
Slutrapport: Förstudie inom Energieffektivisering med Kooperativa system inom Transport

Final report: Pre-study within Energy Efficient Cooperative Transportation System

Cristofer Englund, Kristoffer Lidström, and Maria Nilsson

Viktorias Institute
Lindholmspiren 3A
S-417 56 Gothenburg, Sweden
{cristofer.englund, kristoffer.lidstrom, maria.nilsson}@viktorias.se

Abstract. Denna förstudie syftar till att utvärdera energibesparingspotentialen i simuleringsmodeller för kooperativa trafiksystem. Projektet tar fram en specifik simuleringsmodell för ett utsnitt av en stadsmiljö i Göteborg där energibesparingspotentialen för en kooperativ applikation utvärderas under två olika fordonsflödesnivåer som baseras på flödesmätningar gjorda i det aktuella utsnittet. Simulatorramverket VSimRTI används för att kombinera trafik- och kommunikationssimulatorer som gör det möjligt att simulera kooperativa trafiksystem. Simuleringsresultaten visar på stor energibesparingspotential för det valda utsnittet. Resultaten indikerar upp till 11% lägre utsläpp när majoriteten (80%) av fordonen använder en kooperativ hastighetsharmoniseringsfunktion. Redan vid låg penetration (5%) uppstår vinster för de utrustade fordonen i bl.a. lägre utsläpp. Förutom tekniska resultat har intressanta *free rider* effekter identifierats bland fordonen i simuleringen dvs. fordon utan kooperativ applikation får kortare restid och högre medelhastighet, medan miljövinsten uteblir (jämfört med fordon med applikationen). Dessa insikter kan vara avgörande för en framgångsrik implementering av kooperativ ITS i exempelvis Göteborg.

Abstract. (Eng) This pre-study aims at evaluating the energy savings potential in simulation models for cooperative traffic systems. The project develops an application being evaluated in a small part of the city of Gothenburg where the application's energy savings potential during two different traffic intensity scenarios, based on flow measurements within the intended part of the traffic system, is evaluated. The simulation framework VSimRTI was used to combine traffic and communication simulators enabling simulation of a cooperative traffic system. The results show great energy saving potential. The results indicate up to 11% lower emissions as the majority (80%) of the vehicles use the cooperative speed harmonization application. Already at low penetration (5%) the application reduces for example the emissions for the equipped vehicles. Beside technical results we have identified a *free rider* situation among the vehicles in the simulation. Vehicles without the cooperative application achieves shorter travel time and higher mean velocity whereas the

environmental gain is absent. These insights could be crucial for a successful implementation of cooperative ITS in for example Gothenburg.

1 Bakgrund

Intelligenta Transport System (ITS) och särskilt kooperativa transportsystem har hög potential att verka för att målen kring de globala utmaningarna, energi, miljö, säkerhet och trängsel uppfylls [1, 2].

Kooperativa system bygger på att uppkopplade fordon, infrastruktur och mobila enheter samverkar och delar information för att på så sätt effektivisera och förbättra säkerheten, framkomligheten och miljöpåverkan i transportnätet. Detta kan bli avgörande för den framtida vägtrafiken eftersom det idag inte finns plats eller ekonomi för ny- eller ombyggnationer av vägar. Vägar blir mer och mer belastade, speciellt i storstadsregioner, med trafikstockningar som konsekvens (med negativ påverkan på både ekonomi- och miljö). Det behövs nya innovativa lösningar som gör utnyttjandet av det existerande vägnätet mer effektivt och speciellt inom ITS finns det en outnyttjad potential.

Till exempel hävdar TNO [3] att trängsel skulle kunna minska med 5-15% genom användandet av kooperativa funktioner som intelligenta trafik korsningar och ”varning för hinder på vägen”, och utsläppen (CO_2) skulle kunna minska med 10-20% genom funktioner som kolonnkörning (*platooning*) och eco-assistans.

En frågeställning som ofta lyfts är antalet fordon som behövs för att kooperativa applikationer skall fungera och för att de ska få önskad effekt. De uppskattningar som gjorts kring kooperativa systems potential att minska energiförbrukningen inom transportområdet är oftast av generell art, det är en öppen fråga hur olika regionala och lokala skillnader i trafiksystemet påverkar en viss kooperativ funktions prestanda. Att exempelvis en kooperativ farthållarfunktion förbättrar trafikflödet i Barcelona innebär nödvändigtvis inte att den gör det i Stockholm, Göteborg eller Malmö, i värsta fall kan flödet försämrats.

Denna rapport beskriver hur trafik och kommunikationsmodeller kan användas för att genom simuleringar öka förståelsen för kooperativa systems energibesparingspotential i ett utsnitt i trafiksystemet i Göteborg.

En öppen simulatorplattform för kooperativa system VSimRTI [4] har använts för att studera effekter i trafiksystemet när fordon har möjlighet att koordinera sig med hjälp av kommunikation.

