

Automatiserade stadsbussar - busståg, hållplatsdockning och depåprocesser

Publik rapport



Författare: Joakim Jonsson, Volvo Bussar
Gunnar Ohlin, Lindholmen Science Park
Nikita Zaiko, Lindholmen Science Park
Amal Elawad, Chalmers tekniska högskola

Datum: 2022-04-29
Projekt inom Trafiksäkerhet och automatiserade fordon - FFI - 2017-06-13

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary	4
3 Bakgrund	6
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	8
4.1 Forskningsfrågor	8
4.2 Metod.....	9
5 Mål	9
6 Resultat och måluppfyllelse	10
6.1 AP2 - Utveckling av algoritmer och fordonskontroll för säker autonom körning av stadsbussar	11
6.2 AP3 - Utveckling och tillhandahållande av fordon	12
6.3 AP4 Utveckling och tillhandahållande av test- och demonstrationsyta	13
6.4 AP5 Digitalt kopplade busståg	14
6.5 AP6 Bus stop docking - Automatisk in- och utkörning hållplats	15
6.6 AP7 - Autonoma depåprocesser	15
6.7 AP8 Systemanalys	17
7 Spridning och publicering	22
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	22
7.2 Publikationer.....	24
8 Slutsatser och fortsatt forskning	24
8.1 Fortsatt forskning och utveckling	26
Deltagande parter och kontaktpersoner	27

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Digitaliseringen och en ständigt ökande processorkraft har på 2000-talet gjort det möjligt att framföra fordon automatiskt i större utsträckning än tidigare. Elektrifieringen av fordon har också bidragit till att göra det enklare att införa autonoma funktioner men är inte en absolut förutsättning. På den tunga sidan har försök gjorts med automatiserad kolonnkörning, s.k. platooning, i syfte att effektivisera och minska bränsleförbrukningen med tunga fordon på motorväg. Inom kollektivtrafiken har det på olika håll i världen under de senaste fem åren gjorts en mängd försök och demonstrationer med små, långsamtgående autonoma skyttlar för korta resor. Relativt få försök har gjorts med helt eller delvis autonom körning av fullstora bussar.

Det övergripande målet med projektet har varit att för olika användarfall utveckla grader av automatiserad körning av elektrifierade 12-metersbussar med hög trafiksäkerhet och kapacitet och till en låg total samhällskostnad. Projektet initierades i syfte att utforska hur man stegvis och i olika tillämpningsfall kan använda sig av autonom körning eller autonomt förarstöd för att på sikt kunna dra nytta av tekniken i verklig trafik.

Projektet har fokuserat på utveckling av automatiserade funktioner för tre olika användarfall:

- *Busstågkörning* - Busstågkörning kan öka kapaciteten i befintligt kollektivtrafiksystem på ett samhällsekonomiskt resurseffektivt sätt och bidra till ökad attraktivitet för kollektivtrafik vilket minskar vägtransporternas miljöpåverkan.
- *Autonom hållplatsinkörning* - Autonom hållplatsinkörning med bussar som kan köra självt och upptäcka oskyddade trafikanter kan potentiellt minska antalet skadade och dödade i trafiken, minska busslitage och öka passagerarkomfort.
- *Autonoma depåprocesser* – Att flytta bussar förarlöst mellan olika depåtgärder som tvätt, städ och laddning eller vid parkering respektive framkörning minskar risken för olyckor eller skador på bussarna samtidigt som behovet av personal i depån minskar, vilket är önskvärt, särskilt nattetid.

Projektet har arbetat i iterativ utvecklingsprocess mellan systemutveckling, integration i buss och test/verifiering för respektive tillämpning/användarfall. De funktionella kraven i varje tillämpning driver vidareutvecklingen som i sin tur simuleras/verifieras innan vald lösning implementeras i fordonen och utvärderas vilket leder till nästa iteration. Parallellt med tekniskt utvecklingsarbete har tillämpningar av tekniken studerats teoretiskt i workshopformat med representanter från intressenter och behövsägare, såsom trafikkontor, stadsbyggnadskontor, kollektivtrafikhuvudmän, kollektivtrafikoperatörer med flera.

Mycket arbete återstår innan fullstora bussar kommer att köra autonomt på allmän väg. Projektet har utvecklat teknik som demonstrerats i det parallella projektet KRABAT (Drive Sweden) som visat att autonom körning kan vara möjlig att införa i avgränsade miljöer, till exempel depåer, en stor utmaning på vilket sätt säkerheten garanteras. Tekniken kan även införas som förarstöd på allmän väg som vid hållplatsinkörning eller igenom trånga passager men fortfarande med en förare vid ratten, beredd att ta över kontrollen över fordonet. Busstågkörning har identifierats som ett intressant koncept. Busståg bedöms kunna införas till en början med rent manuell teknik varefter graden av autonom körning kan ökas, mycket beroende på om busståget körs på dedikerade busskörvägar eller delar trafikmiljö med andra fordon och trafikanter.

Projektgruppen har särskilt identifierat ett behov av fortsatt forskning, inklusive test- och demo inom busstågkörning i syfte att snabbare kunna implementera tekniken i verklig trafik. Busstågkörning kan tekniskt realiserats i olika tekniknivåer eller grad av automation. Även om busståget framförs manuellt med förare i varje buss finns det potentiella vinster att göra i kollektivtrafiksystemet avseende ökat kapacitetsutnyttjande av hållplatser och en möjlighet att transportera fler resenärer i rusningstid. Med en successivt ökande grad av automation kan kostnaderna sedan minska genom reducerad bemanning eller alternativt kan förare i buss 2 utföra andra arbetsuppgifter av värde för resenären.

I projektet har följande parter ingått: Chalmers genom Mekanik och maritima vetenskaper och Elektroteknik; Göteborgs Stad genom Trafikkontoret, Stadsbyggnadskontoret och Älvstranden Utveckling; Lindholmen Science Park AB; Volvo Bussar AB; samt Västtrafik.

2 Executive summary

Digitization and an ever-increasing processing power have in the 2000s made it possible to introduce autonomous driving in the passenger car segment. The electrification of vehicles is not an absolute prerequisite but has also made it easier to introduce these autonomous functions. In the logistic sector, tests have been made with so-called platooning in order to increase road usage and reduce fuel consumption with heavy vehicles on highways. In the public transport sector experiments and demonstrations with small, slow-moving autonomous shuttles for short journeys have been carried out in different parts of the world. However, very few attempts have been made with fully or partially automated full-size buses.

The overall goal of the project has been to develop autonomous driving of electrified 12-meter buses with high traffic safety and capacity and at a low total cost to society. The project has explored how autonomous driving or autonomous driving assistance benefit different use cases in real traffic in the long run.

The project has focused on the development of automated functions for three different applications or use cases - bus train operation, autonomous bus stop docking, and autonomous depot processes.

- *Bus train operation* can increase the capacity of the existing public transport system in a resource-efficient way and contribute to increased attractiveness for public transport, which also reduces the environmental impact of road transport. The great benefit of bus trains arises from the possibility of temporarily creating "trains" of two or several buses during peak traffic and/or on part of the route, usually in the central parts where the public transport need is larger. Initially, the bus train has drivers in each bus. In the long run, when technology, traffic safety and acceptance allow, the accompanying buses can be driven without a driver.
- *Autonomous bus stop docking* with autonomous buses that detect vulnerable road users can potentially reduce the number of injured and killed in traffic, reduce bus wear and increase passenger comfort. The aim is to fully or partially automate the bus stop docking in order to primarily increase safety, make it easier for the driver and position the vehicle correctly. Shorter stopping times can be made possible by an automated precise docking both longitudinally and laterally and can reduce wear and tear on tires and on bus stop infrastructure as well as provide increased safety for unprotected road users in the local environment. With controlled and repeated driving to the stop, passengers build confidence in travel comfort and can then prepare for their disembarkation while the bus enters the stop without the risk of falling due to sudden acceleration or retardation.
- *Bus depots* are confined areas in which the technology can be used to move the buses autonomously between different depot services such as washing, cleaning and

charging or when parking or leaving the depot. Autonomous driving in the depot can reduce the risk of accidents or damage to the buses while at the same time reducing the need for depot staff, especially at night. The technology used for autonomous driving in confined areas is more or less the same as the one used for autonomous bus stop docking.

