



Författare: Rickard Arvidsson  
Datum: 2019-02-14  
Projekt inom Komplex Reglering, Vinnova FFI

<b>FFI</b> Fordonsstrategisk Forskning och Innovation			
			

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning</b>	<b>4</b>
<b>2 Executive summary in English</b>	<b>5</b>
<b>3 Bakgrund</b>	<b>6</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod</b>	<b>7</b>
<b>5 Mål</b>	<b>7</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse</b>	<b>9</b>
6.1 AP0 Projektledning	9
6.2 AP1 Optimalstyrning av räckviddsförlängare med ruttprediktion	10
6.3 AP2 Framtagning av styrlagar och arkitektur i autonomt styrda bilar med prediktionshorisont 11	
6.4 AP3 Validering av reglerfunktionalitet i Autonoma bilar	17
<b>7 Spridning och publicering</b>	<b>19</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	19
7.2 Publikationer	20
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning</b>	<b>22</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner</b>	<b>23</b>
9.1 Volvo Car Corporation	23
9.2 Chalmers Tekniska Högskola	23
9.3 Andra parter som bidragit till projektet	23
<b>10 Referenser</b>	<b>24</b>

## 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](http://www.vinnova.se/ffi).



# 1 Sammanfattning

Vinnovaprojektet VCloud II är ett projekt inom satsningen Komplex Reglering som syftar att via digitalisering, självkörandeteknik och smart reglering kunna påvisa förbrukningsvinster under verklig körning. I projektet har forskning bedrivits inom funktionalitet där kartinformation kan användas tillsammans med insamlad data från fordonen. Syftet är att genom dessa kombinera båda datakällor, förbättra fordonets egenskaper när bilarna körs och aktivt träna in nya betingelser och förutsättningar som fordonen utsätts för. Projektet startade 2015 och är ett samarbete mellan Chalmers och Volvo Personvagnar. Arbetet har bestått i att skapa algoritmer och utvärdera metoder för att optimera energianvändningen och förbrukningen hos olika drivlinevarianter. I Arbetspaket 1 utvärderades en seriehybriddrivlina där förbrukningen kunde reduceras med 12 % jämfört med en regelbaserad funktion där motorstarterna optimerats till rätt tillfälle. I de övriga arbetspaketen som genomförts har en IT-arkitektur för fordon och reglering tagits fram där molninfrastruktur används med bilens befintliga styrenheter. Ett lättviktsprotokoll för att skicka data mellan klient och server har implementerats och ett backend som kan hantera olika behov av antal klienter som skickar data. Datan som skickas från bilen används för att förutse bilens troliga slutdestination och vägen dit baserad på historisk data. Utifrån den prediktionen räknas en optimal energinivå till batteriet ut, baserat på om fordonet kör på motorväg eller i låghastighetszoner. Denna optimering av energilagren i fordonen har visat besparing i förbrukningspotential på upp till 10 % i de testcykler som analyserats. Den lägsta potentialen som uppmättes på en körcykel designad för låg förbrukningspotential för funktionen i en Plugin-Hybrid var över 4 %.

## 2 Executive summary in English

Vehicles are contributing to global and local environmental problems as a result of fossil fuels. A majority of the combustion engine population is driven by fossil fuels and electrified vehicles are also to a large extent dependent on electricity production from fossil fuels. Emission legislation and standardized test methods have led the development of technology for the automotive industry. Increased efficiency, improved combustion control and aftertreatment systems have created cleaner and more fuel efficient drivetrains. Authorities and publications have highlighted an increased gap between in-use and certified vehicle consumption and emissions because of the test-cycle current design. In order to address these differences authorities have conducted changes within the test methods from 2017 and forward and a new test-cycle WLTP which introduced real-driving-emission test procedures. Decreasing the gap of real driving emissions and consumption can also be improved outside the legislative test-cycles using forward looking sensors, map data and statistical models. This technology is commonly available in self driving vehicles and can be used to control the vehicles more efficiently.

VCloud II is a Vinnova financed project within the Complex Control funding initiative between Volvo Car Corporation and Chalmers University of Technology. The project started in 2015 and was finalized during 2019. The work have primarily consisted of optimizing the drivetrain in the vehicle when the technology from self-driving cars are available. The technology considered in the project is path planning, the ability to freely control the speed of the vehicle and knowledge of the route data ahead. The work have been divided into a methodology and literature study where simulations showed the potential of implementing lookahead control functionality. A majority of the work was to create software functionality to predict the final destination of the vehicle without entering any final destination. The purpose was to achieve a fully autonomous system without any active input from the user. The other significant work package contains of architectural work which enables the ability to control the drivetrain by utilizing the data the vehicles are producing, and furthermore use this data to train and evaluate different control software's. Later these methods and architectural work were all integrated in the Drive Me self-driving vehicles in Gothenburg and tested during real driving circumstances. The results shows fuel consumption improvements from 4-10 % in the tests performed in the evaluation and significant emission reduction for the predictive functionality with both decreased NO emissions and decreased wear on the high voltage battery.

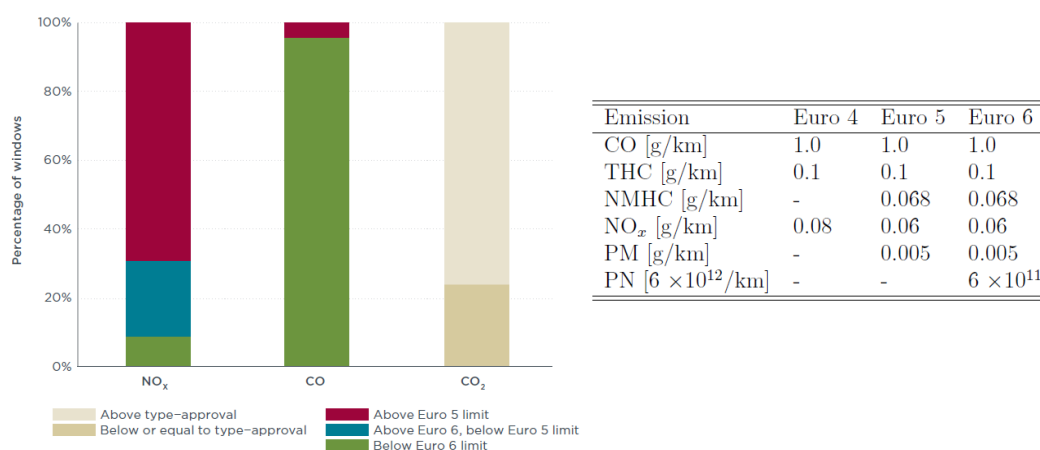
The methods are evaluated in three significant layers of data for all can contribute to positive impacts in attributes for the vehicles. The first is using the map layer and short horizon in front of the vehicle. The final destination in this scenario can be given if the user have entered the destination in the navigation system, but several studies performed carried out highlights that this is not done during commuting to a large extent (*In Car Navigation Usage, Victoria Institute 2004*). Challenges with this static map data is altitude thinning and map data irregularities. The second data layer used in the project is collecting the significant data from the vehicles and when needed update the resolution of the data dynamically in the Volvo Cloud. This information about the vehicle propulsion need is later used to calculate a more accurate consumption need with different attributes using statistics and machine learning. These control policies are later stored and the actual consumption is analysed afterwards to determine whether the control contributed to an improved consumption.

The third layer of data incorporates the ability to combine with real time traffic data, weather data and infrastructure data. The project have tested and evaluated this through the Nordic Way interchange server where environmental zones were pushed dynamically from the infrastructure service, allowing the vehicles to act on information within 10 seconds from publishing the data to the Interchange Node. This fast push mechanism is already used to share accident information from the vehicles but was here tested in a context to publish information to the vehicles from the infrastructure.

### 3 Bakgrund

En ökande befolkning i världen från 7,7 miljarder idag (2019) till ca 9 miljarder 2050 tillsammans med en förväntad BNP- tillväxt, kommer att medföra en kraftig ökning av energibehovet. Enligt IEA kommer energiförbrukningen i världen att öka med 50 % fram till 2025 jämfört med 2005 (1). Tillväxten kommer främst att ske inom icke-OECD länder. Under 2015 var 81 % av världens energibehov beroende av fossila bränslen. Av denna energi används 27 % av transportsektorn. Förbränning av fossila bränslen är direkt kopplad till utsläpp av koldioxid, CO<sub>2</sub>, där transportsektorn 2008 svarade för 23 % av alla förbränningsgenererade koldioxidutsläpp, vilket globalt motsvarar cirka 1 ton koldioxid per person och år. Förutom koldioxid bildas också mindre mängder av kväveoxider (NO<sub>x</sub>), koloxid (CO), oförbrända kolväten (HC) och partiklar (PM). Mätningar i Stockholm utförda 2011 påvisade ett överskridande av EU:s gränsvärde för luftkvalitet (50 µg/m<sup>3</sup>) under 32 dagar.