1.1 Problembeskrivning

Området kooperativa system har upplevt en renässans de senaste åren till följd av att kostnadsbarriärerna kring fordonsintegrerade informations- och kommunikationsteknologier (IKT) brutits ned. Standardisering av frekvensband för fordon-till-fordon och fordon-till-infrastruktur kommunikation i USA, Europa och Asien samt möjligheten att återutnyttja kommunikationsteknologi som redan finns i massproduktion (ex. IEEE 802.11) är en sådan drivande faktor. Samtidigt är

det tydligt att trenden pekar mot en allt högre trafikintensitet samt att traditionella metoder för att hantera trafikökningen, exempelvis genom utbyggnad av vägnätet, i många fall inte är möjliga eller försvarliga ur kostnadssynpunkt.

Genom att de grundläggande tekniska systemen har utvecklats och gjorts tillgängliga har forskningen kring effekterna av introduktion av kooperativa trafiksystem ökat. Demonstratorer och experiment kring kooperativa funktioner är dock på grund av kostnadsskäl ofta begränsade till studier av ett fåtal fordon och ger därför en begränsad inblick i potentiella effekter på trafiksystemnivå. Ett fåtal omfattande studier har påbörjats internationellt för att utvärdera större flottor av kooperativa fordon i så kallade "field-operational tests" (FOT). Ett av de större FOT-projekten är tyska simTD som representerar en storskalig satsning på testning av kooperativa system men där testflottan ändock är begränsad till hundratalet fordon.

För utvärdering av trafikeffekter i större skala (tusentals kooperativa fordon) är därför simulering den mest realistiska metodiken. Simulering ger förutom möjligheten att utvärdera system i stor skala ett flertal andra fördelar såsom reproducerbarhet och observerbarhet. Simulering är redan idag ett välanvänt verktyg för att planera och utvärdera förändringar i trafiksystemet. Två huvudspår existerar, mikrosimulering där varje enskilt fordon modelleras och simuleras individuellt samt makrosimulering där flödesstatistik per vägsegment modelleras. För att kunna öka dynamiken i simuleringar kan mikro och makrosimulatorer kombineras i något som kallas mesosimulering. Valet av abstraktionsnivå styrs av vilka fenomen som studeras samt av tillgång till beräkningskapacitet.

1.2 Trafiksimulatorer

Det europeiska FP7-projektet iTetris har utvecklat ett ramverk som integrerar simulatorerna NS-3 [5] (nätverkssimulator) och SUMO [6] (trafiksimulator) för att kunna simulera ett brett spektrum av kooperativa trafikfunktioner. Ramverket bygger på öppen källkod (*open source*) och har därför en stor potential att användas och vidareutvecklas till gagn för forskarkollektivet.

Även Daimler Center of Automotive Information Technology Innovations tillsammans med Technische Universität Berlin och Fraunhofer FOCUS har utvecklat en simulator VSimRTI [4] som kombinerar SUMO och Jist/SWANS [7] (nätverkssimulator). Detta ramverk är också fritt tillgängligt för forskarkollektivet men endast de ingående simulatorerna, SUMO och Jist/SWANS bygger på öppen källkod. Användandet av VSimRTI är fritt men kräver registrering hos Fraunhofer FOCUS.

1.3 Mål

Det övergripande syftet med detta förstudieprojekt är att utvärdera simuleringsmodeller för kooperativa funktioner i trafiken och därigenom kunna visa på kooperativa systems energibesparingspotential under lokala svenska trafikförhållanden.

Genom att implementera en kooperativ applikation och göra simuleringar byggs kompetens kring hur simulering går till, vilka utmaningar som finns och vilka begränsningar verktygen har.

Genom dessa mål kan forskningen kring kooperativa trafiksystem förstärkas och kompetens kring ett nytt verktyg för att utvärdera applikationer och dess genomslagskraft på ett kostnadseffektivt sätt byggs upp.

2 Genomförande

Projektet har genomförts av Viktorias institutet inom gruppen kooperativa system. Projektledare är Maria Nilsson som är ansvarig för att projektmålen uppfylls. Cristofer Englund och Kristoffer Lidström har tillsammans genomfört projektets arbetspaket. Projektets referensgrupp har bestått av Maria Nilsson och Mats Williander som löpande fått information om progression och har även varit kreativa i utvecklingen av den kooperativa applikation som demonstrerats. Arbetet omfattar följande arbetspaket (AP):

- AP1:** Inventering av existerande simulatorplattformar och modeller i Stockholm/Göteborg/Malmö genom kontakt med bl.a. trafikkontor. Detta arbetspaket kommer att resultera i en sammanställning av befintliga plattformar samt de olika användningsområden i de olika organisationerna.
- AP2:** Identifiera ett avgränsat nytt område för kooperativa system, en kooperativ funktion, där simulering av dess energibesparande potential krävs. Detta arbetspaket kommer att resultera i identifiering av kooperativt scenario/applikation och trafikmiljö (utsnitt) i Stockholm, Göteborg eller Malmö, samt en inventering över trafikmiljöer som är kandidater för modellering m.a.p. tillgång till uppmätt flödesinformation.
- AP3:** Uppbyggnad av trafiksimuleringsmodell. Detta arbetspaket kommer att resultera i en SUMO-modellering (en del av iTETRIS och VSimRTI) av vägnät, infrastruktur och flöden i vald trafikmiljö, en validering av modell m.h.a. uppmätta flöden samt en utvärdering av modelleringsprocessen.
- AP4:** Implementation av kooperativ applikation i simulatormiljö och simulering. Detta arbetspaket kommer att resultera i en utvärdering av den kooperativa funktionens energibesparingspotential samt styrkor, svagheter och förbättringsmöjligheter i simulatorplattformen och modelleringsarbetet.

