

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Uppföljning av transportrelaterad energiåtgång på nätverksnivå baserat på alternativ sensordata	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Network-wide monitoring of road traffic induced energy consumption based on alternative traffic sensor data	
Universitet/högskola/företag Linköpings universitet (LiU)	Avdelning/institution Kommunikations- och transportsystem / Institutionen för teknik och naturvetenskap
Adress Campus Norrköping, 601 74 Norrköping	
Namn på projektledare Clas Rydergren (LiU)	
Namn på ev övriga projektdeltagare Nikolaos Tsanakas (LiU), Ian Marsh (RISE), David Gundlegård (LiU), Henrik Abrahamsson (RISE), Pei-Lun Hsu (RISE), Joakim Ekström (LiU), Johan Olstam (LiU), Nils Breyer (LiU), Tomas Julner (Trafikverket)	
Nyckelord: 5-7 st Energiåtgång, vägtransporter, uppföljning, trängseffekter, estimering resefterfrågan	

Förord

Detta projekt har finansierats av Energimyndigheten. Vi vill särskilt tacka personer på Trafikverket för diskussioner runt de modeller som tagits fram, VTI för hjälp med HBEFA och Ramböll Norrköping för diskussioner kring de INRIX-data som vi använder som indata till projektet.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning	3
Genomförande	5
Resultat	14
Diskussion.....	15
Publikationslista.....	16
Referenser, källor.....	18
Bilagor	19

Sammanfattning

Vägtrafiken utgör huvuddelen av transportsektorns energianvändning. Att kunna analysera och följa upp energianvändningen från vägtrafiken över tid är därför viktigt. Vägtransportsystemet påverkas av fordonsteknikens utveckling, där en av de stora förändringar som vi i dagsläget kan förutse är den ökade användningen av elfordon, både för resor och kommersiell trafik. För vägbundna resor är energieffektiviteten kopplad till typen av transport, till exempel privatbil eller kollektivtrafik och effektiviteten hos fordonets motor och i vilken miljö som resorna görs. Tekniker för att uppskatta energianvändning, totala mängden trafikarbete och trafikrelaterade utsläpp baseras normalt på extrapolering av trafikdata från sensorer eller på utdata från trafikplaneringsmodeller. Baserat på utdata från dessa processer så kan till exempel HBEFA-ramverket för energi- och utsläppsuppskattning användas för estimering av energiåtgång utifrån trafiktillstånd.

I detta projekt har vi tittat på möjligheterna med att förbättra teknikerna för denna typ av estimat för att förbättra detaljrikedomen genom att nyttja en större mängd observationer från trafiknätet. Sensordata som används är data från fordon utrustade med GPS. Dessa GPS-data ger detaljerade data om fordons hastighet över rum och tid. Flödet är dock ofta inte möjligt att få från denna typ av data, då det skulle kräva att alla fordon tillhandahåller GPS-data. I praktiken är GPS-data tillgängligt från endast en liten andel av det totala antalet fordon. I projektet har vi kombinerat sensordatakällor i form restidsdata från GPS-utrustade fordon för att kunna ge mer detaljerade, och möjligen mer exakta, uppskattningar av energiåtgång från vägtrafiken. I en första del har vi med hjälp av maskininlärning tittat på hur god koppling som kan hittas mellan uppmätta restider och uppmätta trafikflöden. Motivet var att skapa tekniker för att ta fram trafikflödet på ett specifikt vägsegment bara utifrån den typ av restidsdata som kan upphandlas kommersiellt. Denna teknik skiljer sig från det traditionella sättet som baseras på statiska hastighets-flödessamband som kalibreras för varje situation. I en andra del har vi tittat på hur vi kan nyttja nätverksstrukturen i vägnätet. Baserat på data från enstaka stationära trafikmätningssensorer och de nätverksövergripande restider som vi har tillgängliga har vi skapat 1) en teknik för att estimeras trafikens beteende i nätverket, och 2) baserat på denna teknik, skapat ett ramverk för att förbättra dagens processer för att kalibrera resefterfrågematriser.