För att uppnå dessa miljömässiga förbättringar som hårdare emissionslagstiftning syftar till, kan tydliga trender observeras att verklig förbrukning differentieras i större grad från certifierad förbrukning. En av de första rapporterna som påvisade detta redan 2011 kom fram till att NO<sub>x</sub> emissioner samt CO<sub>2</sub> hos moderna dieslbilar vilka uppfyller emissionskriterier för Euro 6 är mycket större vid verkliga körcykler än vid certifierad förbrukning (3). Se Figur 1 nedan. (Weiss, Martin; Bonnel Pierre; Hummel Rudolf, 2011). Utfallet där fordon kraftigt översteg emissionsgränserna för NO<sub>x</sub> samt CO<sub>2</sub> är över 70 %.



Figur 1. Bilden till vänster påvisar andelen av testfordon i studien som uppfyller Euro 6 lagkrav (grön), respektive uppfyller ej Euro 6 lagkrav (blå, röd). Tabellen till höger visar de lagkravsgränser för emissioner som gäller för olika Euro-klassningar.

FFI projektet V-Cloud (37429) har tidigare, tillsammans med Chalmers jobbat med ruttprediktion och optimering av drivlinan med tillhörande infrastruktur, systemlayout, arbetssätt och nödvändiga algoritmer i syfte att kunna karakterisera en rutt, prediktera en slutdestination samt en effekt-trajektorier givet ett antal ingående kriterier. Avgränsningar i V-Cloud var integration enbart i prototypstyrenheter / datorer samt med ett ramverk som inte är kapabelt till stora mängder data, utan endast enstaka bilar evaluerades. Dessutom lades inte mycket fokus på maskininlärning och hur tidsserier hanteras i en inlärningskontext när data strömmas löpande från testfordon.

Prediktion av beteendemönster och prediktionshorisont används i många applikationsområden skilt ifrån fordonsutveckling, exempelvis inom mediabranschen med Spotify och Netflix som exempel. Inom fordonsbranschen pågår forskning hos bland annat Ford Motor Corporation,

Tesla och Google. Honda har tagit patent inom Model Predictive Control och hybridfunktionalitet kring urladdningsstrategier. Parallellt med detta jobbar Zenuity, Google, Lyft, Uber och andra bolag med självkörande bilar vilka kräver artificiell intelligens (AI) för mönsterigenkänning och objektklassificering.

## 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektet faller inom kategorin tillämpad forskning med implementering av komplexa integrerade system där AI och traditionell mjukvara tillsammans kan verka för att förbättra egenskaper hos fordon. De självkörande bilarna skall verka för att skapa förbrukningsvinster tack vara förbättrade trafikflöden, genom minskat behov av transporter, samåkning och bättre nyttjandegrad av varje fordon. Det detta forskningsprojekt syftar till är att använda kunskapen om fordonets planerade rutt till att förbättra drivlinans förbrukning. Detta sker genom insamling av data för hur fordonet används med dess nuvarande tillstånd och via AI räkna ut en optimal reglering av drivlinan för bilens framtida körsträcka. Forskningsfrågorna innebär att hitta metoder och infrastruktur för att implementera AI för fordon i realtid under tiden fordonet körs, samt på ett effektivt sätt kunna beräkna den optimala styrningen av drivlinan givet dessa tillstånd.

## 5 Mål

Målen enligt projektansökan uttrycktes som följer

- Ta fram regleralgoritmer och mjukvara som sänker förbrukning och emissioner under autonom körning i verklig drift, målet är att med en konventionell hybrid uppfylla 75 g CO<sub>2</sub>/km, 2025 i Charge Sustain mode
- Implementera mjukvarukomponenter unika för VCloud II i DriveMe fordonsflotta för utvärdering
- Minimera motorns drifttid under autonom körning jämfört med regelbaserad produktionsmjukvara med bibehållna eller förbättrade emissioner
- Skapa plantmodeller och drivlinemodeller relevanta för hybridreglering
- Utveckla metoder som via Chalmers kan bli publika och bidra till open source utvecklingen av Sympathy verktygskedja via publikationer
- Öka användningen av nya analys samt modelleringsverktyg, inom akademien och inom industrin
- Ta fram en metodik som kan reducera skillnader mellan certifierad och verklig förbrukning samt emissioner
- Utveckla reglerstrategier som kan hantera framtida nollemissionszoner och hybriders energihantering för att kunna uppfylla ren eldrift vid speciella geografiska intressepunkter. Exempelvis emissionsfria taxizoner i London som införs 2018<sup>1</sup>
- Utvärdera och implementera dessa metoder samt utred påverkan i autonoma fordon

Under projektets gång har de leveranser och effekter som skall uppnås av projektet legat fast enligt ursprunglig plan. Mjukvaruutvecklingen har skett i flera olika plattformar i Java, Matlab och Python och inte explicit blivit implementerad i pythonbaserade Sympathy. Många av de funktioner och metoder som utvecklats har publicerats som open-source bibliotek och publicerats på plattformar som exempelvis GitHub eller via akademiska publikationer. Anpassningar för att kunna hantera uppkopplade trafikljus och utökningar kring miljözonshantering skedde också sent i projektet. Detta medförde ett visst utökat scope inom nollemissionszon hanteringen vilka egentligen inte var planerade för initialt. Projektet har utvärderat och testat flera olika metoder och funktioner som kan användas i både självkörande

<sup>1</sup> <http://evfleetworld.co.uk/news/2014/Jan/All-new-London-taxis-must-be-zero-emission-capable-from-2018/0438012418>

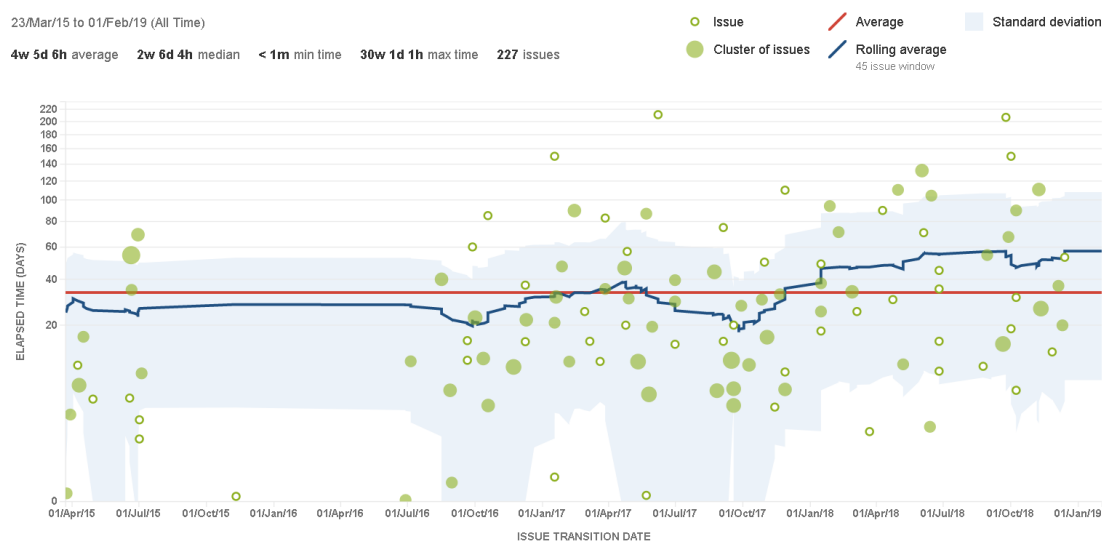
och konventionella fordon. För Volvo Car Corporation har projektet bidragit till stora mervärden i syftet att digitalisera och skapa smart funktionalitet för fordonen. Leveranserna, måluppfyllelsen och arbetet i sin helhet är sammanfattat i kapitlet Resultat och måluppfyllelse nedan och bifogat i de publikationer som gjorts inom ramen för projektet.