3 Resultat

3.1 Inventering av existerande simulatorplattformar

I Sverige finns ett forum (<http://www.trafikanalysforum.se/>) för användare och beställare av trafiksimulering, modellering, kapacitetsstudier och framkomlighet. Webbplatsen innehåller aktuell information om exempelvis programvaror för simulering och trafikanalys. Även information om konferenser, seminarium samt

relaterade projekt. Även handledningar och manualer finns tillgängliga för nerladdning på forumet. Projektet Trafikanalysforum.se är ett samarbete mellan Trafikverket, Stockholms stad och SL.

Trafikkontoren i Stockholm, Göteborg och Malmö använder till stora delar samma mjukvara för sina simulatorstudier.

- Mikrosimulering:
 - VISSIM¹
 - AIMSUN²
- Makrosimulering:
 - VISUM¹
 - Sampers/Emme3³
- Mesosimulering:
 - CONTRAM⁴
 - Mezzo⁵
 - Dymameq⁶
 - Avenue⁷

Efter att ha varit i kontakt med Trafikkontoren i Stockholm, Göteborg och Malmö framkom att användningsområdet för trafiksimulering är huvudsakligen underlag för att ta beslut kring planering och projektering av ny och ombyggnationer — ofta när flera transportslag är involverade. Förutom att kunna beräkna/simulera flöden på planerade vägar uppskattas också möjligheten att visualisera resultaten för att på så sätt kunna jämföra olika lösningar. Resultaten från verktygen kan även användas för underlag för buller och luftkvalitetsmätningar. Under ett seminarium den 11 juni 2012 på SAFER⁸ som handlade om Trafikmodellering och Simulering berättade bl.a. Trafikkontoret i Göteborg om sin verksamhet och hur de använder trafiksimulatorer i sin verksamhet.

3.2 Identifiering av kooperativ applikation

Som målet anger skall energibesparingspotentialen för en kooperativ applikation utvärderas. En applikation som vi kallar *Cooperative Speed Harmonization* (Kooperativ hastighetsharmonisering) har därför implementerats inom ramverket VSimRTI [4]. Fordon kommunicerar för att kunna röra sig i vågor mot korsningen som identifierats som en vältrafikerad och intressant plats att testa en kooperativ applikation på i Göteborg — Ånäsmotet där E20 ansluter E6 från öster, Fig 1. Fig. 2 illustrerar hur applikationen grupperar fordon och låter dem

¹ <http://www.ptv-vision.com/>

² <http://www.aimsun.com/>

³ <http://www.inro.ca/emme>

⁴ <http://www.contram.com/>

⁵ http://www.mezzo_dev.blogspot.com/

⁶ <http://www.inro.ca/dymameq/>

⁷ http://www.citilabs.com/cube_avenue.html

⁸ <http://www.chalmers.se/safer/>

röra sig som vågor mot korsningen. Genom att vågorna med fordonen anländer till korsningen i ofas från de två vägarna (vågorna på den ena vägen är förskjutet en halv våglängd) ges möjlighet för fordonen att manövrera bättre i och efter korsningen. Den kooperativa applikationen låter en virtuell våg röra sig mot korsningen och genom kooperativ information förmedlas position och hastighet för vägen till fordonen som närmar sig korsningen. Applikationen som genererar vågorna körs centralt och skickar information om vågens hastighet och position till de kooperativa fordonen. De kooperativa fordonen styr med hjälp av den kooperativa informationen sin hastighet så att det ska kunna ansluta vägen och säkerställer därmed att det anländer på rätt sätt.

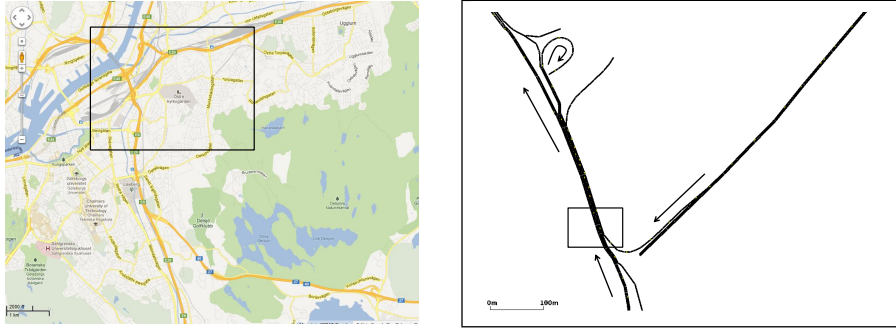


Fig. 1. *Vänster:* Karta över det simulerade området. *Höger:* Förstorad vy över korsningen som identifierats som högt trafikerad och därför intressant — Ånäsmotet. En förstoring av korsningen visas i Fig. 2 där applikationens funktion illustreras.