The project has focused on developing solutions for the three scenarios - bus trains, bus stop docking and depot processes. From this, three problem areas were formulated with respective research questions:

- Necessary information to achieve the desired system performance
- Control and decision algorithms which together with the information system determine the system performance
- System analysis - effects of the new technology in different areas, interaction with other road users, system effects

The project has worked in an iterative development process between system development, integration in bus and test/verification for each application/use case. The functional requirements in each application drove the further development, which in turn was simulated / verified before the chosen solution was implemented in the vehicles and evaluated, leading to the next iteration. In parallel with technical development work, applications of the technology were studied theoretically in workshop format with representatives from different stakeholders, such as municipal traffic administration and city planning, public transport authorities, public transport operators and others. The system analysis has focused on studying and analyzing results from tests with bus train driving, autonomous stop running and autonomous depot processes and discussing possible effects on public transport design in a potential realization of technology. As part of the work package, the project partners have also worked together to ensure a relevant design and set up of the test environments, including the design of a correct and realistic stop for testing automatic bus stop docking.

Much work remains before full-size buses will run autonomously on public roads. The technology developed in this project and demonstrated in the parallel project KRABAT (Drive Sweden), has shown that autonomous driving is technically mature and possible to introduce in defined environments, such as depots as long the safety case has been proved on a high integrity safety system. On public roads, the technology can be introduced step by step in the form of advanced driver assistance, for use cases such as bus stop docking or narrow navigation, but still with a driver at the wheel, ready to take control of the vehicle. Bus train driving has been identified as an interesting concept. Bus trains are judged to be able to be introduced initially with purely manual technology, after which the degree of autonomous driving can be increased, much depending on whether the bus train is operated on dedicated bus lanes or shares a traffic environment with other vehicles and road users.

The project has investigated the potential economic benefit that advanced driver support or purely autonomous driving in depots could provide for the operator but also for drivers, passengers and fellow road users as well as the public, such as the city's traffic management or healthcare system. Many of the costs that an introduction of the technology could eliminate or greatly reduce are, for various reasons, difficult to estimate. However, the overall study that was done was able to establish that there appears to be a significant savings potential not only in purely economic terms, but indications that the technology can also potentially lead to less stress and increased quality of life.

The project group has specifically identified a need for further research within the bus train domain, including tests and demos of bus train driving in order to be able to accelerate the implementation of the technology in real traffic. Bus train driving can be technically realized

in different levels or degrees of automation. Even if the bus train is operated manually with a driver in each bus, there are potential gains to be made in the public transport system in terms of increased capacity utilization of stops and an opportunity to transport more passengers during rush hour. With a gradually increasing degree of automation, costs can be reduced through reduced staffing options or the driver in bus 2 can perform other tasks of value to the passenger.

The development, test and demonstration activities in the project have been facilitated by the temporary test area that the City of Gothenburg made available to the project. A stop for testing and demonstration of autonomous bus stop docking was established in the test area with the help of the Urban Transport Administration. The City Planning Authority contributed to the work with relevant geodata for the area. To ensure electric operation during the tests, a temporary power station was established with the possibility to charge electric vehicles. In addition to the test, verification and demonstration arena, the test area also served as the main arena for demonstration of autonomous driving at a European ministerial meeting in June 2018 organized by the Swedish Transport Administration / Ministry of Trade and Industry.

The following parties have been involved in the project: Chalmers through Mechanics and Maritime Sciences and Electrical Engineering; the City of Gothenburg through the Urban Transport Administration, the City Planning Authority and Älvstranden Utveckling AB; Lindholmen Science Park AB; Volvo Buses AB; and Västtrafik AB.

3 Bakgrund

Samhällets krav på förbättrad energi-, transport- & infrastruktureffektivitet, låga emissioner av ljud, partiklar, HC, CO, NO_x & CO₂, ökad användning av förnybara energikällor, samt personanpassad och säker systemutformning kräver en omfattande omställning av transportsystemet där elektrifiering och automatisering utnyttjas i större omfattning i olika urbana och regionala tillämpningar. En viktig del av transportsystemet är kollektivtrafiken som har ambitiösa mål att fördubbla resandet till 2030 som en del i denna omställning (se vidare www.svenskkollektivtrafik.se).

Digitaliseringen och en ständigt ökande processorkraft har på 2000-talet gjort det möjligt att framföra fordon automatiskt i större utsträckning än tidigare. Elektrifieringen av fordon har också bidragit till att göra det enklare att införa autonoma funktioner men är inte en absolut förutsättning. Under mitten av 2010-talet växte en hype inom fordonsindustrin kring autonom körning och många ansåg det snart skulle bli verklighet med självkörande bilar, bussar och lastbilar överallt och vid alla tider på dygnet. Flera företag startades med fokus på att ta fram olika autonoma fordon och system. Dock har det visats sig mer komplext än vad flera företag förutsåg och flera aktörer har reviderat sina planer och implementationer för att fokusera på att uppfylla ett specifikt uppdrag inom ett specifikt område t.ex. förflytta gods inom en godsterminal eller erbjuda taxitjänster inom ett begränsat geografiskt område.

Samtidigt utvecklas autonoma funktioner i fordon som antingen bidrar till ökad säkerhet på vägarna eller till ökad bekvämlighet, exempelvis adaptiv hastighetskontroll, köassistans, nödbromsning, eller funktioner för att hålla fordon i rätt fil, sk lane keeping. Assisterad parkering är ytterligare ett exempel på hur autonoma funktioner kan tillämpas i avgränsad utsträckning.

På den tunga sidan har försök gjorts med automatiserad kolonnkörning, s.k. platooning, i syfte att effektivisera och minska bränsleförbrukningen med tunga fordon på motorväg.

Inom kollektivtrafiken har det under de gångna åren har det gjorts en mängd försök och demonstrationer på olika håll i världen med små, långsamgående autonoma skyttlar för korta resor. Dessa demonstrationer har i princip alltid gjorts med säkerhetsförare i fordonet men för att tekniken ska kunna bli konkurrenskraftig krävs att fordonet framförs obemannat.

Det finns få exempel på realiserade autonoma funktioner med fullstora bussar (12 m och längre) men inför föreliggande projekt identifierades tre huvudsakliga tillämpningsområden med stor potential att tillföra värde till kollektivtrafiken på olika sätt:

- Busstågskörning
- Automatiserad hållplatsinkörning eller hållplatsdockning
- Autonom körning i depå eller automatiserade depåprocesser

Busstågskörning syftar till att kunna öka kapaciteten i kollektivtrafiken genom att framföra två eller flera fordon i en tät formation. Principiellt finns två sätt att öka kapaciteten på en linje: att öka fordonstorleken och att öka turtätheten. En ökning av fordonstorleken prioriteras ofta före en ökning av turtätheten då detta kan genomföras utan ökad förarkostnad. Den snabba utvecklingen inom automatisering och digitalisering öppnar nu för möjligheten att anpassa kapaciteten till resandebehovet på ett kostnadseffektivt sätt genom att digitalt koppla ihop två eller flera bussar till busståg. Med hjälp av automation kan temporära busståg skapas med fördelar såsom hög kapacitet, flexibilitet och punktlighet utan samma krav på infrastruktur, gaturum och resandeunderlag som normalt krävs för stora Bus Rapid Transit-lösningar (BRT), vilket hittills begränsat införandet av BRT i Europa och Nordamerika. Den stora nyttan med busståg uppstår genom möjligheten att temporärt skapa ”tåg” av flera bussar under högtrafik och/eller på en del av linjesträckningen, oftast i de centrala delarna där resandeunderlaget är större. Inledningsvis har busståget förare i varje buss men betar sig i övrigt som en mycket stor buss med hög kapacitet. På sikt, när teknik, trafiksäkerhet och acceptans tillåter, kan eventuellt följbussarna framföras förarlöst. Vid lågtrafik och/eller i de delarna av linjesträckningen med lägre resandebehov upplöses busståget och linjen trafikeras med reguljära singelbussar.



Figur 1 Illustration av busståg på högbana i Koll2035 – Kollektivtrafikprogram för stornätet i Göteborg, Mölndal och Partille

Automatiserad hållplatsinkörning syftar till att helt eller delvis automatisera inkörningen på hållplats för att främst öka säkerheten, underlätta för föraren och positionera fordonet rätt. Kortare stopptider kan möjliggöras av en automatiserad precis inkörning både longitudinellt och lateralt och kan minska slitage på däck och hållplatsinfrastruktur samt ge ökad säkerhet för oskyddade trafikanter i närmiljön. Vid kontrollerad och upprepningsbar inkörning till hållplats bygger passagerarna upp förtroendet för resekomforten och kan då förbereda sin avstigning samtidigt som bussen kör in till hållplats utan att riskera att falla p.g.a. ryckig framdrift. Detta skulle kunna leda till att mindre tid behövs vid hållplatsstopp.