## 6 Resultat och måluppfyllelse

### 6.1 AP0 Projektledning

I detta arbetspaket har koordinering skett mot projekt samt framtagande och takthållande av tidplan och leveranser inom projektet Drive-Me med innehållet kring smart energireglering samt rapportering gentemot Vinnova. Utöver detta har deltagande på konferenser och presentationer utgjort en väsentlig del av arbetspaketet. För att nämna några har projektet presenterat på Vinnova konferensen i Stockholm 2017, av regeringen anordnad av konferens (EU Transportministerråd Göteborg samt Geofencing KTH i Stockholm), eller andra innovationskonferenser i Göteborg. Dessutom har olika journalistevent anordnats, exempelvis en demonstration för Tekniskt veckoblad i Oslo och även tillsammans med journalister på electro-mobility event i Göteborg (Ny-Teknik och internationell press).

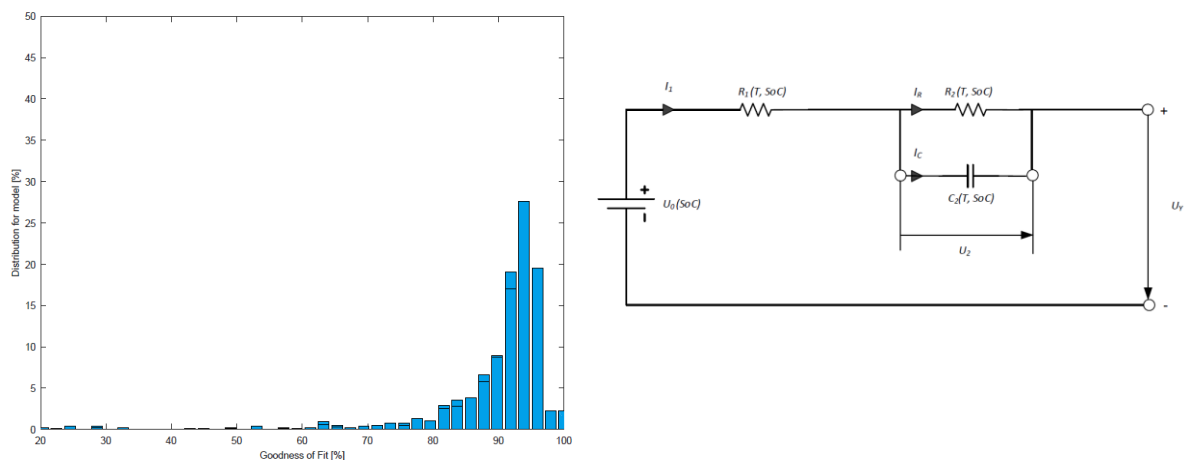


*Figur 2 Visar en översiktsbild över implementationssteg i projektet och antal dagar per Epic / Story för implementation. Under tiden december 2015 – juli 2016 var stora delar av teamet utlånade till att sätta upp molnmiljön för Drive-Me bilarna där mjukvaran skulle implementeras och de gemensamma plattformskomponenter som behövs, exempelvis map matcher och decoder / encoder.*

Under projektet har 227 ärenden och nya features hanterats och implementerats rörande databehandling, klustring, skalningsfunktionalitet, positionering, prediktion och drivline-energioptimering. Utöver detta har också mjukvarukomponenter tagits fram i bilen där egenutveckling skett, samt leveranser från underleverantörer.

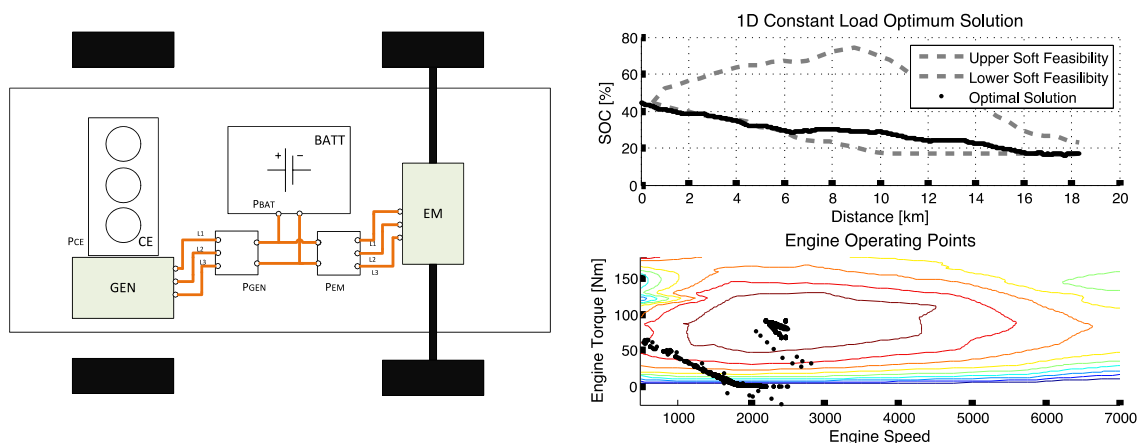
## 6.2 AP1 Optimalstyrning av räckviddsförlängare med ruttprediktion

I detta arbetspaket gjordes studier kring hur en seriehybrid drivlina kan regleras optimalt då omvärldsinformation om framtida rutter finns tillgängligt. En stor utmaning var att kunna skapa en



Figur 3 Till vänster visas modellnoggrannhet vid evaluering av testdata or träningsdata för ett batteri med RC krets. Figuren visar fördelningen i modellanpassning batterimodell i studien som påvisade bäst karakterisering av batterispänning för testdatan. 100 % "Goodness of Fit" innebär ingen avvikelse i spänning gentemot testdatan. Figuren till höger visar den modell som uppnådde högst modellnoggrannhet.

fysikalisk batterimodell (Plant) som påvisade liknande egenskaper i verklig körning som vid simulering. Svårigheten i forskningen var hur mätdata från verkliga körningar kunde användas för att karakterisera batteriegenskaper efter en körcykel (offline). Batteriström, batterispänning, batteritemperatur samlades in under ett års körning, signalbehandlades samt parameterestimerades mot den insamlade datan. När parameterestimeringen var gjord påbörjades studier över hur förbränningsmotorn optimalt regleras i en förbränningsmotordrivlina. Detta arbete utfördes i ett Matlab-baserat simuleringsverktyg med metoden dynamisk programmering. Svårigheten i arbetet var att kombinera den regelbaserade mjukvaran i fordonet med ytterligheterna i dynamisk programmering och mycket tid och energi lades på att få med bivillkor och beteenden från fordonets riktiga mjukvara i evalueringen av metoder.

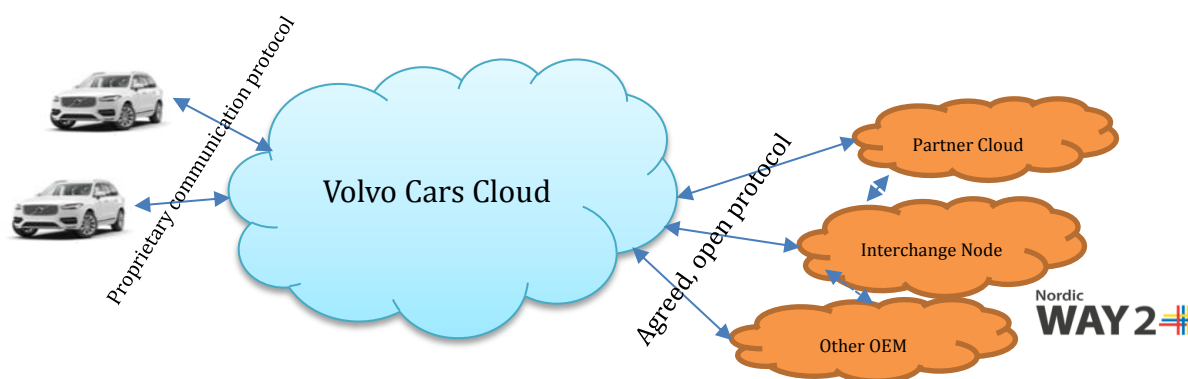


Figur 4: Till vänster visas en arkitekturbild över en seriehybrid drivlina, med förbränningsmotor och generator i serie som producerar elektrisk effekt till ett batteri och en elmotor vars primära syfte är framdrivning och regenerativ bromsning. Till höger visas en utladdningstrajektoria på 18 km för lösningen med konstant arbetspunkt. Den regelbaserade mjukvaran säkerställde transitionen under en motorstart till den konstanta arbetspunkten.