Hastigheten ett fordon ska köra för att följa med en våg beräknas enligt följande:

$$d_{long,t} = (long_t - long_{intersection}) * l_{long} \quad (1)$$

$$d_{lat,t} = (lat_t - lat_{intersection}) * l_{lat} \quad (2)$$

$$d_t = \sqrt{d_{long,t}^2 + d_{lat,t}^2} \quad (3)$$

där $long_t$ och lat_t är fordonets nuvarande position, l_{long} , l_{lat} är längden för respektive grad, $long_{intersection}$, $lat_{intersection}$ är positionen för korsningen och d_t är avståndet från korsningen till fordonet vid tidpunkten t .

Avståndet, $d_{narmsta}$, till närmsta våg beräknas enligt:

$$d_w = l_w * \lfloor d_t / l_w \rfloor - v_w * mod(t, l_w / v_w) \quad (4)$$

$$d_{narmsta} = d_t - d_w \quad (5)$$

där d_w är längden på antalet hela vågor fram till korsningen, l_w är våglängden d_t är nuvarande avstånd till korsningen och v_w är vågens hastighet.

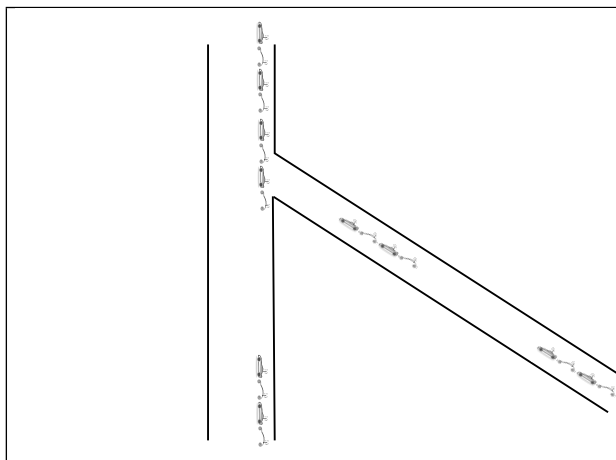


Fig. 2. Illustration över hur applikationen grupperar fordon.

För att fordonen ska komma i ofas läggs en halv våglängd till avståndet för fordon som kommer från E20, $w_{lucka} = w_{lucka} + l_w/2$

$$fel_t = \begin{cases} d_t - d_w, & \text{om avståndet är närmre till vägen framför} \\ d_t - d_w - l_w, & \text{annars} \end{cases} \quad (6)$$

Slutligen beräknas hastigeten som:

$$v_{fordon} = fel_t * P + \sum_0^T fel_t * I * \Delta fel_t * D \quad (7)$$

där T, P, I och D är konstanter. Figur 3 illustrerar vågorna och hur bilar ansluter till vägen i sin färd mot korsningen. Vägens läng är avståndet mellan två heldragna cirklar. Den streckad cirkeln indikerar fordon som kommer från E20, där fordonen förskjuts en halv våglängd, avstånden d_t samt d_w som beräknas i Ekvation 3 och 4 är utritade i figuren.

Fordonen anpassar sin hastighet till vågorna som har en bestämd våglängd l_w . Vågorna på de båda vägarna är förskjutna en halv våglängd så att fordonen från de båda vägarna ska anlända i ofas. När fordonen anpassat sig till vågorna kan de som ett blixtlås blandas på vägen för att efter korsningen få köra fritt enligt hastighetsbegränsningarna. Syftet med detta är att harmonisera flödet, att minimera antalet accelerationer och decelerationer i korsningen och på så vis minska miljöpåverkan och energiförbrukningen.

3.3 Uppbyggnad av trafiksimuleringsmodell

Det mest mödosamma med trafiksimulering är att skapa en modell över det område som skall simuleras. Till vår hjälp har vi använt Google Maps (maps.google.com),