Mycket tid går åt till att förflytta bussar inom en bussdepå. Varje chaufför ska efter instämpling gå ut på fordonsplanen leta upp sin buss för att köra ut från depån och efter varje pass ska bussarna gå igenom serviceflödet för att vara driftklara till nästa pass. Autonoma depåprocesser syftar till att kunna förflytta fordon mellan olika platser i depå, såsom framkörning till förare och avlämning till depån vid tillbakakomst, städning, inspektion, tvätt, laddning, underhåll i verkstad och parkering. Tekniken är i stora delar densamma som erfordras för en automatiserad, precis hållplatsinkörning. Med tekniken kan man i depån uppnå kortare ledtid för upphämtning- och avlämning av buss, ökad säkerhet då färre personer behöver vistas inne på depåområdet, minskade skador på fordon och minskat personalbehov vilket potentiellt kan minska kostnaderna för kollektivtrafiken och därmed indirekt också bidra till att öka attraktiviteten och till att nå fördubblingsmålet som kollektivtrafiken har.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Föreliggande utvecklingsprojekt initierades i syfte att utforska hur man stegvis och i olika tillämpningsfall kan använda sig av autonom körning eller autonomt förarstöd för att på sikt kunna dra nytta av tekniken i verklig trafik för en 12 m buss.

Utveckling och realisering av busstågkörning och autonom hållplatsinkörning kan öka kapaciteten i befintligt kollektivtrafiksystem på ett samhällsekonomiskt resurseffektivt sätt och därigenom minska vägtransporternas miljöpåverkan och bidra till ökad attraktivitet för kollektivtrafik.

Autonom hållplatsinkörning med bussar utrustade med system som kan köra självt och upptäcka oskyddade trafikanter kan potentiellt minska antalet skadade och dödade i trafiken, minska busslitage och öka passagerarkomfort.

Projektet har syftat till att stärka svensk fordonsindustris internationella konkurrenskraft genom att projektet genomförts i samverkan med lokala och regionala aktörer och tagit sig an för samhället gemensamma och angelägna problemställningar avseende uppbyggnad av kapacitetsstarka, säkra och miljövänliga kollektivtrafiksystem. Den kunskap som byggts upp och den teknik som tagits fram är inte minst applicerbar i ett internationellt sammanhang i städer med ett alltmer begränsat gatuutrymme och en ökande mängd oskyddade trafikanter.

4.1 Forskningsfrågor

Projektet har handlat om att ta fram lösningar för de tre nämnda scenarierna - busståg, hållplatsdockning och depåprocesser. Från detta formulerades tre problemområden med respektive forskningsfrågor:

Nödvändig information för att uppnå önskad systemprestanda:

- Realtidspositioneringssystem
- Realtidsfriktionsmätningssystem för aktuella väglag
- V2V (fordon-till-fordon) och V2I (fordon-till-infrastruktur) för koordinering av fordonsrörelser och lokalisering av omgivande bussar lämpliga för tågbildning och tågkörning
- Hur påverkar fordonsaspekter som drivlina, broms, styrning och axellyft prestanda på möjliga lösningar.
- Utformning av sensorsystem, geofencing och signaler

Styr- och beslutsalgoritmer, som tillsammans med informationssystemet, bestämmer systemprestandan:

- Automatiserad och synkroniserad styrning av bussavstånd $\sim 0,1$ m vid stopp och ~ 1 m (beroende på säkerhetskrav, hastighet, bussvikt, väder och väglag) upp till 50 km/tim
- Automatiserad lateral styravvikelse $< \pm 0,025$ m vid hållplatser
- Förarlös förflyttning av bussar inom ett depåområde från avlämningsplats till upphämtningsplats via ett antal realtidsplanerade depååtgärder (tvätt, städ, laddning, etc.)

Det tredje området har handlat om effekterna av den nya tekniken:

- Allmänna aspekter som signalprioritetseffektivitet, fördröjning för övrig trafik, förarbeteende, resenärsbeteende, trafikantinformation?
- Hur interagerar fordon, infrastruktur och geodata vid formering av busståg, i korsningar, vid automatisk hållplatsdockning?
- Hur påverkas ansvar och säkerhet?

4.2 Metod

Projektet har genomförts via en iterativ utvecklingsprocess mellan systemutveckling, integration i buss och test/verifiering för respektive tillämpning. De funktionella kraven i varje tillämpning driver vidareutvecklingen som i sin tur simuleras/verifieras innan vald lösning implementeras i fordonen och utvärderas vilket leder till nästa iteration. Parallellt med tekniskt utvecklingsarbete har tillämpningar av tekniken studerats teoretiskt i workshopformat med representanter från intressenter och behovsägare, såsom trafikkontor, kollektivtrafikhuvudmän, kollektivtrafikoperatörer med flera. Syftet med dessa workshopar har varit att uttrycka teknikkraav kvalitativt och att bekräfta behovsbilder.

5 Mål

Det övergripande målet med projektet har varit att utveckla automatiserad körning av elektrifierade bussar med hög trafiksäkerhet och kapacitet samt med en låg total samhällskostnad och energiförbrukning.

Specifika mål i projektet var att generera, utforska, utveckla och validera tekniklösningar som möjliggör automatiserad körning av elektrifierade bussar för säker och miljövänlig:

- Busstågkörning med kort avstånd mellan ledarbussen och de följande bussarna för att möjliggöra ökad flexibilitet och samtidigt mindre ryckig, säkrare och mer energisnål körning. Målet var i projektet att trafiksäkert kunna framföra busståget på 1 m avstånd

vid 50 km/h och på 0,1 m avstånd vid stopp på hållplats.

- Hållplatsdockning av enskilda bussar eller hela busståg till förutbestämt stoppläge och rätt i sidled, vilket medger effektiv inkörning, ger tidsbesparingar vid in-/utkörning och passagerartransferering samt minimalt däckslitage mot kantsten. Målet har varit att med en kontrollerad, bekväm och repetitiv hållplatsinkörning reducera totaltiden vid hållplats med 10% och helt undvika påkörning på kantsten genom att uppnå lateral noggrannhet på +/- 2,5 cm.
- Helt eller delvis förarlös förflyttning av bussar mellan olika åtgärder inom ett depåområde för t.ex. tvätt, städning, laddning och eventuellt underhåll i förhållande till bussens status och kommande trafikuppdrag. Målet har varit att öka effektiviteten med 20% per buss mätt i minskad arbetstid för depåkörning.

Målen innefattade även utveckling av modeller och algoritmer för komplexa och dynamiska beslutsproblem samt fordonsdynamiska simuleringsmodeller för att underlätta konceptval och virtuell testning innan kostnadskrävande implementering sker i fordonen. Ett indirekt mål var att bättre förstå förarnas upplevelser, krav och synpunkter på förargränssnitt och interaktionslogik så att tänkbara missförstånd mellan fordon och förare elimineras.

6 Resultat och måluppfyllelse

I kommande kapitel redovisas resultat och måluppfyllelse per arbetspaket (AP), AP1 Koordinering undantaget.

Projektet har varit relevant för FFI på övergripande programnivå på följande sätt:

- Busstågskörning och autonom hållplatsinkörning kan öka kapaciteten i befintligt kollektivtrafiksystem på ett samhällsekonomiskt resurseffektivt sätt och därigenom minska vägtransporternas miljöpåverkan och bidra till ökad attraktivitet för kollektivtrafik.
 - Resultat: Projektet har utvecklat teknik för busstågskörning och autonom hållplatsinkörning och undersökt potentiella nyttor med tekniken, se kapitel 6.7 ”AP8 Systemanalys”.
- Autonom hållplatsinkörning med bussar utrustade med system som upptäcker oskyddade trafikanter kan potentiellt minska antalet skadade och dödade i trafiken.
 - Resultat:
 - Teknik har utvecklats i projektet för automatisk in- och utkörning av hållplats, se kapitel 6.5 - “AP6 Bus stop docking - Automatisk in- och utkörning hållplats” för ytterligare information.
 - Inom det strategiska innovationsprogrammet Drive Sweden, har den autonoma bussen använts för studier inom KRABAT-projektet och dess arbetspaket - *Automatisering av stadsbussar*”. I studien har yrkesverksamma busschaufförer utvärderat systemet genom praktisk användning och sedan intervjuats. Chaufförerna var mycket positiva och ansåg att systemet skulle kunna förbättra deras förarmiljö. Fortsatt forskning krävs för att bedöma teknikens potential att minska skadade och döda i trafiken.
- Projektet har, i samverkan med lokala och regionala aktörer, tagit sig an för samhället gemensamma och angelägna problemställningar avseende uppbyggnad av

kapacitetsstarka, säkra och miljövänliga kollektivtrafiksystem. Den kunskap som har byggts upp och den teknik som tagits fram är applicerbar i ett internationellt sammanhang i städer med ett alltmer begränsat gatuutrymme och ökande mängd oskyddade trafikanter. Genom projektet har svensk fordonsindustris internationella konkurrenskraft stärkts.