En av hypoteserna som testades är att i seriehybriddrift begränsa arbetspunkterna till generatorns och förbränningsmotorns mest förbrukningsoptimala punkt, dvs. punkten där systemet har lägst [g/kW] förbrukningsekvivalens. Denna hypotes testades mot två mer sofistikerade metoder, en där optimal effekt härleddes då förbränningsmotorns varvtal var bestämt samt en mer beräkningsintensiv metod där förbränningsmotorns last och varvtal kunde varieras fritt. Den metod som visades vara mest förbrukningsoptimal var en 2-tillståndmodell där motorlast och varvtal varierades. Totalt uppnåddes en förbrukningsbesparing i datorsimuleringar på den analyserade körcykeln med 12 % genom att använda 2-tillståndsmodellen jämfört med en enklare modell.

### 6.3 AP2 Framtagning av styrlagar och arkitektur i autonomt styrda bilar med prediktionshorisont

Arbetspaket 2 har inneburit flera systemarkitektur, design aktiviteter och integration mellan moln – bil och moln –

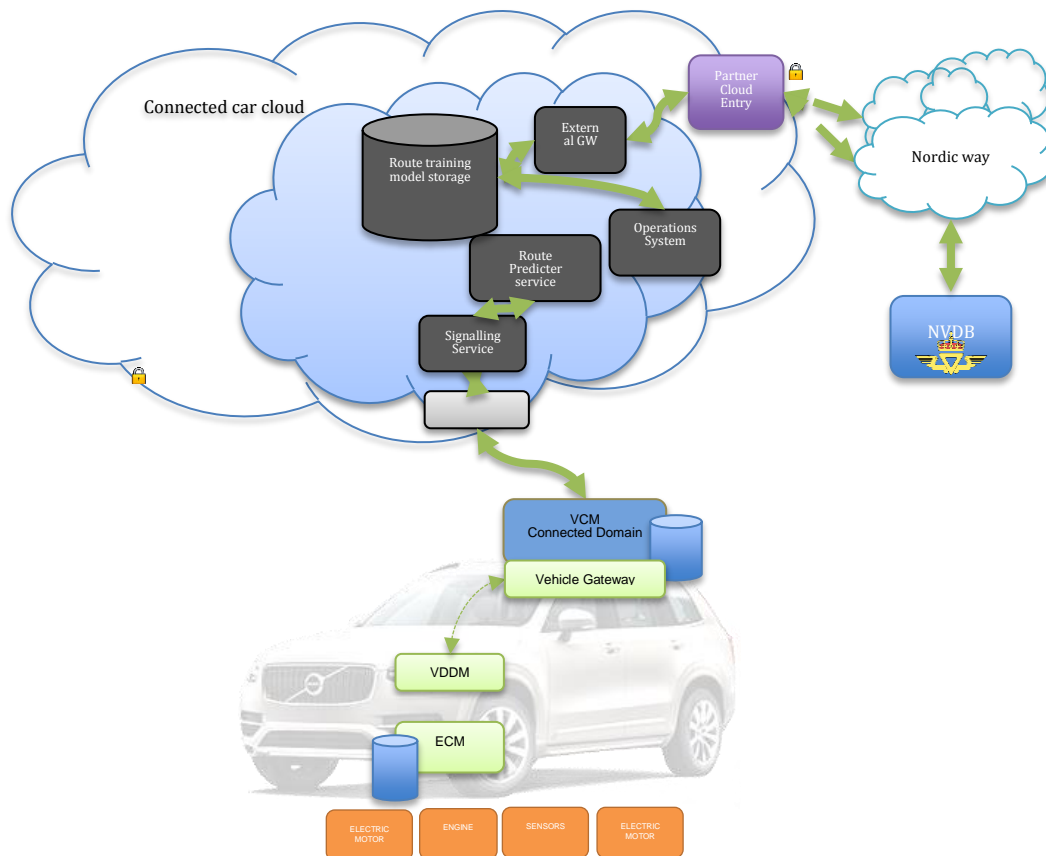


*Figur 5 En översiktsbild över den infrastruktur som varit en viktig del i VCloud II. Den kommunikationsstandard som tagits fram i detta projekt är den del som är till vänster "Proprietärt kommunikations protokoll", medan i andra projekt har fokus varit att ta fram öppna protokoll till tredjepart och viktiga infrastrukturtjänster*

externa partners. För att kunna möjliggöra datautbyte med externa partners har uppkoppling via Volvo Cars Cloud till tredjepart använts i projektet. Informationen som kommit till fordonen har varit exempelvis externa miljözoner, där stort integrationsarbete gjorts i Nordic Way projektet. Inom ramen för VCloud II implementerades den lokala hanteringen av miljözoner och urladdningsstrategier med hänsyn tagna till dessa bivillkor i hybriddrift. Utöver detta har också normaliserad energidata publicerats från fordonen i syfte att konstruera vägsystem/infrastruktur mer energioptimalt och identifiera vägdesign som är suboptimal ur energiförbrukningssynpunkt.

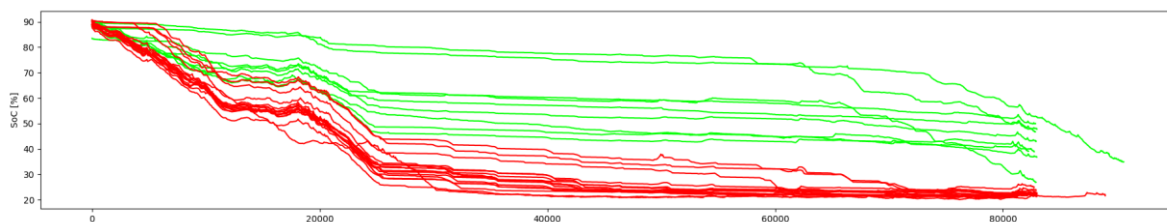
#### **Prediktion av pendlingsrutt med reglersystem (Ej publicerat resultat)**

I det integrerade systemet lär sig bilen fordonets rese-mönster med maskininlärning. Data från bilen skickas kontinuerligt från fordonet till Volvo Cars Cloud och matchas till vägsegment i en karta. Attribut som observeras är framdrivningseffekt, komforteffekt och normaliserad hastighet på vägsegmentet. Vid långa vägsegment skapas en fördelningsfunktion baserad på sträckan om skillnader i effekt eller hastighet observeras. Variablerna som implementerats är tid och sträcka. Efter körcykeln avslutats, klustras start- och slutdestinationerna och en ruttprediktionsmodell tränas (vilken är implementerad som ett Bayesianskt nätverk). Variablerna i nätverket är de observerade vägsegment längs ruten som matchas till kartan, tid och destinationskluster/avresekluster. En översiktsbild över systemet kan ses i Figur 6.



Figur 6 Översiktsbild över den arkitektur som används för reglering i det kompletta systemet. Övre figuren visar de plattformstjänster som används för kommunikation med externa entiteter såsom vädertjänster och infrastrukturtjänster.

I början av 2018 påbörjades tester med det kompletta systemet där bilen själv skulle identifiera olika rutter som



Figur 7 Visar inträningsförlopp av urladdningshastighet för batteriet med hjälp av algoritmen under utvecklingen av funktionen. Röd linje visar körningar då funktionen är avstängd och regelbaserad funktionalitet styr hybridfunktionaliteten. Gröna linjer visar olika parameteriseringar med funktionen aktiv där den aktivt omtränas.

användaren körde, baserat på tid på dygnet och veckodag. När rätt rutt predikterades, skickades en optimerad urladdningstrajektoria ned till bilen. Baserat på olika regler, tester och kontroller samt tillstånd valde bilen att följa detta. En del regulatorparameterjusteringar fick göras under testperioden för att få rätt urladdningshastighet av batteriet. I Figur 7 ses ett antal av dessa körningar för en av evalueringsrutterna. Den röda kurvan motsvarar

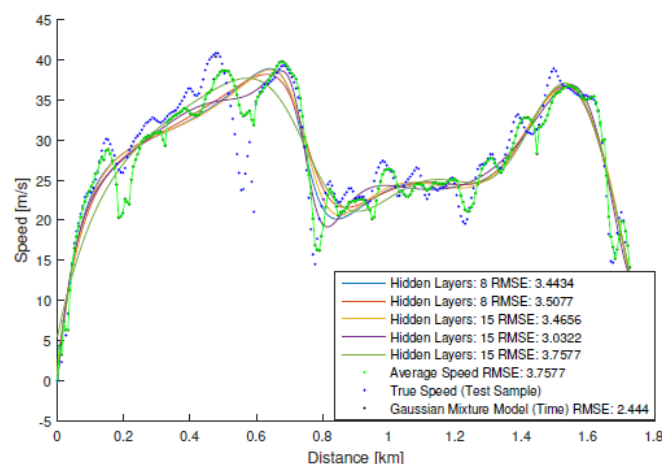
urladdningstrajektorian för den regelbaserade standardhybridregleringen. De olika kurvorna beror på olikheter mellan förartyp, trafik och andra störfaktorer. Notera att X-axeln innehåller antal element och inte sträcka eller tid. Några justeringar fick göras under evalueringen för att uppnå full urladdning i slutet av cykeln vilket kan ses ovan. När dessa justeringar gjorts fortsatte evaluering med emissions- och förbrukningsprov. Vad som kan noteras är att i referensstrategin laddas batteriet ut först och bilen går i arbetspunkter då batteriets högspänningssystem har lägre spänning, får leverera högre ström för laster som förbrukar energi och vilket bidrar till högre förluster i systemet.