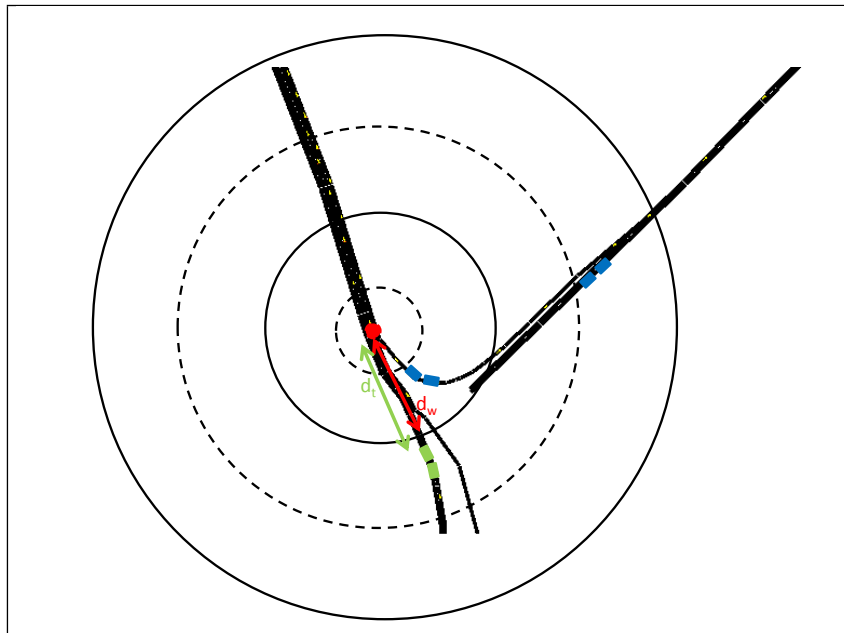


Fig. 3. Illustration över vägorna som fordonen följer mot korsningen

Open Street Map (OSM) (<http://wiki.openstreetmap.org/>), samt egna foton över vägen. OSM är ett öppet geografiskt kartsystem som byggts upp och underhålls av användare, därmed är kvaliteten på innehållet i OSM varierande.

Trafiksimulatorn (SUMO) kan använda OSM kartor men kvaliteten på OSM kartorna var inte tillräcklig för det utsnitt som skulle simuleras och därför har OSM kartan fått förbättrats med bl.a. rätt antal körfält och rätt hastighetsbegränsningar. För att trafiksimulatorn skulle kunna hantera OSM kartorna fick även korsningar modifiera samt på- och avfarter så att trafiksimulatormodellen skulle efterlikna verkligheten i så stor utsträckning som möjligt.

För att skapa trafik har data från trafikverkets detektorer från de aktuella vägarna använts. Genom att studera flödet i dessa filer har liknande flöde genererats till trafiksimulatormodellen.

3.4 Implementation av kooperativ applikation i simulatormiljö och simulering

På grund av tekniska problem med iTETRIS beslutades att förstudien skulle byta simulatormiljö till VSimRTI. En bugg i iTETRIS-mjukvaran gjorde att den inte kunde köra egenutvecklade applikationer. Förseningar i uppgradering av iTETRIS-mjukvaran bidrog till att VSimRTI valdes, ett klokt val visade det sig eftersom iTETRIS-mjukvaran i skrivande stund ännu inte uppdaterats.

VSimRTI är uppbyggt av en styrmjukvara som kopplar samman SUMO, Jist/SWANS samt den kooperativa applikationen som körs i fordonen [4]. VSimRTI koordinerar fordonen baserat på den information som kommuniceras mellan de olika simulatorerna. För att kunna utvärdera applikationen är inte bara informationen som kommuniceras viktig, utan även tiden är viktig för att kunna veta var och när alla fordon befinner sig på en specifik punkt. I loggfiler sparas fordonens positioner och tiden då de befann sig på platsen. Även information om fordonens utsläpp sparas i loggfilen. För att beräkna utsläpp använder SUMO en modell från *HBEFA database* (<http://www.hbefa.net/e/index.html>).

Flera buggar hittades i VSimRTI under utvecklingen av den kooperativa hastighetsharmoniseringsfunktionen och utvecklingen har skett parallellt med att utvecklarna av VSimRTI avhjälpt de fel och brister som hittats. Även den kooperativa applikationen hade buggar inledningsvis men när problemen åtgärdats fungerade applikationen som tänkt. Dessa problem visar på vikten av att använda ett system/ramverk som är under utveckling och där utvecklarna tar sig tid att åtgärda problem som användarna upptäcker. Några av buggarna var av sådan art att hade inte buggarna åtgärdats hade vi inte kunnat slutföra projektet som vi tänkt.

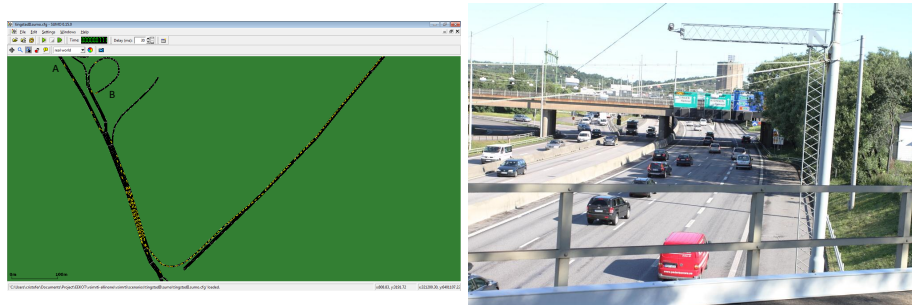


Fig. 4. *Vänster:* Simulation of Urban MObility (SUMO) simulering av Ånäsmotet där E20 ansluter E6. *Höger:* Fotografi över påfarten från E20. De tre vänsta filerna är E6 och den högra filen är påfarten från E20. Längre bort ser man avfarten till E45.