- Volvo Bussar har använt teknik och erfarenhet från projektet och levererat två forskningsbussar med självkörandeteknik till Nanyang Technological University i Singapore. Syftet med projektet var att Singapore skulle bygga upp praktisk kunskap och utvärdera teknikens potential genom att utföra forskning på fullstor buss (12 meter). Projektet i Singapore har finansierats av Land Transport Authority i Singapore.

På delprogramsnivå (FFI) syftade projektet till att bidra till färdplanen och säkerhetskoncept 2 och 3 och till att uppfylla delar av ”det möjliggörande transportsystemet” i god tid innan 2035 för tillämpningar med bussar på följande sätt (från ansökan):

- Högradig automatisering: Projektet avser att utveckla och testa fordonskolonnkörning i utvald trafikmiljö med föraren i buss 2 beredd att ta över när randvillkoren för trafiksäkerhet ej kan uppfyllas.
 - Resultat: Detta har gjorts inom projektet, se kapitel 6.4 - “AP5 Digitalt kopplade busståg” för ytterligare information.
- Partiell automatisering: Projektet avser att testa autonom hållplatsinkörning med föraren beredd att ta över.
 - Resultat: Detta har gjorts inom projektet, se kapitel 6.5 - “AP6 Bus stop docking - Automatisk in- och utkörning hållplats” för ytterligare information.
- Högradig automatisering: Projektet avser att utveckla och testa autonom körning i avgränsad depåmiljö.
 - Resultat: Detta har gjorts inom projektet, se kapitel 6.6 - “AP7 – Autonoma depåprocesser” för ytterligare information.
- Identifiering av möjlig affärsmodell som ”uppmuntrar och stödjer ett brett införande”. Dagens kollektivtrafik är personalintensiv och förarkostnaden står för ca 50-60% av de totala kostnaderna. I arbetspaket 8 görs en översiktlig skattning av hur kapaciteten på en specifik linje kan ökas till begränsad kostnad genom införande av busståg.
 - Resultat: Detta har till viss del gjorts inom projektet. Busstågkörning kan införas stegvis från rent manuellt genomförande utan teknikstöd till helt automatiserad körning med mycket begränsad eller ingen bemanning och därtill kopplade kostnadsbesparing, se kapitel 6.7 ”AP8 Systemanalys”.

6.1 AP2 - Utveckling av algoritmer och fordonskontroll för säker autonom körning av stadsbussar

Chalmers har ansvarat för arbetspaketet som utvecklade styr- och optimeringsmetoder för att hantera flera utmaningar inom autonom körning. Undersökning har gjorts på att köra in till en busshållplats samt parkeringsplats i bussdepå, där en utmaning är att utformningarna ej är konvexa. Forskarna rekommenderar en ny metod för att beskriva och modellera geometrin som gör att modelleringsnoggrannheten förbättras, vilket ger en säker och noggrann parkering. Detta tillsammans med ett bra positioneringssystem gör det möjligt att parkera inom 5 cm från hållplatsens kantsten. Positioneringen leder till ökad passagerarkomfort då däckan ej går emot kantstenen vid inkörning, något som annars gör att bussen rycker till i sidled. En annan fördel är minskad beräkningskomplexitet i styralgoritmerna jämfört med den

i litteraturen normalt använda geometribeskrivningen. Det är viktigt att uppnå bra beräkningseffektivitet i styralgoritmerna för vägplaneringen som ska följa bangeometrin. Forskarna har tagit fram en vägplanerare som kan hantera oregelbunden parkeringsplatsgeometri t ex i form av oregelbundna polygoner uttryckt som ett olinjärt program med beräkningsprestanda som kan implementeras i realtid på en självkörande buss. Vägplaneraren tar in geometribegränsningarna och använder optimal styrning för att generera en optimal bana med en horisont på ca 100 meter. För att säkerställa att banan verkligen är möjlig att köra så använder vägplaneraren en verklighetstrogen modell av fordonet och genererar optimala längsgående och laterala hastighets- och accelerationsbanor som är baserade på det fysiska fordonet. Vägplaneraren och begränsningsmodelleringen har publicerats under European Control Conference, Delft, The Netherlands, 2021 [1].

Slutligen utvecklades en komfortmodell för stående passagerare som integrerades i vägplaneraren. Syftet är att minimera obehag vid autonom körning samtidigt som man optimerar styrningen så att den ej ska ta mer tid än en vanlig manuell körning. Utvärderingen visar att den nya vägplaneraren genererade en något annorlunda profil jämfört med en erfaren mänsklig förare. Medan en mänsklig förare vanligtvis först accelererar och sedan håller en konstant hastighet innan den saktar ner till ett absolutstopp utför den autonoma profilen två sammankopplade klockformade kurvor, där bussen först accelererar och sedan saktar ner samtidigt som den svänger in mot busshållplatsen för att sedan accelerera igen innan den slutligen saktar ner och stannar. Algoritmen testades i den riktiga autonoma bussen, där det bekräftades att en stående passagerare kunde balansera på ett ben utan att hålla i sig när bussen stannade vid hållplatsen. Resultatet är sammanställt i en artikel för kommande publicering i teknisk tidskrift.

[1] A. Elawad, N. Murgovski, M. Jonasson, J. E. Sjöberg. *Road Boundary Modelling for Autonomous Bus Docking Subject to Rectangular Geometry Constraints*, European Control Conference, Delft, The Netherlands, 2021.

6.2 AP3 - Utveckling och tillhandahållande av fordon

Volvo Bussar har tillsammans med Volvo GTT utvecklat två bussar som kan framföras autonomt. Buss nr 1 har kontinuerligt utvecklats under projektperioden (2017-2021) och använts under samtliga tester, konceptpresentationer och studier medan buss nr 2 använts under 2021 som fölgebuss vid utvärdering av tekniskt koncept för busståg.

Bussarna består av både hård- och mjukvara och innehåller följande huvudkomponenter:

Komponent	Typ	Beskrivning
Basfordon	Buss 1 - Volvo 7900 Electric Hybrid Buss 2 - Volvo 7900 Electric	Elektrisk stadsbuss med två axlar och en längd av 12 m och 19 tons totalvikt vid full lastning. Basfordonet är bärare av hård- och mjukvara för det autonoma systemet.
Drivlina basfordon	Anpassning av basfordonets befintliga kontrollmjukvara för elmotor och växellåda.	Möjliggör att fordonet kan lägga i driftläge D, N, R (Drive, Neutral, Reverse) och accelerera och deaccelerera (bromsa) via det autonoma systemet.

Styrning basfordon (lateralkontroll)	Elektriskt styrservo Volvo Dynamic Steering (VDS) samt anpassning av mjukvara för att utföra styrvinkelbegäran.	Möjliggör att fordonet kan styra lateralt via kommandon från autonoma systemet.
Sensorer	Global Positioning System (GPS), Light Detection and Ranging (LIDAR), Radio Detection and Ranging (RADAR), Inertial Measurement Unit (IMU)	Möjliggör att autonoma systemet kan uppfatta omgivningen och fastställa position.
Kommunikation	Kommunikation Fordon till fordon (V2V) Fordon till infrastruktur (V2I)	V2V - för att köra i busstågsformation V2I - för operation i depå, kommunikation mellan fordon och kontrolltorn.
Systemdator	Centralprocessor - monterad i basfordonet med gränssnitt mot drivlina- och lateralkontroll samt sensorerna. Installerad med applikationsmjukvaran som sköter autonom körning.	Hjärtat i det autonoma systemet, agerar utifrån data som kommer in från sensorerna och kommunicerar med bussens aktuatorer för styrkommandon.
Applikationsmjukvara	Mjukvara installerad på systemdatorn i bussen	Hjärnan i fordonet som kommunicerar och styr basfordonet baserat på data från sensorerna.
Kontrolltorn	Kontrollrum som via digital länk är sammankopplat med fordonen.	Möjliggör att fordon kan kontrolleras/styras och monitoreras på distans.

6.3 AP4 Utveckling och tillhandahållande av test- och demonstrationsyta

Under 2018 ställde Älvstranden Utveckling AB i Göteborg ett temporärt testområde i Frihamnen centralt i Göteborg till projektets förfogande. En hållplats för test- och demonstration av autonom hållplatsinkörning iordningsställdes på ytan i testområdet med hjälp av Trafikkontoret, Atkins och NCC, se bild nedan. Stadsbyggnadskontoret, bidrog till arbetet med relevant kartdata för ytan. För att säkerställa eldrift under testerna etablerades en temporär elcentral med möjlighet att ladda elfordon. Testytan tjänade, förutom som test-, verifierings- och demonstrationsarena också som huvudarena för demonstration av autonom körning vid ett europeiskt ministermöte i juni 2018 anordnat av Trafikverket/Näringsdepartementet.



Figur 2 Testytan med utformad hållplats för test- och demonstration av autonom hållplatsinkörning.