Förbrukningsresultat och synergieffekter står skrivna om i publikationer [2], [3], [4], samt i icke publicerat resultat från RDE körningar i en ofördelaktigt utformad testcykel under: AP3 Validering av reglerfunktionalitet i Autonoma bilar.

### **Prediktion av hastighetsprofil med maskininlärning**

I detta arbetspaket har olika former av neurala nätverk använts för att prediktera fordonets hastighet givet en sträcka som fordonet färdats med en tillhörande hastighetsprofil. I ett andra skede har också ett examensarbete undersökt hur stor inverkan positioneringsinformation har på hastighetsprediktion. D.v.s. Hur bra hastighetsprediktion kan fås utan att fordonets position används för att matcha fordonets position till ett vägsegment i en karta. Syftet var att kunna använda

I det första arbetet testades olika former av statistiska modeller i en positionsbaserad modell, där ursprungsdestination och sträcka användes som indata. Träningsdata var diskret över ruttens sträcka från startdestination.



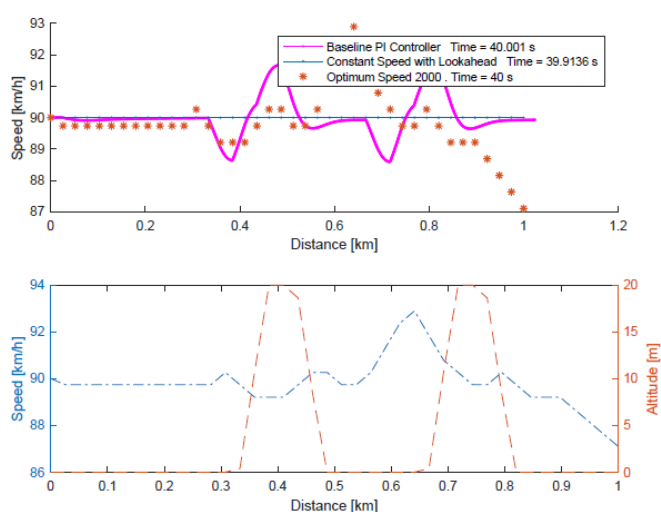
*Figur 8 Träningsdata från 3 intränade rutters hastighetsprofiler jämfört mot en testrutt och olika antal neuronkärnor i det neurala nätverket. Lägst RMSE (minsta kvadratfel) för hela tidsserien*

I examensarbetet utreddes hur bra hastighetsprediktion maskininlärning kunde ge utan att ha tillgång till fordonets position [19]. Syftet var att kunna uppnå ett liknande resultat med spatial information och främja integritet hos användarna. Dock gav denna metod stora RMSE för hastighetsprediktionen.

Maskininlärningsalgoritmer presterade t.o.m. sämre än regelbaserade Kalmanfilter som utgick från fordonets nuvarande tillstånd och acceleration [19]. I Figur 8 ses ett exempel på ett antal rutter som tränats med neurala nätverk jämfört mot en Gauss-fördelningsfunktion. Det bästa neurala nätverket gav ett RMSE på 3.44 m/s för testfallet medan GMM gav ett RMSE på 2.44 m/s.

### Optimal hastighetsreglering för fordon med variabel terräng för elfordon (Ej ännu publicerat)

En teoretisk studie om hur hastighetsregulatorn hos självkörande fordon eller fordon med farthållare kan påverka fordons energiförbrukning har gjorts för körcykler med störfaktorer. Det studerade scenariot har varit en backe som för en förbränningsmotorbil kräver nedväxling. För elbilen kan denna backe hanteras genom att öka framdrivningseffekten. Förbränningsmotorn och växlingarna är beskrivna i Optimal växlingsstrategi med variabel terräng (Ej ännu publicerat). I detta arbete har ett elfordons hastighetsprofil undersökts med avseende på energiförbrukning och variation med varierande hastighetsprofil. En vanlig P-I regulator för hastighetsreglering har jämförts med en dynamisk programmeringsmetod. Ett elfordon som har möjlighet att reglera effekten mycket snabbt har också möjlighet att följa hastighetsprofilen exakt utan avvikelser. Dessa tre ytterligheter testades och resultatet från simuleringar visar en minskning från 11.2 kWh/100 km till 10.2 kWh/100 km för en eldrivlina



	Baseline PI Speed Controller	DP Algorithm with discretised segments	DP Algorithm Continuous Time Simulation	Constant Speed 10 kHz
[kWh/100 km]	11.2	10.9	10.2	12.0
Travel Time [s]	40.00	40	39.91	40
Switching Frequency [kHz]	10	Optimum	Optimum	10

Figur 9 Till vänster visas optimal hastighetstrajektorier för ett elfordon. Magenta färgad kurva visar standard P-I regulator och streckad röd visar optimerad hastighetstrajektorier. I beräkningsexemplet finns inget bivillkor på slut-tillstånd för fordonshastighet. Till höger visas olika förbrukningar för den testade vägsträckan (1 km). I exemplet reducerades energiförbrukningen från 11.2 kWh/100km till 10.2 kWh/100 km för det studerade testfallet.

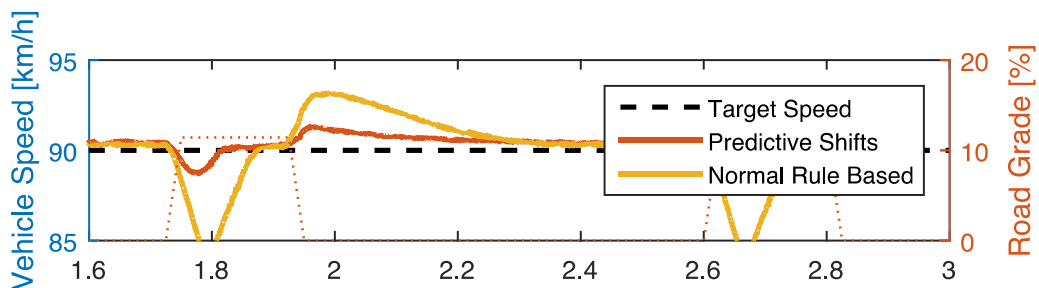
### **Optimal växlingsstrategi med variabel terräng (Ej ännu publicerat)**

I detta arbete implementerades en algoritm för att söka optimal växlingssekvens för bilen givet topografi framför bilen med altitudinformation från kartdatan. Mätningar utfördes sedan i rigg där påverkan av bränsleförbrukning och emissioner utvärderas på ett 1 km vägsegment. Körfallet som testats innehåller ett stegsvar i altitudändring som orsakar en signifikant hastighetsstörning på fordonet. Utvärdering över hur motorn påverkas vid transient