Den i projektet utvecklade tekniken gör det möjligt att ge uppskattningar av energianvändningen från vägtransporter. Uppskattningar av energiförbrukning med denna teknik ger förbättringar i detaljnivån jämfört med traditionella tekniker och kan ge mer exakta uppskattningar än de traditionella teknikerna. Nyckelkonceptet för att uppnå detta är användningen av storskaliga restidsdata som input, och den beräkningsprocess som tagits fram i projektet.

Summary

Travel and transport on the road network use large amounts of energy. The road transport system is affected by the development of vehicle technology, where one of the major changes that we can currently anticipate is the increased use of electric vehicles, both for travel and commercial traffic. For road-bound travel, energy efficiency is linked to the type of transport, e.g. private car, public transport, etc., and the efficiency of the vehicle's engines used and in what environment the journeys are made. Techniques for estimating energy use, total amount of traffic work and traffic-related emissions are normally based on extrapolation of traffic data from sensors or on output data from traffic planning models. Based on output from these processes, is the HBEFA framework for energy and emission estimation used for estimating energy consumption based on traffic conditions.

In this project, we have looked at the possibilities of improving the techniques for this type of estimate to improve the richness of detail in the estimates by using a large number of observations from the traffic network. Sensor data used is data from vehicles equipped with a GPS. This GPS data provides detailed data on vehicle speed over space and time. However, the flow is often not possible to obtain from this type of data, as it would require all vehicles to provide GPS data. In practice, GPS data is available from only a small proportion of the total number of vehicles. In the project, we have combined sensor data sources in the form of travel time data from GPS-equipped vehicles to be able to provide more detailed, and possibly more accurate, estimates of energy use by road traffic. In the first part, we have, with the help of machine learning, studied the correlation between measured travel times and measured traffic flows. The motive was to create techniques for producing the traffic flow on a specific road segment only based on the type of travel times that can be procured commercially. This technique differs from the traditional method based on static velocity-flow relationships that are calibrated for each situation. In a second part under this heading, we have looked at how we can use the network structure in the road network. Based on data from individual stationary traffic measurement sensors and the network-wide travel times we have available, create 1) a technology to estimate traffic behaviour in the network, and 2) based on this technology, create a framework to improve current processes to calibrate travel demand matrices.

This technology makes it possible to provide estimates of energy use from road transport. Estimates of energy consumption with this technology provide improvements in the level of detail compared to traditional technologies and can provide more accurate estimates than the traditional technologies. The key concept for achieving this is the use of large-scale travel time data as input, and the calculation process developed in the project.

Inledning

Vägtrafiken utgör huvuddelen av transportsektorns energianvändning. Att kunna analysera och följa upp energianvändningen från vägtrafiken över tid är därför

viktigt. Vägtrafikens energianvändning är till stor del kopplad till användning av fossila bränslen vilka i sin tur är en stor källa till både utsläpp av koldioxid och ämnen som skapar hälsoproblem, såsom PM10, kväveoxider och kolmonoxid.

Projektets syfte är att förstå hur energianvändningen från vägtrafik i städer utvecklas över tid. Det övergripande målet är att skapa ett ramverk baserat på kostnadseffektiva trafiksensorer som kan användas för att kontinuerligt estimeras energiförbrukningen på timnivå från vägtrafiken. Ramverket omfattar tre huvudkomponenter, varav en komponent uppskattar reseefterfrågan, rutt- och länkflöden, en komponent beskriver hur trafiken fördelar sig över vägnätet i tid och rum, och den tredje komponenten för att skatta trafikens energiförbrukning. De två första komponenterna använder data från passiva och kostnadseffektiva sensorer som indata. Utdata från ramverket är den totala energiförbrukningen per timme och dess fördelning över vägnätet.

Med hjälp av skattad energiåtgång över tid kan olika förklaringsvariabler för transportsystemets energiåtgång följas upp och analyseras, både när förändringar görs i transportsystemets utformning, och när det gäller påverkan från exempelvis ökad digitalisering och förändrade samhällsfunktioner.