6.4 AP5 Digitalt kopplade busståg

Busståget bestod av två specialutrustade bussar. Buss 1 framfördes manuellt och delade sin position till bakomvarande buss som reglerade position och hastighet i förhållande till första bussens angivelser och reella position. Teknisklösningen byggde på GPS och radar, GPS för att få bussarnas position och radar för att fastställa avståndet mellan bussar. För att få bra GPS-positionering i realtid användes Lantmäteriets tjänst Swepos Nätverks-RTK, som ger mätosäkerhet på centimeternivå. Radarenheten var en vanlig fordonsradar som används till förarstödtjänster som exempel adaptivfarthållning. För fordonskommunikationen (V2V) användes Volvo GTTs egenutvecklade lösning för digital länk mellan fordon.

Måluppfyllelse - digitalt kopplade busståg

Projektet har provat grundläggande funktioner som:

- Upprätta kommunikation mellan två bussar och transferera data som position och hastighet från buss 1 till buss 2.
- Busståg – bakre bussen följer den framförvarande
 - Start stop - Starta från stillastående, köra framåt och sedan gå till stillastående igen.
 - Lateral förflyttning - kört i en åtta på en öppen testyta, även på väg med kurvatur.
 - Kört i 25-30 km/h och en tidsdifferens mellan fordonen satt till 0,5 sekunder vilket ger ett avstånd på ca 4 meter.

Projektet har ej utfört något prov med att köra i 50 km/h med 1 meters mellanrum dvs tidsdifferens på mindre än 0,1 sekund på grund av att säkerheten ej kan garanteras vid en eventuell nödsituation där den främre bussen är tvingad att utföra kraftig inbromsning, så kallad panikinbromsning.

Lösningen är ej robust. Följning förloras vid lite tuffare körscenarion där första bussen ej ligger helt framför den bakomvarande bussen t.ex. vid en 90-graders sväng i korsningar eller rondeller. GPS-signal förloras också i vissa omgivningar exempelvis när busståget passerar under en bro och då förloras följning. Mer analys och utveckling behövs för att få upp kvalitén och robustheten i systemet.

6.5 AP6 Bus stop docking - Automatisk in- och utkörning hållplats

Projektet har tagit fram en konceptfunktion där bussen först framförs manuellt av en förare. Under färden, ca 100 meter innan hållplats eller liknande, kan föraren aktivera en förarstödsfunktion där bussen tar över kontrollen och utför ett fördefinierat köruppdrag, t.ex. att köra autonomt in till en busshållplats, laddstation, mm. Föraren sitter kvar bakom ratten och övervakar operationen och ansvarar för säkerheten i och utanför bussen. Föraren kan när som helst gå in och avbryta den autonoma körningen och återgå till manuell körning. Funktionen kan endast aktiveras när bussen befinner sig vid/på ett fördefinierat köruppdrag, varken innan eller efter.

Måluppfyllelse - automatiserad körning till och från hållplats visar:

- Ökad säkerhet - föraren överlåter körningen till fordonet och fokuserar på att övervaka trafiksituationen och bussen.
- Hög precision - autonom körning visar att bussen placerar sig med centimeternoggrannhet i förhållande till hållplats. Minskat slitage på bussen då den ej kör på fast hållplatsinfrastruktur som exempelvis kantsten och staket.
- Hållplatsstopp med hög komfort - autonom körning ger god kördynamik med bekväm lateral förflyttning, acceleration och deacceleration, reducerar sannolikheten att passagerare ramlar. Passagerare ombord kan förbereda avstigning medan bussen förflyttar sig även vid körning ifrån hållplatsen vilket reducerar fallskador då accelerationen sker kontrollerat och mjukt. Är hållplatsen utrustad med lösning som visar var bussdörrarna kommer att hamna kan påstigande passagerare förbereda sig genom att placera sig på rätt plats innan bussen anlänt. Avståndet mellan buss och plattform kommer vara minimalt vilket underlättar påstigning. Allt detta kan leda till en effektivare på- och avstigning och kortare hållplatsstopp.

För att få fram värde på eventuell effektivitetsförbättring behöver en större studie genomföras där analys av helt manuellt utförda busstopp jämförs med stopp med tjänsten aktiverad. En sådan studie har ej rymts inom projektet.

Funktionen har använts av Drive Sweden KRABAT-projektet i en vetenskaplig studie där busschaufförer utvärderar funktionen.

6.6 AP7 - Autonoma depåprocesser

Projektet har utfört autonom depåkörning i två olika bussdepåer i Göteborg där all fordonsförflyttning i underhållsflödet gjordes autonomt. Innanför depågrundarna lämnades bussen över till kontrollrummet som i sin tur hanterade underhållsflödet och den autonoma driften samt övervakade körningen. Kontrollrummet är bemannat med en underhållsplanerare vars uppgift är att planera, aktivera och övervaka alla fordon inom depån. Planeraren bestämmer flödet för respektive buss exempelvis när bussen kommer tillbaka från trafikuppdrag genom att ange vilken parkering den ska till samt lägger in den i

underhållsplanering för städning, tvättning, fordonskontroll, laddning, service, verkstad osv. Planeraren har alltid information var bussarna befinner sig inom depån samt var den är i underhållsflödet och när den ska vara redo för nytt trafikuppdrag. Fordonsförflyttningar kan antingen initieras via kontrollrummet alternativt av personalen ute på varje serviceenhet via en tablet (handhållen enkel dator).

Projektet har uppfyllt följande delar i depåprocessen som ingick i projektbeskrivningen:

	Aktivitet och beskrivning
	<p>Kontrollrum - Avlämning av buss – överlämning till systemet för planering och optimering av åtgärder i tid och rum baserat på bussens nuvarande status, tillgängliga resurser i depå samt bussens kommande trafikuppdrag.</p>
	<p>Fysisk autonom förflyttning - av buss inom depåområde till ett antal givna positioner som överlämning, upphämtning, parkering, laddning, städning, inspektion, tvätt.</p>
	<p>Växla mellan utomhus- och inomhuskörning, exempelvis köra in och ut ur servicehall för fordonsinspektion och städning.</p>
	<p>Autonom körning genom tvätthall.</p>
	<p>Parkering och laddning i OppCharge laddstation.</p>
	<p>Parkering – dag- och nattparkering, hämtning och framkörning för överlämning till förare i kommande trafikuppdrag.</p>

Målet att kunna öka effektiviteten inom depån med 20% per buss, mätt i minskad förartid, är uppfyllt med god marginal. I en bussdepå med 100 bussar sker över 100 000 unika fordonsförflyttningar under ett år till ett motsvarande värde av ca 9 000 timmar. Projektet har visat att mer eller mindre alla fordonsförflyttningar inom depån skulle kunna utföras autonomt. Dock kan vissa förflyttningar var mindre lämpade beroende på hur depån är utformad, till exempel om depåområdet är uppdelat mellan olika byggnader med allmän väg mellan mm. En generell bedömning är att minst 20 % av förartiden skall kunna sparas ifall depån har en bra avgränsning med stängsel och grindar så att bussarna kan förflytta sig inne på vagnsgården utan att behöva ta hänsyn till annan trafik.

6.7 AP8 Systemanalys

Systemanalysen har fokuserat på att, i samverkan med ett flertal parter i projektet, samt i förekommande fall även med externa parter, studera och analysera resultat från tester med busstågkörning, autonom hållplatsinkörning och autonoma depåprocesser samt diskutera möjliga effekter på kollektivtrafikutformningen vid en potentiell realisering av tekniken. I arbetspaketet har projektparterna också arbetat med att säkerställa en relevant utformning av testmiljöerna inklusive utformningen av en korrekt och realistisk hållplats för test av automatisk hållplatsinkörning.

I arbetspaketet har följande organisationer deltagit: Västra Götalandsregionen, Västtrafik, Göteborgs Stads Trafikkontor, Göteborgs Stads Stadsbyggnadskontor, Chalmers, Volvo Bussar. Utöver ordinarie projektparter har framför allt Keolis deltagit i olika tester och workshops kopplat till autonoma depåprocesser och busstågkörning men också i arbete med avancerat förarstöd vid autonom hållplatsinkörning.

6.7.1 Hållplatsinkörning och depåprocesser

Tekniken för autonom hållplatsinkörning eller avancerat förarstöd vid inkörning på hållplats är applicerbar även under andra delar av körningen, t.ex. vid navigering genom trånga passager där föraren ställs på prov för att undvika att köra emot andra fordon eller omgivande infrastruktur. I princip är det samma teknik som också används för autonoma depåprocesser.