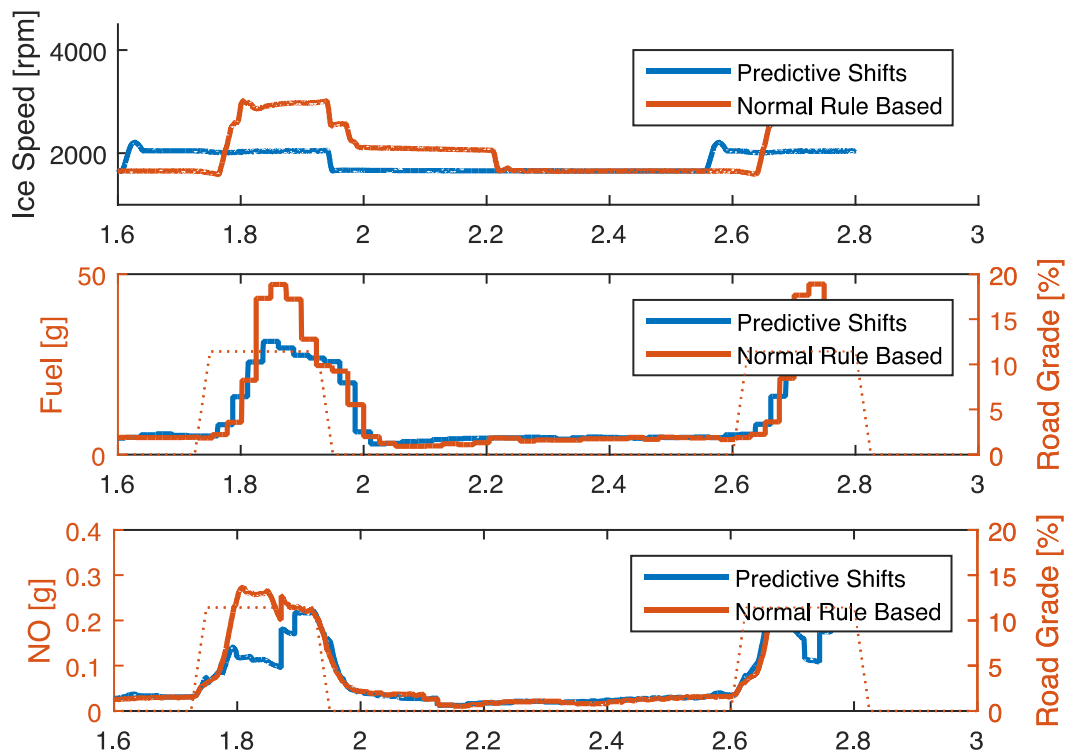


*Figur 10 Riggtester med en S60 Plug-in Hybrid i testriggen på Chalmers Tekniska Högskola där mjukvaran för optimal växlingsstrategi reglering utvärderades*

reglering och hur attribut påverkas genom att undvika transienter gjordes. En signifikant minskning i förbrukning och kväveoxider kunde mätas för de testade körfallen, dessutom uppnåddes förbättrade köregenskaper med lägre hastighetsavvikelser för fordonet. Figur 11 visar skillnader i hastighetsprofil för de olika regulatorerna med och utan kartinformation. Figur 12 visar skillnader i transientegenskaper för de olika motorvarvtal och transienter som skapats med växlingsstrategierna och motorns respons samt hastighetsregulatorns respons på att öka dragkraft vid större reglerfel. De transienta NO utsläppen reduceras kraftigt med kartinformation till motorstyrenheten.



*Figur 11 Visar hastighets-trajektorian för fordonet för olika växlingsstrategier. Den orange kurvan visar fordonets hastighet med ordinarie växlingsstrategi utan horisontdata framför fordonet och den röda kurvan visar hastighets-trajektorian med horisontreglering för växlingsstrategin. Svart streckad linje är fordonets börshastighet*



Figur 12 Visar skillnader i regelbaserad växlingsstrategi och prediktiv växlingsstrategi med kartdata. Övre figuren visar motorns varvtal, figuren i mitten visar förbränningsmotorns transienta bränsleförbrukning och nedre figuren visar totala mängden kväveoxid från avgasröret efter katalysator

Totalt reducerades förbrukningen med 6 % under det analyserade vägsegmentet samt NO-utsläppen med 28 %. Antalet växlingar genomförda per kilometer reducerades från 3.1 ned till 1.25 vilket är en signifikant körbarhetsförbättring. Mätningarna har utförts i Chalmers hybridcell med den emissionsutrustning som finns tillgänglig. Emissionerna är uppmätta med en FTIR och genom att använda fordonets sensorer för att beräkna avgasflöde. Förbrukningen är uppmätt via en bränslevåg.

Tabell 1 Resultat från riggkörningar med växlingar och Look-ahead reglering

	Referens utan Look-ahead	Med Look-ahead
Bränsleförbrukning [-]	-	- 6 %
NO [-]	-	-28 %
CO [-]	-	~ 0 %
HC [-]	-	~ 0 %
# Växlingar per / km	3.1 (3.5)	1.25



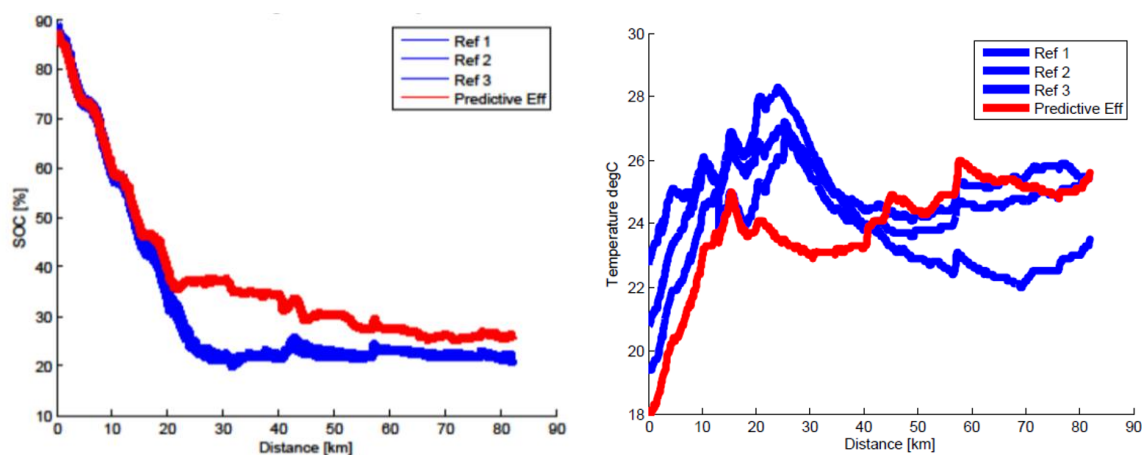
## 6.4 AP3 Validering av reglerfunktionalitet i Autonoma bilar

De olika algoritmerna undergick provning för ett antal testfordon och olika personer i en studie under 4 månader. Resemönstret kallades "Pendlaren" och syftet är att efterlikna en persons pendlingsmönster där funktionen validerades under en inträningsfas (avstängd) och senare med funktionen aktiverad. Riggtester utförda på Volvo Cars visade en förbrukningsbesparing på upp till 10 % för den analyserade testrutten baserad på ett normalt pendlingsscenario. Ytterligare en evaluering gjordes på väg med en RDE cykel (Real Driving Emissions) där ett fordon fick träna körbeteende under 3 rutter och sedan aktivera regleringen av VCloud II med optimerad



Figur 13 Visar preparering av testfordonet inför evalueringen med PEMS utrustning (Portable Emission Measurement System).

urladdning. Funktionaliteten bestod i att förlägga stadstrafik och lågfartskörningen först i cykeln, på ett sådant sätt att bilens elektriska räckvidd inte räckte till för färdas hela körsträckan. Detta är det körfall som ger lägst förbrukningspotential varför detta också var intressant att analysera. Den resulterande urladdningstrajektorian och temperaturen i bilens 400 V batteri kan ses i Figur 14.



Figur 14 Till vänster visas högvoltbatteriets urladdningstrajektorier och till höger visas temperaturen i högvoltbatteriets celler. Den röda kurvan representerar den prediktiva funktionaliteten.

Trots den låga potentialen i körcykeln så gav trots allt funktionen en signifikant förbrukningsbesparing och andra positiva effekter. Bland annat kunde en minskad cykling av batterierna observeras som bidrog till att den aktiva batterikylningen med AC kyla inte behövde aktiveras. En förklaring till detta är att högre spänning i HV systemet

leder till högre systemverkningsgrad och lägre strömmar, vilket i sin tur leder till lägre bränsleförbrukning och gynnsammare förhållanden för batteriet.

Totalt minskade bränsleförbrukningen med 4.3 % för ruten där algoritmen användes, med mindre åverkan på bilens batteri och lägre total energi använd. En sammanfattning av resultatet kan ses i Tabell 2.