Den teknik som utvecklats inom projektet bidrar till mer detaljerade skattningar av energiåtgång från vägtrafik. Tidigare tekniker som har kunnat användas för detta är behäftade med problem som ofta gör att teknikerna ger osäkra estimat. Teknikerna bygger på en väldigt liten mängd indata, vilket i sin tur påverkar estimatens kvalitet. Tidigare använda tekniker är också ofta komplex att använda, då de kräver kalibrering av samband vilka i praktiken är omöjliga att kalibrera med tillräckligt god noggrannhet.

Den teknik som utvecklats i projektet innebär inte bara att det är möjligt att skapa estimat av fordonsflöden över tid för ett större område. Tekniken möjliggör att effekter av trängsel i trafiknätverket kan fångas upp på ett enkelt sätt. Tekniken möjliggör också att estimat av reseefterfrågan kan uppdateras på ett nytt, enklare sätt en vad som traditionellt brukar användas (så kallad gradientjustering). Förenklingen som tekniken erbjuder ligger i att tekniken använder sig av betydligt färre modellparametrar, vilket leder till att kalibreringsprocessen bli snabbare och behäftat med färre felkällor.

Hög kvalitet på estimat av reseefterfrågan i sig är av stor vikt för att estimat av den totala energiåtgången. Den utläggningsprocess som tagits fram bidrar i mindre del till detta. Samtidigt så möjliggöra den nya tekniken för dynamisk nätutläggning baserat på restidsobservationer att processen för att justera ett estimat av reseefterfrågan kan göra enklare, mer effektivt, och med högre kvalitet. Denna process bidrar till stor del till förbättrade estimat. Hypotesen är teknikern som utvecklats ger en enklare process som också ger estimat av högre kvalitet också när antalet mätpunkter för fordonsflöden är relativt lågt.

En vanligt förekommande metod för att estimeras energiåtgången från fordonsflöden är att använda sig av HBEFA. Denna modell för att estimeras energiåtgång tar en beskrivning av trafikillståndet som indata. För att använda

metoden i detta sammanhang så behöver de tillstånd som nätutläggningens trafikflöde över tid översättas till den typ av tillståndsbeskrivningar som HBEFA använder sig av. Då nätutläggningstekniken som används i detta projekt baseras direkt på restider (och därmed hastighet) så är denna översättning enkel att utföra. De energiåtgångsestimat som tas fram från HBEFA bygger på en specifik fordonsmix när det gäller bl.a. de drivlinor som används, andelen elfordon etc. Fordonsmixen speglar en genomsnittlig fordonsuppsättning för ett givet år, t.ex. 2020, vilken uppdateras i modellen med jämna mellanrum. För den givna fordonsmixen så beskriver HBEFA energiåtgång baserat på trafik tillstånd per kilometer för specifika fordonstyper.

Projektet har genomförts under perioden 2019-2021 av Linköpings universitet i samarbete med RISE. Clas Rydergren, Linköpings universitet har varit projektledare. En doktorand har, fram till disputation, delfinansierats av projektet.

Genomförande

Projektets genomförande har delats upp i fyra delar:

1. Skattning av länkflöden (AP1 enligt ansökan)
2. Modellering av energiförbrukning (AP2 enligt ansökan)
3. Analys av energiförbrukning (AP3 och AP4 enligt ansökan)
4. Projektledning och resultatspridning (AP5 enligt ansökan)

Skattning av länkflöden

Projektdeltagare

- *Linköpings universitet: Nikolaos Tsanakas, David Gundlegård, Clas Rydergren, Joakim Ekström, Johan Olstam, Nils Breyer*
- *RISE: Ian Marsh, Henrik Abrahamsson, Pei-Lun Hsu*

Under denna rubrik så har vi arbetat med att utifrån observerade restider skapa estimat av trafikflöden. I en första del har vi med hjälp av maskininlärning tittat på hur god koppling som kan skapas mellan uppmätta restider och uppmätta trafikflöden. Motivet var att skapa tekniker för att ta fram trafikflödet på ett specifikt vägsegment bara utifrån den typ av restider som kan upphandlas kommersiellt. Denna teknik skiljer sig från det traditionella sättet som baseras på statistiska hastighets-flödessamband som kalibreras för varje situation.