Simuleringen i SUMO visar tydligt de problem som uppstår när fordon från E20 ansluter E6. Fordonen på E20 har svårt att komma ut på E6, och efter korsningen när fordonen ska välja fil för att komma a) ner i Tingstadstunneln (A) och b) komma av på avfarten (B) uppstår också köer, se Fig 4. Dessvärre ger inte VSimRTI någon möjlighet att visualisera resultatet av den kooperativa applikationen i SUMO.

Val av parametrar för applikationen Applikationen innehåller flera parametrar som användaren kan justera för att påverka funktionaliteten. Längden på

vågen, l_w , hastighet på vägen v_w , tiden för integrering av felet i PID regulatorn, T , samt PID, värdena. Initiala experiment visade att $T = 1$, $P = 2$, $I = 1$ och $D = 0$ fungerade bra. Längden och hastigheten på vägen varierades i experimenten, $l_w = 800\text{m}$, 400m och 200m har testats samt $v_w = 15\text{m/s}$, 10m/s och 5m/s . Även antalet fordon som hade den kooperativa funktionaliteten varierades och resultat från 100%, 80%, 60%, 40%, 20% och 5% jämförs med hur trafiken ser ut utan applikationen i följande kapitel. Om inget annat anges har intensiteten av fordon som använts varit ca 150 fordon/minut.

Utvärdering För att studera effekterna av den kooperativa applikationen har vi valt att studera tre olika mått: utsläpp (CO_2/km), hastighet (m/s) och färdtid (s). I Tabell 1 presenteras medelvärde för olika penetration av kooperativa fordon.

Tabell 1. Medelhastighet, Restid och Utsläpp (CO_2) samt respektive förbättring (för alla fordon i simuleringen) jämfört med *utan kooperativ applikation* (0%) för olika Antal fordon (%) med kooperativa applikation.

Antal fordon (%)	Medelhastighet		Restid		Utsläpp	
	(m/s)	Ökning(%)	(s)	Minskning(%)	(g/km)	Minskning(%)
100	14.0	8.0	346.7	10.6	137.2	11
80	14.7	13.8	325.6	16.1	139.4	10
60	13.8	6.9	354.8	8.6	145.2	6
40	14.0	7.7	352.2	9.2	147.2	5
20	13.8	6.5	361.0	7.0	150.5	3
5	13.0	0.7	386.9	0.3	153.8	0
0	13.0	0.0	388.1	0.0	154.4	0

Tid-Avståndsdiagram För att visualisera hur fordonen färdas i vågor visar vi sträckan som varje fordon färdats under simuleringen, Fig. 5. När applikationen är avstängd kör alla fordon enligt hastighetsbegränsningen. Varje linje i diagrammet representerar ett fordon. När det inte är några köer är hastigheten (sträckan(y-axel)/tiden/(x-axel)) konstant - se sträckan 3-5 km. När däremot köerna bildas ser man att hastigheten sjunker, färdad sträcka sjunker per tidsenhet - ju brantare linje desto högre hastighet, och vice versa. Korsningen är placerad vid 6 km och applikationen aktiveras 1,5 km före korsningen. Det är betydligt mer kö (fler horisontella fordonsspår) i det diagrammet som visar fordonen där applikationen är inaktiverad, man ser även att tiden för fordonen att komma fram är kortare när applikationen är aktiverad. På E6 blir det färre köer när applikationen är aktiverad och på E20 bildas köer när fordonen som från början kör i två filer går samman till en fil för att kunna komma ut på E6. Det bildas köer även med applikationen aktiverad på E20, men de är ca 500 meter kortare. I exemplet försvinner inte köerna helt utan försjuts i tiden och applikations- och modellparametrarna kan behöva justeras för att helt ta bort köerna.