*Tabell 2 visar förbrukning och använd energi för testrutten*

	<b>Referens</b>	<b>P-E</b>	Minskning
Bränsleförbrukning	-	-	-4,3%
Batteri SOC Fönster [%]	<b>67,16</b>	<b>62,5</b>	
Batterikylning Aktiverad	<b>Ja</b>	<b>Nej</b>	
Vevaxel-energi [kWh]	<b>13,83</b>	<b>13,2</b>	-4,6%
Batteri Energi Ut [kWh]	<b>8,62</b>	<b>8,5</b>	-0,8%
PEMS CO <sub>2</sub> [g/km]	<b>86,93</b>	<b>84,2</b>	-3,0%

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Projektet har deltagit på flertalet konferenser och publika arrangemang för att möjliggöra kunskapspridning och skapa intresse för ingenjörsyrket, dessa ligger bifogade under 7.2 nedan. Två onlinekurser (MOOC) mikro-master har projektledaren engagerat sig att ta fram gällande el och hybridteknik. Denna kurs är tillgänglig publikt via EDx plattformen. Utöver detta har undervisning skett i kursen TME095 (Hybrid Vehicle and Controls) för mastersstudenter på Chalmers. I kursen har föreläsningar samt handledning av övningstillfällen bidragit till att skapa ökad kunskap kring hybridfordonsmodellering. Särskilda insatser för att locka kvinnor till ingenjörsyrket har gjorts. Tre studenter från Tekniksprågar-programmet har varit engagerade i provning och supporterat de pågående aktiviteterna i projektet. Fyra examensarbeten har hållits i projektet varav två har varit kvinnliga studenter som därefter fortsatt sin karriär inom fordonsindustrin. Utöver detta har flera demonstrationer hållits. Dels har man varit delaktig i arbetet kring Geofencing som initierades av Transportstyrelsen i Sverige. Det har hållits demonstrationer på ITS World Congress i Köpenhamn för transportministrar i Danmark, Norge, Finland samt stadsborgarrådet i Sverige. Under transportministermötet i Göteborg 2018 höll författaren ett föredrag om hur uppkopplade fordon bidrar till hållbar mobilitet och lägre energiförbrukning samt emissioner i städer.



*Figur 15 EU Transportministermöte i Göteborg 2018 där teknik från VCloud II presenterades. Thomas Eneroth samt Francois Bellot (Belgiens transportminister) fick provköra tekniken som var implementerad i två demonstrationsbilar*

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Ja. Projektet har bidragit till stora mervärden för Volvo Cars och Chalmers. Projektet har varit en stark drivkraft till att ta fram en säker telemetri för uppkopplade fordon mer reglering.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Ja. En fortsättning har skapats (EENE) för att optimera ruttval hos elfordon med laddning och delar av projektet har redan introducerats i produktion.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Ja. (Se Introduceras på marknaden)

Introduceras på marknaden	X	Delar av funktionaliteten med kartbaserad funktionalitet sattes i produktion i Plugin Hybrid bilar 2018, V18 (Predictive Efficiency). Samtliga självkörande fordon har funktionaliteten fullt ut implementerad. Den funktionalitet som är implementerad i Drive-Me projektets demobilar. Den självlärande funktionaliteten kommer rullas ut i framtiden.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut	X	Miljözoner och Plugin-hybrider har varit aktuella ämnen efter dieselskandalen från Volkswagen, Mercedes, Renault. Politiker har provkört tekniken på EU toppmöten, ITS World Congress samt på andra event. Tyvärr har miljözonsutredningen i Klass 3 definitionen inte beaktat möjligheterna med digitalisering och digital kartinformation. I Norge diskuteras en differentierad trängselavgift baserad på om Pluginhybrider används med eldrift.

Kopplingar i projektet finns till Nordic Way, samt Nordic Way 2 där viktig information till fordon har publicerats (exempelvis vägrelaterad information) samt normaliserad data till Statens Vegvesen i samarbetsprojekt där datadriven väginfrastruktur analys skall bidra till att konstruera mer energieffektiva vägar kan minska transporters footprint. Via dessa projekt har också data-utbyte skett till Volvo Personvagnar, bland annat har miljözoner publicerats via Nordic Way interchange server.

## 7.2 Publikationer

### ***Publikationer av projektets doktorand***

- [1] Arvidsson R, McKelvey T, Battery Parameter estimation from recorded fleet data. SAE Fuels and Lubes 2016
- [2] Arvidsson R, Lar16sson V, Ekström M, Westerlund A. An evaluation of discharge strategies for Plug-In hybrid electric vehicles. 25<sup>th</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2016
- [3] Larsson V, Arvidsson R, Ekström M, Westerlund, Åkerblom N, A. Dynamometer test of a rule-based discharge strategy for plug-in hybrid electric vehicles, 8th IFAC International Symposium on Advances in Automotive Control, Norrköping 2016
- [4] Arvidsson R, McKelvey T, Comparing Dynamic Programming Optimal Control Strategies for a Series Hybrid Drivetrain, SAE Fuels and Lubes 2017
- [5] Arvidsson R, Storsater A, Geofencing as an enabler for Zero-Emission Zones, 25<sup>th</sup> ITS World Congress Copenhagen 2018
- [5.1] Arvidsson R, Energy Efficient Longitudinal Control, LiC avhandling, Chalmers University of Technology Gothenburg 2018

### ***Andra publikationer gjorda i projektet***

- [6] ILKA, Adrian – VESELÝ, Vojtech. Robust Guaranteed Cost Output-Feedback Gain-Scheduled Controller Design. 20th IFAC World Congress 2017, Toulouse, France, July 9-14, 2017, p. 11853-11858.

- [7] ILKA, Viktória – ILKA, Adrian. An overview about legal regulation of autonomous vehicles: technical and legal challenges. Proceedings of the 2017 21th International Conference on Process Control (PC), Štrbské Pleso, Slovakia, June 6 – 9, 2017, p. 428-433.  
ILKA, Adrian – VESELÝ, Vojtech. Robust LPV-based infinite horizon LQR design. Proceedings of the 2017 21th International Conference on Process Control (PC), Štrbské Pleso, Slovakia, June 6 – 9, 2017, p. 86-91.
- [8] ILKA, Adrian – MCKELVEY, Tomas. Robust discrete-time gain-scheduled guaranteed cost PID controller design. Proceedings of the 2017 21th International Conference on Process Control (PC), Štrbské Pleso, Slovakia, June 6 – 9, 2017, p. 54-59.
- [9] ILKA, Adrian – MCKELVEY, Tomas. Robust Discrete-Time Gain-Scheduled PSD Controller Design. Reglermöte 2016, Göteborg, Sweden, 8-9 Jun, 2016, p. 271-275.
- [10] ILKA, Adrian – VESELÝ, Vojtech. Robust Gain-Scheduled PID Controller Design with Guaranteed Cost. Reglermöte 2016, Göteborg, Sweden, 8-9 Jun, 2016, p. 329-334.
- [11] ILKA, Adrian – VESELÝ, Vojtech – MCKELVEY, Tomas. Robust Gain-Scheduled PSD Controller Design from Educational Perspective. Preprints of the 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education, Bratislava, Slovakia, June 1-3, 2016, p. 354-359.
- [12] ILKA, Viktória – ILKA, Adrian. Legal Cybernetics: An Educational Perspective. Preprints of the 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education, Bratislava, Slovakia, June 1-3, 2016, p. 326-331.

#### ***Journal Publikationer I projektet***

- [13] VESELÝ, Vojtech – ILKA, Adrian. Generalized robust gain-scheduled PID controller design for affine LPV systems with polytopic uncertainty. Systems & Control letters, 2017, vol. 105, p. 6-13.
- [14] ILKA, Adrian – VESELÝ, Vojtech. Robust Switched Control of Nonlinear Continuous-Time Systems. International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO), 2017, vol. 10, no. 3, p. 118-125.
- [15] J. Andric and S. Sarkar. A computational study of the impacts of driving aggressiveness on fuel consumption sensitivity in a parallel HEV. International Journal of Contemporary ENERGY, Vol. 3, No. 2, 2017.

#### ***Examensarbeten handledda av industridoktorand / projektledare***

##### **Pågående**

- [16] Wahlgren O, Optimal speed following algorithm for self-driving vehicles, Control and Mechatronics 2019

##### **Avslutade**

- [17] Bellina A, Design and implementation of **MPC** for engine speed during shifting phases, DTU, Master Thesis 2018
- [18] Stenberg P, Downshift speed control during shift phase, Chalmers, Control and Mechatronics 2018
- [19] Thorsell E, Vehicle speed-profile prediction without spatial information, Chalmers, Computer Science 2018

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har kunnat visa förbrukningsvinster genom att använda sig av teknik som finns i självkörande bilar. Förbrukningsvinsten har varierat beroende på körcykelns utformning, topografin och yttre förhållanden. Som mest har förbrukningsvinster på upp till 10 % kunnat uppmätas för fordonen. En slutsats är att den uppkopplade funktionaliteten bidrar till uppmätt förbrukningsbesparing på från 4 % upp till 10 % och eventuellt även mer baserat på körcykelns utformning.