I en andra del har vi tittat på hur vi kan nyttja nätverksstrukturen i vägnätet. Baserat på data från enstaka stationära trafikmätningssensorer och de nätverksövergripande restider som vi har tillgängliga, har vi skapat 1) en teknik för att estimeras trafikens beteende i nätverket, och 2) baserat på denna teknik, skapat ett ramverk för att förbättra dagens processer för att kalibrera resefterfrågematriser.

Första delen i detta arbetspaket har behandlat tekniker för att skapa lokala estimat av fordonsflöden baserat på maskininlärning. Problemet har sin grund i att trafikflöde inte kan observeras överallt, hela tiden, till en rimlig kostnad på grund av höga installations och driftskostnader hos stationära sensorer. I praktiken är det också slöseri att mäta på ställen där flödet är väldigt litet. För att kompensera för stationära sensorers svagheter analyseras här ett tillvägagångssätt för att estimeras trafikflöden från restidsdata från INRIX. Dessa data innehåller restider som kommer från användare av bland annat färdnavigatorer i fordon och har en bred rumslig täckning. Idén är att utveckla modeller baserade på neuronät för att automatiskt extrahera samband mellan trafikflödesdata och restidsdata från INRIX-mätningarna baserat på historiska data och med hänsyn till tidsmässiga och rumsliga beroenden.

Initialt så har kartläggningar gjorts av vilka data som finns och hur dessa data kan användas för att utveckla tekniker och validera resultat. För att köra korrelationsanalyser mellan uppmätta trafikflöden och restidsdata så finns grundsambanden och state-of-the-art för trafikflöden dokumenterade i Marsh m.fl. (2021a).

Experiment har gjorts med fyra veckors data från INRIX och från stationära sensorer på vägsegment på E4:an i Stockholm. Jämfört med det traditionella tillvägagångssättet som anpassar stationära samband mellan trafikflöde och hastighet baserat på fundamentaldiagram, förbättrar det nya tillvägagångssättet noggrannheten. Resultaten visar dessutom att modellerna i den nya metoden är något bättre på att hantera avvikelser i ingående variabler vilket kan hjälpa till att öka noggrannheten på estimatet för vägsegmentet utan stationär sensor. Den nya metoden kan därför vara lämplig för att uppskatta trafikflöden över tid på vägsegment med en närliggande en stationär sensor. Metodiken ger ett automatiserat sätt att bygga modeller som är anpassade till datamängderna och som bör vara möjlig att integrera även med andra datakällor. Denna teknik har dokumenterats i Hsu (2021). Vidare dokumentation av de slutsatser som finns i detta arbete finns utvecklade i Marsh m.fl., (2021b).

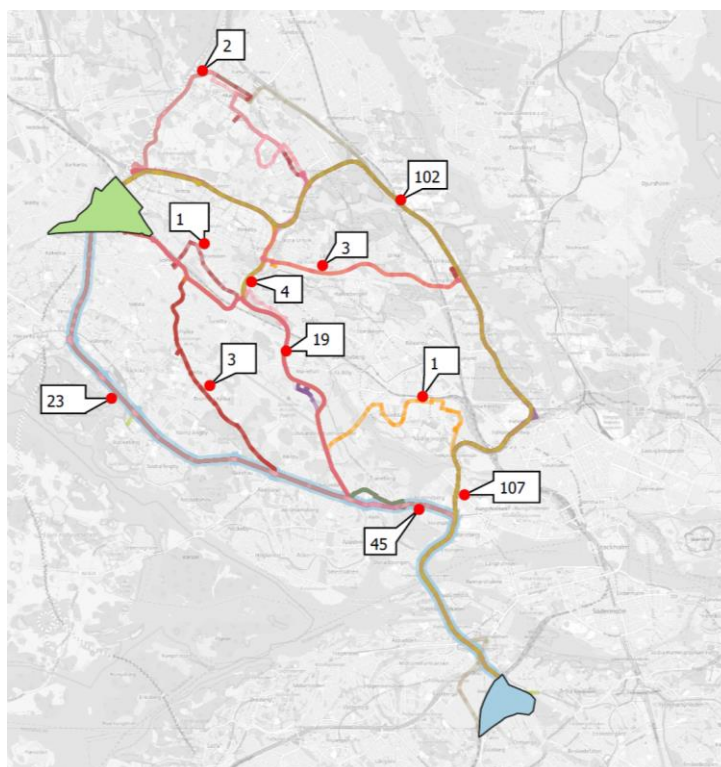
Andra delen i detta arbetspaket har behandlat utveckling och experiment med en ny teknik för att utifrån en efterfrågebeskrivning, estimeras fordonsflödet på alla väglänkar i ett större område eller region. Denna teknik bygger på två delar, a) en dynamisk utläggning av en given mängd trafik på rutter i vägnätet, b) en teknik för att förenkla och förbättra den process som används idag för att kalibrera resefterfrågematriser. Den senare tekniken bygger till del på den framtagna utläggningstekniken.