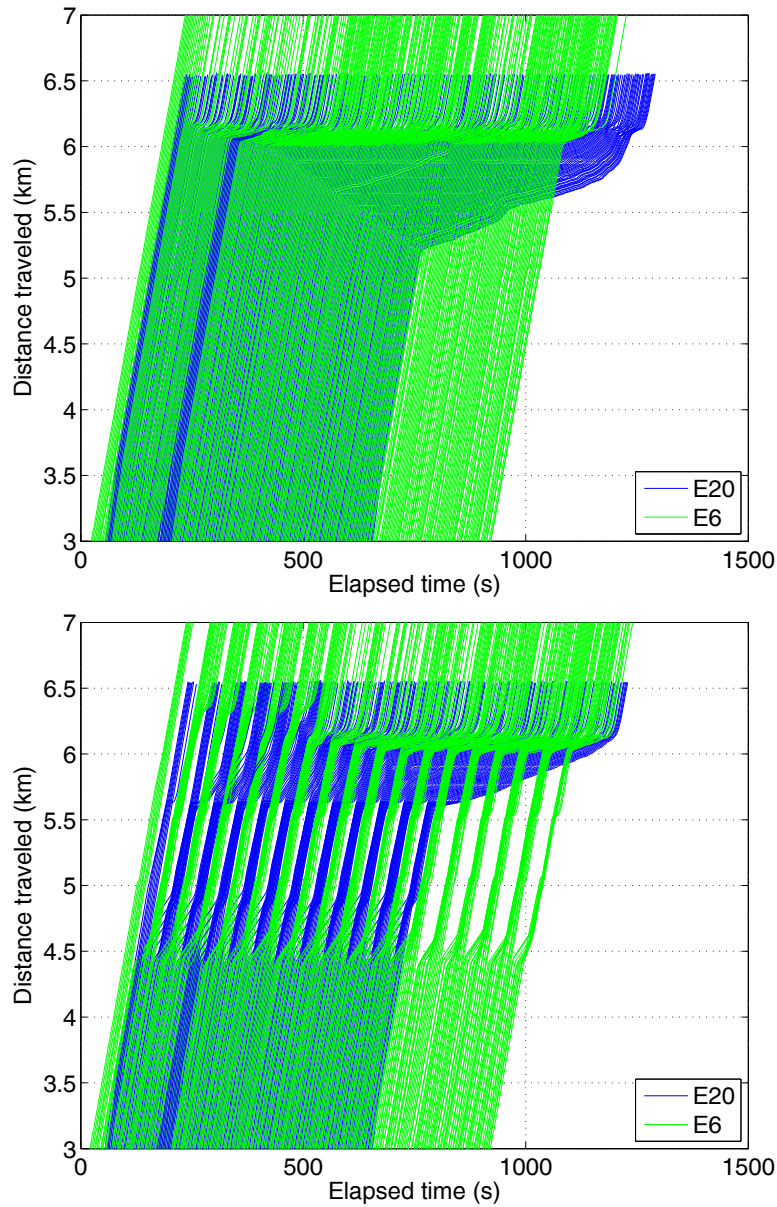


Fig. 5. Tid-avstånds-diagram av trafik utan (övre) och med (undre) reglerd trafik med kooperativ hastighetsharmonisering.

Koldioxidutsläpp Tabell 1 visar hur CO_2 utsläppen minskar med ökad penetrationsgrad av fordon med kooperativ applikation. Fig. 6 visar hur utsläppen fördelas för de olika scenarierna. Tabellen visar att antalet fordon som släpper ut

lite CO_2 är fler när applikationen används än för när applikationen är avstängd. Ju högre penetrationsgrad desto mer är fördelningen förskjuten till vänster.

För att omvandla koldioxidutsläppsminskningen till energi görs följande antagande: I simuleringsmodellen kör varje fordon 7 km och maximala besparingen i koldioxid är 11%. Vidare antas även att bränsleförbrukningen för fordonen i exemplet är 11% lägre och om dessutom antagandet att varje fordon förbrukar 0.8l/mil blir bränslebesparingen (om energiinnehållet är 9 kWh/l): $0.7\text{mil} \times 0.8\text{l/mil} \times 11\% \times 9\text{kWh/l} \approx 500\text{W}$ per fordon. Det kör cirka 60000 fordon genom den aktuella korsningen varje dygn, så även en till synes liten besparing per fordon ger stor effekt på hela trafiksystemet.

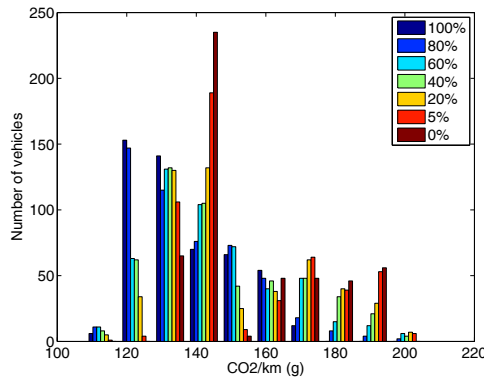


Fig. 6. Histogram över antal fordon och ackumulerad mängd CO_2 -utsläpp.

Tjänar alla på kooperativa system? Medelvärdena för restid, utsläpp och hastighet för fordonen med och utan kooperativ applikation beräknades separat, se Tabell 2. I alla fall blir utsläppen lägre för de fordon som använder den kooperativa applikationen. Hastigheten och restiden är endast marginellt bättre och i ett fall när 40% av fordonen är kooperativa, bli hastigheten och restiden marginellt sämre för de kooperativa fordonen jämfört med de utan kooperativ funktionalitet.

För att vidare undersöka hur fordon beter sig i trafiksystemet gjordes en simulering med lägre intensitet, ca 100 fordon/minut jämfört med ca 150 fordon/minut i de tidigare experimenten. Vid lägre intensitet av fordon finns det en miljömässig vinst för fordon med den kooperativa applikationen, medans för icke kooperativa fordon blir utsläppen högre, se Tabell 3. Fordon utan applikation har generellt högre hastighet och kommer även fram snabbare än de med applikation.

Tabell 2. Jämförelse av Restid, Utsläpp och Hastighet för fordon med och utan kooperativ applikation.

Antal fordon (%)	Hastighet (m/s)		Restid (s)		Utsläpp (CO_2)	
	Med	Utan	Med	Utan	Med	Utan
80	14.8	14.7	324	331	136	155
60	13.9	13.8	353	358	138	155
40	13.9	14.0	353	352	139	154
20	13.9	13.8	346	365	137	154
5	13.6	13.0	365	388	141	155

Tabell 3. Jämförelse av Restid, Utsläpp och Hastighet för fordon med och utan kooperativ applikation för ca 100 fordon/minut genom korsningen.

