, det motsvarar till exempel ett nytt körfält på en motorväg eller att utnyttja vägrenen som på E4 mellan Hallunda och Södertälje. 10 procent ökad kapacitet kan mycket väl halvera fördröjningarna i samband med köer. Ledtiderna inom infrastrukturplaneringen är dessutom långa och när flera av de stora investeringsprojekten som planeras idag står färdiga kommer sannolikt en stor del av fordonsflottan vara utrustad med olika automatiska funktioner.

En första huvudslutsats är att det är viktigt men inte okomplicerat att på ett strukturerat sätt följa fordonsflottans automatisering.

För att stödja välgrundade beslut inom transportpolitiken bör utvecklingen av den svenska fordonsflottans automatisering följas strukturerat. Studien av olika klassificeringssystem visar att det är komplicerat att skapa en robust definition av fordonsautomation. Det är lätt att fokus enbart hamnar på tekniken, det är dock lika viktigt hur tekniken används. I dagsläget framstår det som om att SAE:s klassificering av olika automatiseringsgrader, där hänsyn även tas till hur föraren använder tekniken, är det system som är mest vedertaget. Det är dock för tidigt att beskriva utvecklingen av den svenska fordonsflottan utifrån denna. I dagsläget är det bättre att följa och bidra i arbetet kring en gemensam europeisk definition. Enklare indikatorer för andel av fordonsflottan med funktioner som aktiv farthållare och parkeringsassistans kan dock vara intressant att följa redan idag, eventuellt inom ramen för Trafikanalys statistikuppdrag.

En andra huvudslutsats är att det finns mycket att tjäna på fullständig implementering av självkörande fordon i termer av kapacitet.

Fokus i denna studie har varit att undersöka vilka kapacitetsvinster självkörande fordon kan bidra med i transportsystemet givet att vi använder bilen på ungefär samma sätt som idag. Avgörande för förbättring av vägkapaciteten på trafikleder tycks vara att minsta tidlucka kan minska från nuvarande 0,8 till 1,2 sekunder för manuellt styrda fordon ner till 0,5 sekunder för automatiskt styrda individuella fordon och till 0,1 sekunder för automatstyrd kolonnkörning. För att det ska vara möjligt att köra så tätt så kommer fordonen att behöva kommunicera med varandra. För att smidigt kunna bilda och lösa upp kolonner vid trafikplatser så kommer fordonen även behöva kommunicera med infrastrukturen.

Samverkan mellan fordon tycks även vara avgörande för att förbättra kapaciteten vid trafikplatser och i korsningar i innerstadsmiljö. Chansen att två fordon ska vara samverkande är andelen sådana självkörande fordon i kvadrat. Sannolikt krävs därför mer än 75 procent

självkörande bilar för att få signifikanta effekter vid trafikplatser och i korsningar. I innerstads-miljö visar studien att det finns potential att få in betydligt fler fordon om dessa går att packa tätare. Detta innebär att den kapacitetsökning som uppstår på stadsmotorvägarna genom självkörande fordon inte kommer resultera i nya flaskhalsar i innerstaden. Ett effektivt utnyttjande av vägkapaciteten innebär dock inte nödvändigtvis att vinsten tas i anspråk för ökad biltrafik. Ett alternativ är att använda frigjort vägutrymme för andra ändamål.

En annan intressant aspekt av simuleringarna i stadsmiljö är att det genomförts med all-gå-fas vid signalreglering, detta innebär att fotgängare och cyklister aldrig har grönt samtidigt som något körfält för bil. Detta i kombination med att det blir väldigt tätt mellan fordonen torde innebära stora trafiksäkerhetsvinster.

I litteraturen förutsätts i många fall myndigheter inta en passiv roll i utvecklingen av självkörande fordon och som bäst svara mot den tekniska utvecklingen genom att utveckla infrastrukturen och regelverk. I praktiken torde dock en aktiv politik på området kunna styra utvecklingen i olika riktningar och därmed också påverka vilka konsekvenser utvecklingen får. Genom styrmedel och lagstiftning finns stora möjligheter att påverka fordonsflottans sammansättning och hur fordonen förflyttas i vägsystemet. Förutsättningarna att uppnå god regel efterlevnad är sannolikt bättre avseende automatiska fordon än avseende traditionella fordon.