Den teknik som har tagits fram för utläggning av fordonsflöden baseras på traditionell teknik för trafikflödesmodellering när det gäller beskrivning av vägnätet och zonindelning för att beskriva start och målpunkter för resor. Innovationen i den utvecklade tekniken är att i stället för att använda samband mellan hastighet och trafikflöde för att modellera trängsel i nätverket, så använder vår teknik observerade restider direkt. Även om denna process är relativt komplex, då vi måste försäkra oss om att vissa grundförutsättningar uppfylls, bland annat att ”first-in-first-out” gäller för alla fordon, så förenklar innovationen

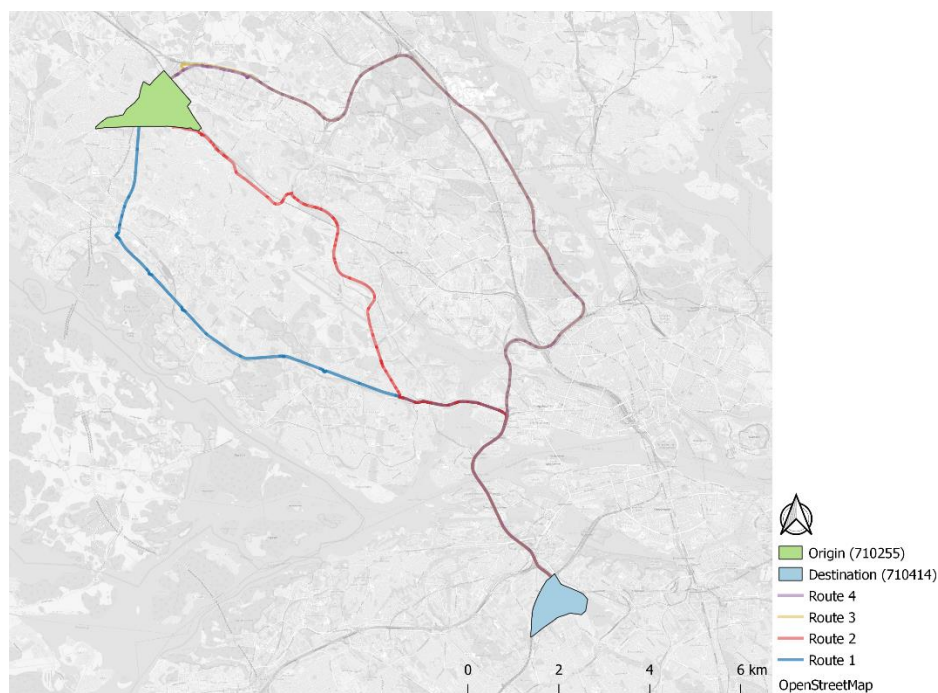
nätutläggningen avsevärt. Förenklingen består i att ingen kalibrering av samband mellan hastighet och flöde behöver utföras, och att vi kan analysera varje reserelation separat.