Antal fordon (%)	Hastighet (m/s)		Restid (s)		Utsläpp (CO_2)	
	Med	Utan	Med	Utan	Med	Utan
100	16.0	-	294	-	128	-
80	14.6	15.8	326	303	132	154
60	15.3	15.8	309	304	132	154
40	15.3	16.0	309	298	131	153
20	14.9	15.4	317	312	131	153
5	14.9	15.2	327	315	134	152
0	-	16.4	-	292	-	150

4 Slutsatser och diskussion

Denna förstudie har utforskat simuleringsmodeller för att kunna utvärdera energibesparingspotentialen för kooperativa system vid en högt belastad vägsträcka i Göteborg, Ånäsmotet. Simuleringsramverket VSimRTI har använts eftersom iTETRIS, som först skulle använts, inte fungerade tillfredställande.

Projektet har använt en kooperativ hastighetsharmoniseringsfunktion som går ut på att fordon som närmar sig en korsning från två håll färdas i vågor för att säkerställa att fordonen anländer i ofas, och på så vis ges möjlighet att kunna manövrera bättre i och efter korsningen, för att demonstrera ett kooperativt trafiksystem med kooperativa fordon.

Resultaten visar på ca 5% lägre utsläpp vid 40% penetration och ca 10% lägre utsläpp vid 80% penetration av kooperativa fordon jämfört med inga kooperativa fordon. Vidare visar resultaten, med några antaganden, att varje fordon sparar ca 500W genom att använda kooperativ teknik när de kör genom korsningen.

Simuleringsresultaten visar att utifrån ett miljöperspektiv är det alltid fördelaktigt att använda den kooperativa applikationen. Dessutom tjänar även de som inte använder applikationen på att vissa använder kooperativ teknik genom generellt kortare restider och högre medelhastighet. I ett fall, när 40% av fordonen är kooperativa och flödet är ca 150 fordon/minut, bli hastigheten och restiden marginellt sämre för de kooperativa fordonen jämfört med de utan kooperativ funktionalitet. Vinsten för fordon utan applikation blir tydligare vid lägre fordonsintensitet. En fråga som vi ställer oss: I vilken omfattning finns det

fordon utan applikation som tjänar på (*free riders*) att andra kör miljövänligt och hur ska dessa fordon hanteras i en verklig trafikmiljö?

Simuleringsverktyg kan ge värdefull information kring analys av just sådana situationer och scenarion som nämns ovan. Genom att justera modellparametrar, skapa noggrannare loggfunktioner som gör det möjligt att få reda på om de kooperativa fordonen blir omkörda av *free riders*, och göra fler simuleringar kan säkrare och mer detaljerade simuleringsresultat beräknas, men detta är något som detta projekt inte haft tid att utforska.

När man vill implementera en ITS applikation kan en simuleringsmodell användas för att designa applikationen som koordinerar fordonen (fordonen kan styras så att de lägger sig i bredd på en flerfilig väg för att minimera antalet *free riders*, modellen kan även användas för att beräkna övergripande miljöpåverkan (t.ex. koldioxidutsläpp) eller exempelvis användas för policyutformning (kan man bestraffa fordon som inte använder kooperativa applikationer med vägtullar eller andra straffavgifter?). Detta är frågeställningar som inte ryms inom ramarna för detta projekt men som vi identifierat som spännande områden som simuleringar av denna typ har potential att ge svar på.

References

1. Kulmala, R.: Co-operative systems deployment impact assesment (CODIA) (2008)
2. Kulmala, R., Rämä, P., Sihvola, N.: Safety impacts of cooperative systems. In: Proceedings of the 21st ICTCT workshop 2008. (2008)
3. Klunder, G.A., Malone, K., Mak, J., Wilmink, L.R., Schirokoff, A., Sihvola, N., Holmén, C., Berger, A., Lange, R.d., Roeterdink, W., Kosmatopoulos, E.: Impact of information and communication technologies on energy efficiency in road transport. Tno , netherlands, research reports, TNO , Netherlands (2009)
4. Schünemann, B.: V2X simulation runtime infrastructure VSimRTI: An assessment tool to design smart traffic management systems. Computer Networks **55** (2011) 3189 – 3198
5. Riley, G.F., Henderson, T.R.: The ns-3 network simulator. In Wehrle, K., Günes, M., Gross, J., eds.: Modeling and Tools for Network Simulation. Springer Berlin Heidelberg (2010) 15–34
6. Krajzewicz, D.: Traffic simulation with SUMO – simulation of urban mobility. In Barceló, J., Hillier, F.S., Price, C.C., eds.: Fundamentals of Traffic Simulation. Volume 145 of International Series in Operations Research & Management Science. Springer New York (2010) 269–293
7. Barr, R., Haas, Z.J., van Renesse, R.: 19. In: Scalable Wireless Ad hoc Network Simulation. CRC Press (2005) 297–311