Projektet har undersökt den potentiella ekonomiska nytta som avancerat förarstöd eller rent autonom körning i depå skulle kunna utgöra för operatören men också för förare, resenärer och medtrafikanter samt det offentliga, t.ex. stadens trafikförvaltning eller sjukvårdssystemet. Många av kostnaderna som ett införande av tekniken skulle kunna eliminera eller kraftigt minska är av olika skäl svåra att uppskatta. Den övergripande studie som gjordes kunde dock konstatera att det ser ut att finnas en betydande besparingspotential i rent ekonomiska termer men också indikationer på att tekniken också potentiellt kan leda till mindre stress och ökad livskvalitet.

Tillsammans med en trafikoperatör har projektgruppen undersökt storleken på olika kostnader som uppstår kopplat till kollisioner t.ex. vid körning genom trånga passager eller i depå, men också kopplat till förslitning av däck eller fast infrastruktur vid inkörning på hållplats. Det handlar dels om olika typer av skador på bussar som uppstår i trafiken exempelvis plåtskador, skador på sidospeglar samt yttre positionsbelysning och lampor. Kostnader har beräknats för ett case motsvarande en stor depå med ca 150 bussar. Exempel på vanliga skador som kan minska i antal eller undvikas helt genom färre kollisioner:

- Färre skador karosseri/blinkers
- Färre skador på rutorna
- Färre skador på backspeglar/sidospeglar

Tekniken kan också bidra till minskade skador på bälg eller led vid körning över farthinder. Indirekta kostnader som undviks är också viten som döms ut i samband med indragen eller försenad tur samt kostnaden för att bussar måste tas ur trafik.

Skador på infrastruktur är enligt Göteborgs Stads Trafikkontor svåra att uppskatta. Minskade skador på kantsten eller skador på staket/avdelare sker ganska sällan men i de fall det sker mer frekvent krävs ombyggnad vilket kan bli kostsamt. I samband med nybyggnation är det relativt vanligt med skador på infrastruktur, särskilt om platsen förändras och förarna behöver förändra sitt sätt att köra från dag till dag. Ett system för navigering som enkelt kan uppdateras i det närmaste på timbasis skulle kunna förhindra skador på ytor som iordningsställts men som t.ex. ännu inte hunnit asfalteras.

En indirekt nytta är att ytbehovet skulle kunna minskas i s.k. trånga snitt. Det finns exempel på platser där ytan är kraftigt begränsad och en ombyggnad inte är möjlig.

Utöver materiella skador har tekniken en potential att minska personskador av olika slag. Den allvarligaste typen av skada är förstås den som sker vid en direkt påkörning på omgivande gående, t.ex. i samband med inkörning på hållplats. Andra exempel är fallolyckor eller liknande ombord på fordonet, t.ex. vid hastig inbromsning eller acceleration. Ett antal olika typfall har identifierats:

- Färre påkörningar buss mot människa utanför buss tack vare att föraren helt och hållet kan fokusera på personsäkerhet och inte behöver positionera bussen
- Färre fallolyckor vid retardation som leder till lättare skada eller allvarligare skada
- Färre fallolyckor vid acceleration som leder till lättare skada eller allvarligare skada
- Färre fallolyckor vid lateral (sidled) acceleration som leder till lättare skada eller allvarligare skada

I samarbete med hälsoekonom på Västra Götalandsregionen, VGR, har kostnad per olycksfallstyp uppskattats. Det första typfallet kan innebära mycket stora samhällsliga kostnader men är dessbättre väldigt ovanligt. Fallskador av allvarligare slag som inträffar ombord på fordonet och som kan kräva slutenvård drar betydligt högre kostnader och har värderats till 100 000 kr per skadetillfälle men inträffar inte särskilt ofta. Fallskador av lättare slag sker däremot relativt ofta men den direkta kostnaden för dessa är relativt låg, kanske i storleksordningen 5 000 kr.

Projektet har tagit del av statistik från VGR över kostnader för inrapporterade olyckor under 2016-2019. Under denna period uppgick kostnaderna till 42 miljoner kr men i statistiken går det inte att utläsa om olyckorna är relaterade till buss eller lastbil. Om hälften av olyckorna är relaterade till bussolyckor så blir detta ca 21 miljoner kr, eller 7 miljoner kr/år. Detta skulle i så fall gälla för hela Västtrafiks flotta på 1 857 bussar. I vårt fall räknar vi med 150 bussar (8% av flottan) vilket skulle motsvara en kostnad på ca 550 000 kr/år.

Risken för fallolyckor påverkar framför allt äldre människors resebeteende och vilja att nyttja kollektivtrafiken (buss/spårvagn). En dynamisk effekt av en minskad risk för fallolyckor ombord skulle kunna vara att fler nyttjar kollektivtrafiken i stället för färdtjänst. För varje färdtjänstresaresa som i stället görs med kollektivtrafik uppskattas Västtrafik spara 287 kr.

Det görs ca 655 000 resor med färdtjänst i Göteborg under ett år. Om 1 % av alla resor i stället görs med kollektivtrafik innebär detta en besparing på knappt 2 miljoner kr/år.

Ytterligare en dynamisk effekt skulle kunna vara att fler väljer kollektivtrafiken tack vare en ökad komfort.

För föraren skulle tekniken kunna innebära en förbättrad arbetsmiljö och potentiellt:

- Färre sjukskrivningsdagar tack vare färre belastningsskador på exempelvis händer, armar, axlar, ben och vader
- Färre sjukskrivningsdagar tack vare mindre stress
- Bättre fokus på trafiken vid autonomt läge
- Ökat engagemang som kan leda till en bättre körning
- Ökad trygghet för föraren då bussen kör på samma sätt varje gång
- Incitament för förare att köra bra - bonus vid nöjd kund etc.

För operatören kan detta potentiellt också minska personalomsättningen tack vare mindre stress och ökad trivsel.

6.7.2 Busståg

Arbetet med konceptet busståg har främst bedrivits i form av möten med arbetspaketets samtliga deltagare samt i workshoppar där även representanter från externa organisationer deltagit. Syftet med workshopparna har framför allt varit att utreda vilka fordon som kan tänkas kopplas samman och under vilka förutsättningar, t.ex. hastighet, samt i vilken kontext. I syfte att underlätta arbetet med många parter har en definition av busståg tagits fram i projektet:

Busståg: Två eller flera bussar framförs på en busslinje, eller delar av en busslinje, som en sammanhållen enhet. Bussarna kommer in till hållplatsen nära varandra och avgår samtidigt.

Idén med busståg är framför allt att öka kapaciteten i kollektivtrafiken genom att framföra två eller flera fordon som ett tåg. Genom att dessa fordon hålls ihop och kommer in på hållplatsen samtidigt kan de dela på den tid, ca 30-45 sekunder, som finns avsatt för stopp vid hållplats. Genom att fler fordon kommer in på hållplatsen samtidigt kan resenärer stiga av och på snabbare, och risken för att ett fordon blir överfullt minskar. Vanligtvis försinkas kollektivtrafiken när fordonen blir fulla i rusningstrafik, hållplatstiderna förlängs och genomloppstiden ökar. Fordonen klumpas ihop sig, s.k. bunchning.

Med busståg kan kapaciteten på sträckan förstärkas utan att öka antalet fordon rörelser. Med begränsad bemanning i fordonståget kan förarkostnadens del av totala kostnader minskas avsevärt, då denna kostnadspost står för ca 50% av kostnaden för att bedriva kollektivtrafik med buss i städer. Men, att överhuvudtaget kunna öka kapaciteten i systemet har också ett ekonomiskt och samhällligt värde, som kan realiseras vid en stegvis implementering med ökande grad av teknikstöd illustrerat i figur 3 nedan.

Automationsnivå	Beskrivning
1	 <ul style="list-style-type: none"> • Busståget framförs helt manuellt med en förare i varsin buss • Bussarna är av ett grundutförande. Det finns inga speciellt framtagna kommunikationsmedel mellan bussarna.
2	 <ul style="list-style-type: none"> • Busståget framförs helt manuellt med en förare i varsin buss • Bussarna som ingår i busståget har fordon till fordon-kommunikation. T.ex. reagerar bägge bussarna på stoppknappen, förarna kan kommunicera sinsemellan att det är dags för avgång
3	 <ul style="list-style-type: none"> • Bussarna framförs av en varsin förare • Det finns fordonskommunikation • Föraren i den bakre bussen i tåget har stödsystem som underlättar att framföra bussen, t.ex. system för att hålla korrekt avstånd mellan bussarna
4	 <ul style="list-style-type: none"> • Buss 1 framförs manuellt av en förare. • Buss 2 framförs autonomt med en säkerhetsförare vid ratten som är redo att ta över vid behov. Säkerhetsföraren kan också köra bussen manuellt när bussen ej ingår i ett busståg.
5	 <ul style="list-style-type: none"> • Buss 1 framförs manuellt av en förare. • Buss 2 följer buss 1 autonomt, utan att en säkerhetsförare behövs. Buss 2 har redundans i form av kritiska säkerhetssystem, t.ex. bromsning, lateral styrning. Buss 2 kan framföras manuellt utanför busståget.
6	 <ul style="list-style-type: none"> • Två autonoma bussar framförs i ett busståg. • Bussarna kan framföras helt autonomt, var och en för sig, även utanför busståget.