De data från INRIX som vi använder som indata gör det möjligt att inte bara få estimat på restider på länkar över tid, utan ger också information om vilka rutter som fordonen har valt i respektive reserelation. Informationen om ruttvalet har vi använt för att skapa en modell för hur ruttvalet görs. Denna modell av ruttvalet används för att fördela en given reseefterfrågan på de rutter som har observerats över längre tid. Givet information om vilka rutter som används, och hur stor andel av det totala resandet i reserelationen som använder respektive rutt, så genomförs utläggningen baserat på indata i form av restider på länkarna som ingår i rutterna. I Figur 1 så illustreras vilka rutter som används i ett origin-destination-par. I figuren så är det resor från den gröna zonen till den blå zonen. I figuren visas 152 resor som analyserats i detta par. I Figur 2 visas de fyra huvudalternativen av rutter som har filterats fram genom att titta på antalet fordon på respektive rutt. Filtringen görs för att få mängden rutter som används att vara representativa för flertalet resenärer, och rutter som används av ett fåtal (outliers) elimineras. Detta gör att den fördelning av reseefterfrågan som sedan görs på rutter stämmer bättre överens med de observerade ruttvalen. Baserat på restiderna för dessa tre rutter så estimeras fördelningen av fordonen på den baserat på dess restid.

En mer ingående beskrivning av hur utläggning av fordon på respektive rutt genomförs i den i projektet utvecklade tekniken återfinns i Tsanakas m.fl. (2020).



Figur 1: Identifierade rutter från data i en reserelation – talet som anges vid några av länkarna anger antal fordon som observerats på respektive länk i denna relation.



Figur 2: De fyra huvudsakliga rutterna efter filtrering.

Utläggningen av fordonsflödet på de identifierade rutterna tar reseefterfrågan över tid som indata. Att estimerar reseefterfrågan är ett problem som analyserats i en stor mängd forskningsartiklar (se t.ex. Abrahamsson, 1998, för en översikt av problemet) under åren, och där råder konsensus om att detta är ett svårt problem givet traditionella metoder. Traditionella metoder bygger på samband mellan hastighet och trafikflöde samt enbart indata i form av flödesräkningar på ett relativt litet antal länkar. Detta gör att problemet inte bara är underbestämt, utan också att lösningen påverkas av svårigheterna i att kalibrera de hastighets-flödes-samband som används i metoden.

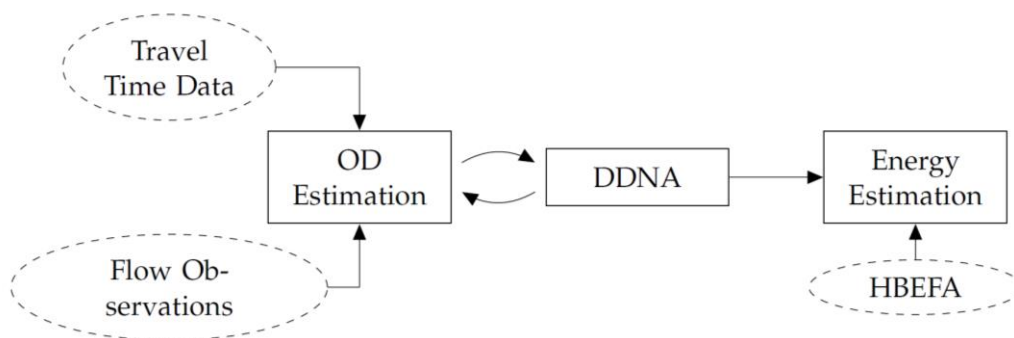
I projektet har vi utvecklat en teknik som använder en utläggning av fordon på identifierade rutter (se Tsanakas m.fl., 2020) för att skapa en effektiv metod för att estimerar reseefterfrågan över tid. Att estimerar reseefterfrågan är ett traditionellt och komplext problem. Alla de traditionella teknikerna bygger på att restider modelleras via sin koppling till flöden på länkar i nätverket. Detta bidrar att alla traditionella metoder kräver en trafikmodell där alla länkars hastighets-flödessamband är kalibrerade, för att uppnå rimliga och trovärdiga resultat. Tekniken utvecklad i detta projekt kringgår detta kalibreringsarbete genom att jobba med observerade restider.