När det gäller hastighetsprediktion går det att kvalitativt nyttja kunskapen om fordonets tidigare resmönster för att förutse hastighetsprofil. På de analyserade kör cyklerna kunde RMSE på runt 2.4 m/s observeras vid korsvalidering av en mängd rutter, vilka var vid manuell körning och inte för självkörande fordon. Mervärdet av att implementera neurala nätverk och maskininlärning gav i denna studie inte bättre resultat. Träningstiden för de neurala nätverken var också betydligt längre och beteenden som kraftiga hastighetsavvikelse tenderade till att lågpassfiltreras över tid. Detta är ett känt problem hos nätverk för långa tidsserier, varför sofistikerade strukturer istället borde evaluerats (LSTM, Long Short Term Memory). Detta gjordes dock i [19] men inte för spatial data. En fortsättning av forskningen skulle kunna vara att implementera LSTM med spatial data för att se om detta gav bättre resultat för hastighetsprediktionen som användes i projektet.

Simuleringar och mätningar för optimal hastighetsreglering för de analyserade körfallen verkar påvisa hög potential för energiförbrukningsminskningar för både fordon med förbränningsmotor och växellåda samt, för elbilar. Fortsatt forskning är att vidare implementera detta i en bilkontext; utröna om detta är implementerbart i fordon med befintlig kartdata och utvärdera detta i konstanthastighetsreglering. Exjobbet ämnar till att utreda vidare hur detta kan påverkas i ACC reglering då fordonet följer efter andra bilar.

Projektet har bidragit med mervärden till samhället i form av att det har skapat enablers för digitalisering av infrastruktur och fordon på vägen som kan bidra till lägre förbrukning och ökad effektivitet i transportsystemet. Nödvändig fortsatt forskning är att undersöka utvärdering hos fler fordon (testpiloter) under längre tid. Önskemål är att kunna använda en större mängd bilar med systemet implementerat för att identifiera förbrukningsvinsterna ur ett samhällsperspektiv och mäta olika populationer med funktionen aktiverad och inaktiverad. Vidare finns det stora möjligheter för fortsatt forskning kring hur denna teknik kan skapa mervärden för samhället genom att planera laddningstillfällen, ruttval, hastighetsprofil för rena elbilar genom att optimera både energianvändning och peak-effekt på elnätet under laddning. Ruttplanering kopplad till optimal hastighetsreglering implementerad i fordon med adaptiv farthållare med elfordon är något som kräver vidare forskning och provning.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

### 9.1 Volvo Car Corporation

Volvo har tillverkat personbilar sedan 1927. Idag är Volvo Cars ett av de mest välkända och ansedda bilmärkena i världen med 21000 anställda i Sverige och 38000 personer globalt. Volvo Cars majoritetsägare är sedan 2010 kinesiska Zhejiang Geely Holding och var fram till 1999 en del av svenska AB Volvo då företaget såldes till Ford Motor Company.



Volvo Cars är en medlem av UN Global Compact, ett frivilligt initiativ att bidra till FN:s hållbarhetsmål. Volvo Cars genomför också omfattande satsning inom elektrifiering med en första helt elektriskt driven elbil som lanseras på marknaden 2020, samt med företagsmål att hälften av alla bilar som säljs 2025 kommer vara rena elbilar.

**Kontaktperson:** Rickard Arvidsson, [rickard.arvidsson@volvocars.com](mailto:rickard.arvidsson@volvocars.com)

### 9.2 Chalmers Tekniska Högskola

Superkargören William Chalmers (1748–1811) hade skapat en större förmögenhet i Svenska Ostindiska kompaniets handel med bl a Kina, under senare delen av 1700-talet. Influerad av frimurarebrodern Pehr Dubb testamenterade han all sin kvarlåtenskap till Sahlgrenska sjukhuset i Göteborg samt till inrättandet av en industriskola för fattiga barn som lärt sig skriva och läsa. "Chalmersska Slöjdskolan", som invigdes i Göteborg den 5 november 1829, denna blev senare upphovet till dagens tekniska högskola.



**CHALMERS**

Som tekniskt-naturvetenskapligt universitet är Chalmers uppdrag att skapa och sprida kunskap, kompetens och lösningar ger nytta till alla; såväl individ som samhälle. En del i detta är utbildningar som förbereder studenter för framtiden, forskning på hög internationell nivå och en nära, öppen och genomtänkt samverkan med näringsliv och samhälle som gör det möjligt. Som universitet och en erkänt attraktiv samarbetspartner bidrar Chalmers med en verklig skillnad för en hållbar framtid."

**Kontaktpersoner:**

Ingemar Denbratt, [denbratt@chalmers.se](mailto:denbratt@chalmers.se)

Tomas McKelvey, [tomas.mckelvey@chalmers.se](mailto:tomas.mckelvey@chalmers.se)

### 9.3 Andra parter som bidragit till projektet

Actia Nordic AB är ett Stockholm/Linköpings- baserat företag med rötter i Frankrike som har bidragit till projektet genom att leverera mjukvara till en central dator i bilen som överför data och styrsignaler till och från extern infrastruktur via Volvos moln. Actia har en marknadsandel av 60 % för uppkopplade fordon inom tunga fordon och 10 % för lätta fordon. Deras leveranser har haft en stor betydelse för projektets genomförbarhet och leveranserna har haft genomgående hög kvalitet och leveransprecision och deras kompetensbidrag har bidragit till ett lyckat genomförande.



**Kontaktperson:** Anders Gustafsson, [anders.m.gustafsson@actia.se](mailto:anders.m.gustafsson@actia.se)

## 10 Referenser

1. *World Energy Look*. IEA. 2009.
2. *Key World Energy Statistics*. IEA. 2010.
3. **Vicente Franco, Fransisco Posada Sanchez, John German, Peter Mock**. *Real World Exhaust Emissions from modern diesel cars*. Berlin : ICCT, 2014.
4. **Gage, T.B. och Bogdanoff, M.A.** *Low Emission Range Extender for Electric Vehicles*. Detroit : SAE Paper, 1997.
5. **Larsson, Viktor**. *Energy Management Hybrid*. Göteborg : Chalmers Tekniska Högskola, 2011.
6. *Future Engine Control Enabling Environment Friendly Vehicle*. **Xie, H., et al.** 2011-01-06, SAE Paper.
7. *Study of Possible Range Extender Concepts with Respect to Future Emission Limits*. **Ebner, A. Winkler, F., Abart, M., Luz, R., Kirchberger, R., Schmidt, S. Eichlseder, H.** 2010, SAE Paper.
8. **Wiki**. Reinforcement Learning. *Wikipedia*. [Online] den 20 01 2013. [Citat: den 20 01 2013.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Reinforcement\\_learning](http://en.wikipedia.org/wiki/Reinforcement_learning).
9. **Liangfei Zu, Guijun Cao, Jianqiu Li, Fuyuan Yang**. *Equivalent Consumption Minimization Strategies of Series Hybrid City Buses*. Tsinghua University : State Key Lab of Automotive Safety and Energy, 2010.
10. **Antonio Sciarretta, Lino Guzzella**. *Optimal Energy Management Strategies*. u.o. : IEEE, 2007.
11. **Antonio Sciarretta, A. Chasse**. *Supervisory Control of Hybrid Powertrains: An Experimental Benchmark of offline Optimization and Online Energy Management*. u.o. : Control Engineering Practice, 2011.
12. **Viktor Larsson, Bo Egardt, Lars Johannesson**. *Benefit of Route Recognition in Energy Management of Plugin Hybrid Electric Vehicles*. Gothenburg : Proceedings of the 2012 American Control Conference, 2012.
13. **Information, Geospatial**. Geospatial Information and Technology Association. *Geospatial Information and Technology Association*. [Online] den 13 01 2013. <https://www.gita.org/>.
14. *Low Emission Range Extender for Electric Vehicles*. **T.B., Gage och Bogdanaoff, M.A.** 1997, SAE Paper.