Figur 3 Busstågdrift med olika grader av teknikstöd - från helt manuell körning till helt förarlös.

Inom ramen för AP8 har ett manuellt busståg, enligt steg 1 ovan, testats med två förare som opererade var sin buss, under en och samma tur. Bussarna har alltså kört i par och utgjorde det som i projektet har definierats som busståg. Busståget testades till en början utan passagerare och utanför rusningstrafik längs linjesträckningen för en stombusslinje i Göteborg. Syftet var att se hur ett manuellt busståg kan hållas ihop i verklig trafikmiljö längs busskörfält, delade körfält och motortrafikled. Det gjordes för att även kunna utvärdera infrastrukturens anpassning för konceptet, inte minst ifråga om hållplatsutformning. Rondeller, korsningar med trafikljus samt kollektivtrafiksignaler ansågs vara de mest problematiska trafikmiljöerna med störst svårighet att hålla ihop busståget.

I ett nästa steg testades konceptet på en busslinje i Göteborg inom s.k. områdestrafik, där busståget utförde ett antal extrainsatta turer med riktiga passagerare, men fortfarande utanför rusningstid. Vid denna test kunde man studera resenärernas beteenden kopplat till busståg. Testerna tydliggjorde behovet av kommunikation gentemot resenärerna om att bägge bussarna utgör samma tur. Det blev tydligt att även kommunikation mellan förare var önskvärd, exempelvis indikation till bägge förarna om att resenären har tryckt på stopp-knappen i någon av bussarna i tåget. Projektgruppen kunde också observera kopplingen mellan hållplatsens utformning och resenärernas benägenhet att välja en buss 1 eller 2 i busståget. Då dessa effekter endast kunde studeras under ett par extrainsatta turer, vore det önskvärdt att undersöka den här typen av effekter och beteenden under en längre tids busstågdrift. Det vore också

önskvärt att studera hur förarnas upplever busstågkörning under en längre tid och vilka moment som är särskilt intressanta att förenkla eller eliminera med teknikstöd.

Ännu ett test av busståg med passagerare gjordes i samband med en större workshop i oktober 2021 med deltagare från flera trafikhuvudmän, trafikoperatör, regionsorganisationer, Göteborgs Stads trafikkontor, industrin samt akademien. Testet genomfördes på en delsträcka av en busslinje i Göteborg mellan två större hubbar för kollektivtrafik inom stadslinjenätet. Syftet med testet var att visa upp konceptet för relevanta parter inom kollektivtrafikområdet för att stimulera och förankra diskussion i efterföljande workshop i verklig trafikmiljö. Syftet med workshopen var sedan att gemensamt diskutera behov förutsättningar och nödvändiga anpassningar för att kunna implementera konceptet i verklig trafik men också att gemensamt lyfta fram nyttorna med busståg. Under workshopen tydliggjordes att det finns ett stort intresse för fortsatt utveckling av konceptet busståg.

Någon demonstration av autonom busstågkörning har ännu inte gjorts, dels beroende på att tekniken ännu inte är tillräckligt mogen, men också beroende på att körning kräver tillstånd av Transportstyrelsen för att genomföras på allmän väg.

6.7.3 Samverkan med stadens planeringsprocesser, stadsutveckling

I Göteborg har Stadsbyggnadskontoret, SBK, parallellt med projektet arbetat med att utveckla en 3-dimensionell kopia av den visuella verkligheten, en s.k. digital tvilling av staden.

Göteborgs Stad avser att med den digitala tvillingen

((<https://stadsutveckling.goteborg.se/digitaltvilling/>) studera staden utifrån tre perspektiv:

- Hur den befintliga staden ser ut och fungerar idag
- Styra funktioner i staden utifrån det som händer just nu i realtid
- Förutse och planera en simulerad framtida funktion eller händelse i staden.

Ett användningsområde för den digitala tvillingen är att förstå hur självkörande fordon fungerar i staden och hur de upplevs. I föreliggande projekt har SBK tagit fram objekt eller s.k. ”assets” som kan populera modellen och göra det möjligt att simulera, visualisera och analysera t.ex. busstågkörning i kommande samarbeten eller initiativ.



Figur 4 Bilden visar en 3D-modell av en buss avsedd för den digitala tvillingen.



Figur 5. Bilden visar en samling av objekt som kan användas i den digitala tvillingen.



Figur 6 Bilden visar en kollektivtrafiknod i Göteborg, visualiserad i den digitala tvillingen. Till höger skimtar bussarna som lagts in i modellen.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultat spridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
--	---------------	-----------

Öka kunskapen inom området	x	Teknikutveckling i föreliggande projekt har möjliggjort demonstrationer av bus stop docking, depåprocesser mm som utförts inom projektet KRABAT (<i>Drive Sweden</i>)
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	x	Internt Volvo. Doktorand på Chalmers fortsätter studier till PhD.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	Internt Volvo.
Introduceras på marknaden	x	Ansökan om fortsättningsprojekt avseende policy och regelverk mm för att påskynda marknadsintroduktion har lämnats in till Vinnova (Systeminnovation). Ansökan avslogs men fick positivt omdöme.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut	x	Projektledare har deltagit i utredningar eller workshops anordnade av Trafikverket. Eventuellt fortsättningsprojekt kring policy- och regelverk avses kunna användas i syfte att tydliggöra eventuella nödvändiga policy/regelverksförändringar.

Den teknik som utvecklats inom projektet har huvudsakligen demonstrerats, utfört studier och artiklar inom *Drive Sweden* och KRABAT-projektet.



Figur 7 Förare testar och utvärderar bus stop docking.



Figur 8 Bild från demonstration av autonom körning i samband med Volvo Ocean Race 2018.

7.2 Publikationer

Forskningsresultat från projektet har presenterats på en vetenskaplig konferens och en artikel har skickats för vetenskaplig publikation, A. Elawad, N. Murgovski, M. Jonasson, J. E. Sjöberg, *Road Boundary Modelling for Autonomous Bus Docking Subject to Rectangular Geometry Constraints*, European Control Conference, Delft, The Netherlands, 2021.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Även om projektet har presenterat och demonstrerat flera lyckade och intressanta koncept så krävs fortfarande mycket forskning och utveckling för att kunna framföra autonom buss på allmän väg utan säkerhetsförare. Den stora utmaningen är att föra i bevis att systemet är säkert och kan framföras utan risk för incidenter och olyckor. Att praktiskt testa och verifiera alla typer av trafiksituationer är omöjligt då kombinationerna är oändliga. Existerande standarder och ramverk som fordonsindustrin använder för att klassificera säkerhet är ej fullt applicerbara eller anpassade för komplexa autonoma system, vilket gör att varje tillverkare behöver göra sin egen tolkning av vad som krävs för att klassa systemet som säkert, vilket skapar otydlighet. En stegvis utrullning är att föredra och en första fas där säkerhet kan uppfyllas genom att, antingen föraren fortfarande sitter kvar och övervakar den autonoma körningen som exempelvis bussdockningsfunktion, eller genom att området är fysiskt avgränsat så inga trafikanter befinner sig nära fordonen, till exempel inom en bussdepå som har stängsel och grind, eller i busskörfält med fysiska barriärer. Vilken lösning som än realiserats så behöver de autonoma fordonen ha en prioriterad framkomlighet för att kunna köra säkert och effektivt.