Indata till denna teknik är restider på länkar över tid från observationer, rutter som används i reserelation från samma datakälla, länkflödesmätningar från ett mindre antal länkar i den modellerade regionen, samt ett initialt estimat av

resefterfrågan. En mer ingående beskrivning av den teknik som utvecklats i projektet för kalibrering av resefterfråga återfinns i Tsanakas m.fl. (2021).

I detta projekt har vi använt en kombination av källor för att skapa det initiala estimatet av resefterfrågan. En av källorna som använts är den resefterfrågan på fordonstrafik på väg som används i den nationella modellen Sampers. Denna källa ger en statisk beskrivning av efterfrågan som beskriver ett genomsnittsdyn uppdelat i fyra delar, förmiddag, eftermiddag, lunchperiod, samt övrig tid över dygnet. Denna beskrivning beskriver inte dynamiken över tid i detalj i tillräckligt hög grad. På grund av detta har vi kompletterat detta estimat med ett estimat som är framtaget utifrån vägtrafik som identifierats från mobilnätoperatören Telenors nätverk. Processen för att ta fram estimat på antal resor fördelat över tid har tagits fram i ett parallellt projekt med fokus på långväga resor. Baserat på resultat från detta projekt har en tidsdynamisk beskrivning av resefterfrågan inom Stockholmsregionen tagit fram. Beskrivning av dessa data återfinns i Breyer (2020).

De två delarna, utläggning av fordonsflöden och framtagning av tidsdynamisk efterfrågebeskrivning, är grundkomponenterna i ramverket för att estimer energiåtgången från vägtrafik på nätverksnivå. Estimering av tidsdynamisk resefterfrågan (OD Estimation) och utläggningen av denna efterfrågan på vägnätet (DDNA) hänger ihop enligt Figur 3.



Figur 3: Ramverksstruktur för estimering av energiåtgång på nätverksnivå

Figur 3 illustrerar hur de olika komponenterna hänger ihop. Komponenten för att estimer en resefterfrågan finns beskriven i Tsanakas m.fl. (2021) och komponenten för utläggning av trafik återfinns i Tsanakas m.fl. (2020). Estimeringen av efterfrågan tar indata i form av observerade restider och flödesobservationer från ett mindre antal länkar i nätverket. Resultatet från utläggningen av trafik i nätverket utgör indata till energiestimeringen, vilken använder sig av HBEFA-metoden.

Modellering av energiförbrukning

Projektdeltagare

- *Linköpings universitet: Clas Rydergren, Nikolaos Tsanakas, Joakim Ekström, Johan Olstam*

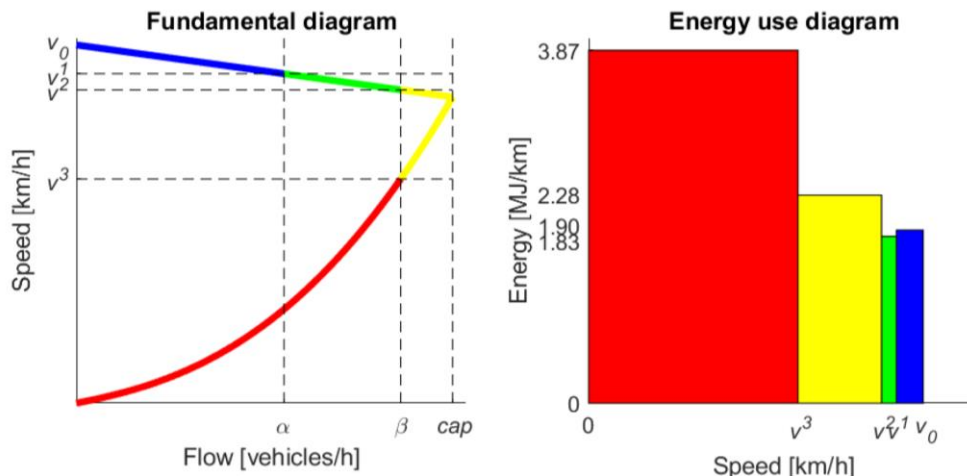
De flöden som estimerats enligt den process som beskrivits under ”Skattning av länkflöden” utgör indata till modellering av energiförbrukning per länk och tidsintervall. Energimodelleringen baseras helt på den europeiska modellen från Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) som finns beskriven i Notter m.fl. (2019).