Anser samhället att det finns potentiella vinster inom trafiksäkerhet och kapacitet genom en ökad andel självkörande bilar står flera styrmedel tillbuds för att stimulera utvecklingen. Exempel på styrmedel som kan ligga närmare i tiden kan vara att tillåta förarlösa fordon i kollektivtrafikkörfält, erbjuda gratis parkering och ge undantag för trängselskatt. På längre sikt, när självkörande fordon utgör ett dominerande inslag i transportsystemet, finns det skäl att börja titta på marginalkostnaden för att tillåta icke-självkörande fordon i system och överväga att reglera detta i lagstiftning. Sannolikt, någonstans och vid någon tidpunkt, kommer vissa vägmiljöer helt reserveras för automatiska fordon som uppfyller givna krav.

Att finansiera och underlätta forskning på området är ett annat sätt att stödja utvecklingen. En fördel som talar för Europa och i synnerhet Sverige är att vi inte har samma preventiva försäkringstradition som till exempel USA. I Sverige delar vi på kostnader som uppstår till exempel i samband med behov av sjukhusvård vid olyckor. Detta innebär att vi får betydligt lägre kostnader för att genomföra pilotprojekt i det allmänna vägnätet.

En del i utvecklingen kan vara att bara använda självkörande fordon i farliga miljöer som gruvor eller miljöer där det är angeläget att trafikregler följs och en aktör kan kontrollera fordonsflottan.

För att maximera nyttan kommer det vara nödvändigt med styrmedel som reglerar hur fordonen används. Givet att vi får en utveckling i enlighet med simuleringarna så kommer trafiken att kunna öka kraftigt utan större investeringar i ny infrastruktur. Om vi använder bilen på samma sätt som idag skulle det innebära en kraftig ökning av efterfrågan på parkering. Ett sätt att hantera detta är att förlägga parkeringsanläggningar i perifera lägen och låta bilarna hämta upp sina passagerare vid behov. Nackdelen med detta är att det skulle ge upphov till tomkörning. Ett annat alternativ är det som beskrivs i en studie från KTH där varje fordon utnyttjas mer effektivt vilket ger många passagerarkilometer per parkeringsplats. En sådan utveckling skulle till exempel kunna stimuleras genom att fordonsägande beskattas högt genom till exempel fordonskatt medan olika typer av bildelningstjänster momsbefrias.

Sammanfattningsvis väcker utvecklingen kring självkörande fordon många frågor. En fråga är om den potentiella kapacitetsökning som kan uppstå såväl i stadsmiljö som på motorvägar i takt med att ny teknik introduceras kan hantera den trafikökning som planeringen utgår från.

Hur mycket ny infrastruktur kommer i så fall att behövas? En annan fråga är hur möjligheten att arbeta eller koppla av under resan kommer att påverka betalningsviljan för minskad restid med bil och därmed den samhällsekonomiska lönsamheten i infrastrukturinvesteringar för biltrafik? Utifrån ett kapacitetsperspektiv är det också värt att påpeka att den största potentialen fortfarande ligger i att få in fler personer i befintliga fordon. När det idag är köer på Essingeleden återstår åtminstone 75 procents av den befintliga kapaciteten i form av tomma säten. Det är mer kapacitet än kolonnkörning med 0,1 sekunds tidlucka kan bidra med enligt vår simulering.

6 Referenser

Omvärldsstudien är generellt baserad på följande underlagsrapporter:

Lind Gunnar, Strömgren Per och Davidsson Fredrik (2014) Effekter av självstyrande bilar - Litteraturstudie och probleminventering, Movea.

Lind Gunnar, Strömgren Per och Davidsson Fredrik (2015) Effekter av självstyrande bilar - Kapacitetsanalys, Movea.