Busståg. Projektet har konstaterat att det finns stora vinster med busstågkörning. En stegvis implementering skulle kunna påskynda en eventuell utrullning innan det finns en robust

lösning för hur den bakre bussen autonomt följer den främre. Tre huvuddelar har identifierats för att kunna realisera busståg:

1. *Framkomlighet* - Praktiska tester visar att det är väldigt svårt att hålla ihop busståget och att det är väldigt störningskänsligt, framförallt när det framförs i blandtrafik. Korsningar, rondeller, trafikljus, hållplatser är några exempel där busståget har svårt att hålla ihop på grund av att det behöver ta hänsyn till övrig trafik. Hur en lösning skulle kunna se ut har projektet Ej fördjupat sig i men generellt kan sägas att det är betydligt enklare att hålla ihop busståget på busslinjer med dedikerade körfält jämfört med busståg som körs på allmän väg. Någon typ av dedikerad infrastruktur, t.ex. trafikljus med signalprioritet, hållplatsutformning för enkel in- och utkörning mm. skulle förmodligen också underlätta drift av busståg.
2. *Teknik* - Vidareutveckling av den autonoma tekniken för att uppnå robusthet så att buss 2 autonomt följer buss 1. Kommunikation mellan bussar så passagerarntifiering och utrop sker synkront i bussarna, till exempel vid och inför hållplatsstopp. För helt manuellt framförda busståg behöver busschaufförerna ha någon typ av kommunikation, verbal och digital, sinsemellan för att kunna kommunicera eventuella störningar, hinder eller synka avgångar, mm.
3. *Policy* – Är det tillåtet att köra i busstågsformation och hur går det ihop med nuvarande trafikförordning? Vid manuellt framförda busståg avgörs avståndet mellan fordonen av reaktionstiden. För en människa i trafiken är reaktionstiden ca 0,5–1 sekund, vilket betyder att den bakre bussen, buss 2, vid en hastighet av 50 km/h kommer ha en reaktionssträcka på 7 till 14 meter, dvs den sträcka fordonet förflyttar sig innan föraren reagerar och trycker på exempelvis bromsen. För att kunna hantera situationer där buss 1 gör en panikinbromsning måste buss 2 alltid ha tillräckligt med avstånd fram till buss 1 för att hinna reagera och bromsa. Att ligga för nära innebär att trafikförordningen inte följs. I det fall buss 2 kör autonomt finns inget stöd för den typen av körning i nuvarande trafikförordning och det är osäkert hur Transportstyrelsen klassar en sådan uppsättning.

Bus stop docking. Projektet har noterat att det finns flera andra användningsområden utöver automatisk in- och utkörning till/från hållplats. Systemet kan användas vid trånga passager där det ställs krav på precisionskörning och för att öka komforten genom att undvika obekväma krängningar i bussen som kan uppstå vid skarpa kurvor i rondeller, korsningar mm. Genom fördefinierade köruppdrag som är knutna till en geografisk plats kan bussen, när den befinner sig på platsen, aktivera ett fördefinierat autonomt köruppdrag. När uppdraget körs framförs bussen optimalt kördynamiskt avseende position och hastighet, även energin optimeras på bästa sätt. Köruppdraget är begränsat i hastighet <30 km/h och sträcka ca 20–100 m så att föraren ska kunna övervaka körningen och ansvarar för att fordonet framförs säkert. Föraren sitter kvar bakom ratten och kan när som helst gå in och avbryta den autonoma körningen och ta över ifall något oplanerat skulle inträffa. Systemet passar in på ett nivå 2 system enligt SAE J3016:

- *Du kör närhelst dessa förarstödsfunktioner är inkopplade – även om du inte har fötterna på pedalerna eller styr.*

Vad föraren bakom ratten måste göra:

- *Du måste ständigt övervaka dessa supportfunktioner; du måste styra, bromsa eller accelerera efter behov för att upprätthålla säkerheten.*

Även om föraren sitter kvar och övervakar körningen så är det inte givet att systemet ska användas överallt. Vissa platser kan vara olämpliga, så varje köruppdrag behöver analyseras utifrån vilken typ av trafiksituation som kan uppstå och vilka risker det innebär. Skulle det visa sig att köruppdraget är alltför svårt i förhållande till rådande trafiksituation så bör man undvika att använda systemet eller justera infrastrukturen för att på så sätt bygga bort farliga scenarier som kan uppstå.

Autonoma depåprocesser. Mycket tid kan sparas om bussarna inom depåområdet kan förflytta sig autonomt. Projektet anser att de flesta förflyttningar kan ske autonomt. Det ställer dock höga krav på säkerhet när människor är nära fordonen. Ett bra första steg kan vara att fokusera på förflyttningar av bussar inom de områden som är längst ifrån människor. Ett möjligt flöde skulle kunna vara när bussen ska ut på eller kommer tillbaka från uppdrag. Även körning från parkering fram till servicehall eller motsvarande skulle kunna ske autonomt. Vid hallen tar sedan personal över och kör manuellt på ytor där det finns annan servicepersonal, t.ex. genom tvättning, städning och fordonsinspektion. Bussarna kan hålla en låg hastighet < 5 km/h vilket reducerar skadepåverkan vid en eventuell kollision. Det finns dock fortfarande allvarliga scenarier som exempelvis klämololyckor där människa kan hamna mellan bussen och fast föremål, såsom en annan buss, en husvägg mm. Sannolikheten för att denna typ av olyckor skulle inträffa är låg med tanke på att bussen förmodligen har funktion för att upptäcka hinder i omgivningen och därtill körs långsamt, men ett fel i systemet skulle i värsta fall resultera i allvarlig olycka och behöver hanteras och risk elimineras.

8.1 Fortsatt forskning och utveckling

Det krävs mer kunskap och erfarenhet för att i framtiden kunna framföra helt autonoma bussar i kollektivtrafiken. Ett bra sätt att bygga kunskap och få mer erfarenhet kan vara genom olika typer av testbäddar där olika aktörer som tillverkare, städer, bussoperatörer och kollektivtrafikhuvudmän tillsammans provar tekniken på ett säkert och kontrollerat sätt. Testbädden skulle företrädesvis vara en del av befintligt kollektivtrafiksystem, till exempel en hel busslinje eller delar av en busslinje. Viktigt är att sträckan har den infrastruktur som behövs, digitalt och fysiskt, för att underlätta en stegvis utrullning av autonoma funktioner i takt med teknikutvecklingen och systemets mognadsgrad.

Projektgruppen har särskilt identifierat ett behov av fortsatt forskning, inklusive test- och demo inom busstågskörning i syfte att snabbare kunna implementera tekniken i verklig trafik. Busstågskörning kan tekniskt realiserats i olika tekniknivåer eller grad av automation. Även om busståget framförs manuellt med förare i varje buss finns det potentiella vinster att göra i kollektivtrafiksystemet avseende ökat kapacitetsutnyttjande av hållplatser och en möjlighet att transportera fler resenärer i rusningstid. Med en successivt ökande grad av automation kan kostnaderna sedan minska genom reducerad bemanning alternativt kan förare i buss utföra andra arbetsuppgifter av värde för resenären. I en testbädd för busståg finns också möjligheter att testa teknik avancerat förarstöd för autonom hållplatsinkörning och navigering i trånga snitt.

Det behövs fortsatt teknisk forskning och utveckling på alla områden främst när det gäller säkerhet och vilken integritetsnivå som krävs för att möjliggöra autonom körning på allmän väg eller i bussdepå. Förutom autonoma delsystem på bussen behöver det finnas V2X-uppkoppling mellan fordonen och infrastruktur för kommunikation mellan fordonen och kontrolltorn och denna behöver ha någon typ säkerhet som även är redundant. In- och

urkoppling av laddning av elbussar bör ske automatiskt för smidig drift i en depå men även ute på allmän väg.

Polisy och regelverk behöver fortsatt arbete, exempel ifall en depå klassas som avlyst område och bussen körs autonomt anses den då vara en maskin och gå under maskindirektivet, vilket kräver CE-märkning alt. att hela autonoma fordonet är typgodkänt. RISE-Rapport Självcertifiering av autonoma bussar 2021:05, 2021, Andersson, Kristina. & Håkan, Burden. & Susanne, Stenberg, har undersökt regelverk för att köra autonomt i bussdepå, skriver att en väga att gå är att hela systemet CE-märks då det ej finns typgodkända autonoma bussar. För en fordonstillverkare, som redan lägger stora resurser för typgodkännande önskar ej utföra dubbla certifieringar. Frågan är ifall en typgodkänd buss tillsammans med ett CE-märkt autonomt system kan uppfylla krav för att få operera inom maskindirektivet. Frågeställningen är ej unik för en bussdepå utan gäller alla applikationer där typgodkänt fordon modifieras med atomteknik för att operera under maskindirektivet. I klassificeringen behöver bussen, det autonoma delsystemet, V2X, kontrollrum, skalskydd, och nödstoppslösning presenteras och hur säkerhetsaspekterna behandlas, detta är också något som behöver följa maskindirektivet.

Deltagande parter och kontaktpersoner

I projektet har följande parter deltagit:

- Chalmers, Elektroteknik (Signaler & System E2) - Jonas Sjöberg
- Chalmers, Mekanik och maritima vetenskaper (Fordonsdynamik M2) – Bengt Jacobson
- Göteborgs Stad genom Trafikkontoret, Stadsbyggnadskontoret – Peter Lindgren (Trafikkontoret), Anna Svensson (Stadsbyggnadskontoret)
- Lindholmen Science Park AB – Gunnar Ohlin
- Volvo Bussar AB – Joakim Jonsson
- Volvo Group Trucks Technology – Joakim Jonsson
- Västtrafik AB – Mikael Faleke, Stefan Krafft
- Älvstranden Utveckling AB – Åsa Svensson