Amanuel Mahdere D.W., Habibovic Azra och Wedlin Johan (2014) Följande av personbilsflottans automatiseringsgrad - En förstudie initierad av Trafikanalys, Viktoria Swedish ICT.

I underlagsrapporterna återfinns i sin tur ett antal referenser av dessa har följande används i omvärldsrapporten:

Au Tsz-Chin, Zhang Shun and Stone Peter (2014) Autonomous Intersection Management for Semi-Autonomous Vehicles. In Handbook of Transportation

Banks V. a., Stanton N. a., and Harvey C., "Sub-systems on the road to vehicle automation: Hands and feet free but not 'mind' free driving," Saf. Sci., vol. 62, pp. 505–514, Feb. 2014.

Bierstedt Jane, Gooze Aaron, Gray Chris, Peterman Josh, Raykin Leon and Walters Jerry (2014): Effects of Next-Generation Vehicles on Travel Demand and Highway Capacity. FP Think

Burghout Wilco, Rigole Pierre-Jean and Andréasson Ingmar (2014) Impacts of Shared Autonomous Taxis in a Metropolitan Area. Royal Institute of Technology, Stockholm.

Eno Center for Transportation (2013) Preparing a Nation for Autonomous Vehicles. Opportunities, Barriers and Policy Recommendations.

EPoSS. European Roadmap Smart Systems for Automated Driving, 2015

Gasser T. M. and Westhoff D., "BAST-study: Definitions of Automation and Legal Issues in Germany," Transportation Research Board (TRB), 2012. [Online]. Available: <http://www.trb.org/>.

Hoogendoorn S.P. and Minderhoud M.M. (2001) ADAS Impact Assessment by Micro-Simulation

KPMG (2013) Self-Driving Cars: Are We Ready?

Makarem Laleh and Gilet (Denis 2012) Information sharing among autonomous vehicles crossing an intersection. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Lausanne, Switzerland

Michael James B., Godbole Datta N., Lygeros John, and Senguptaet Raja (1998) Capacity Analysis of Traffic Flow over a Single-Lane Automated Highway System. California PATH

Milanès Vicente, Godoy Jorge, Villagrà Jorge and Pérez Joshué (2011) Automated On-Ramp Merging System for congested Traffic Situations. IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems, vol 12. No 2, June 2011.

Minderhoud M.M. (1999) Supported Driving: Impacts on Motorway Traffic flow

NHTSA, "National Highway Traffic Safety Administration Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles," 2013.

Pinjari Abdul Rawoof, Augustin Bertho and Menon Nikhil (2013): Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles: An Assessment. Centre for Urban Transportation Research. Florida, USA.

SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (SAE J3016)," 2014.

Save L., Feuerberg B., and Avia E., "Designing Human-Automation Interaction: a new level of Automation Taxonomy," in The Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting (HFES Europe), 2012

Sheridan T. B. and Verplank W. L., "Human and computer control of undersea teleoperators," Cambridge, MA, 1978.

Trafikverket (2013) TRVMB: Kapacitet och framkomlighetseffekter. Trafikverkets metodbeskrivning för beräkning av kapacitet och framkomlighetseffekter i vägtrafikanläggningar. TRV 2013:64343

Traffic Technology International Aug/Sep 2014

Transportstyrelsen (2014) Litteraturstudie. Autonom körning – HF/MTO.

Wagner Jason, Baker Trey, Goodin Ginger and Maddox John (2014) Automated vehicles: Policy implications scoping study. Texas A&M Transportation Institute, USA.

Hemsidor:

http://www.bhpbilliton.com/home/investors/news/Documents/2014/140423_BHPBillitonOpensJimblebarIronOreMine.pdf?utm_campaign=cmp_305003&utm_source=getnewsletter

<http://www.sae.org/about/>



Trafikanalys är en kunskapsmyndighet för transportpolitiken. Vi analyserar och utvärderar föreslagna och genomförda åtgärder inom transportpolitiken. Vi ansvarar även för officiell statistik inom områdena transporter och kommunikationer. Trafikanalys bildades den 1 april 2010 och har huvudkontor i Stockholm samt kontor i Östersund.