HBEFA används ofta för estimering av emissioner. Då emissioner och energiåtgång är nära kopplade vid den modelleringsnivå som HBEFA baseras på, specificeras även energiåtgång i HBEFA-modellen. HBEFA anger faktorer emissionsfaktorer för CO, HC, NO_x, PM, CO₂, NH₃, N₂O, NO₂, PN, PM och BC samt för bränsle och energiåtgång. Specifikationen för energiåtgång från HBEFA är grunden till de estimat som tas fram i detta projekt. HBEFA-modellen anger energiåtgången i enheten MegaJoule (MJ) per fordonskilometer.

Energifaktormodulen i HBEFA innehåller, liksom emissionsmodellen, viktade faktorer för specifika trafiksituationer för specifik vägkategori, tidsperiod och fordonstyp och bränsletyp (bensin, diesel, gas, el). Normalt används faktorerna aggregerade. I detta projekt har fordonssammansättningen för Sverige år 2020 använts. Det innebär att bl.a. fordonsflottans ålder, motor och bränsletyp speglar genomsnittet i Sverige år 2020. I experimenten som genomförts i projektet så specificerar vi en fordonsmix som anger andelen av varje fordonstyp, det vill säga, andel av bilar, lätta lastbilar, lastbilar, bussar, etc.

Energiåtgången anges för ett antal olika vägkategorier. För varje vägkategori ges också faktorerna för respektive skyltad hastighet. Alla vägkategorier finns definierade i Eriksson m.fl. (2019). De trafiksituationer som är definierade i HBEFA är kökörning (”stop-and-go”), flöde nära vägens kapacitet (”saturated flow”), måttligt flöde (”heavy flow”) och fritt flöde (”free flow”). Dessa beskriver trafikflödets tillstånd mellan helt fritt flytande trafik upp till krypfart.

Användningen av HBEFA bygger på att vi transformerar de hastigheter som har använts vid utläggningen av trafiken till matchande trafikillstånd. För att göra detta använder vi den process som tidigare utvecklats i Tsanakas m.fl. (2017) och Tsanakas m.fl. (2020) som bygger på att matchningen görs via ett standardiserat fundamentaldiagram för den givna vägtypen. Exempel på transformation från hastighet till trafikillstånd för en given vägtyp ges i vänstra delen av Figur 4. I figuren illustreras motorväg med 80km/h som hastighet. Trafikillstånden i HBEFA definierar brytpunkterna α , β och cap . I figuren så illustreras tillståndet av fritt flöde av den blå delen av kurvan, när hastigheten (km/h) är mellan v_0 och v^1 . Tillståndet med måttligt flöde illustreras med den gröna delen av kurvan och infaller när hastigheten är mellan v^1 och v^2 . På liknande sätt illustreras flöde nära kapaciteten (gul del av kurva) och kökörning (röd del av kurva) för hastigheter mellan v^2 och v^3 respektive mellan v^3 och 0.



Figur 4: Vänster: Fundamentaldiagram för en specifik vägtyp där färgerna motsvarar trafik tillstånd i HBEFA. Höger: Energiåtgång per kilometer vid respektive trafik tillstånd definierad i HBEFA för en motorväg med modellerad hastighet av 80km/h.

Hastigheten för en given vägtyp kan genom kopplingen mellan trafik tillstånd och hastighet enligt Figur 4, kopplas direkt till energianvändningsfaktorerna definierade i HBEFA. För vägtypen som illustreras i Figur 4 så visas energianvändningen per kilometer för respektive hastighet i högra delen av samma figur.

Genom att skapa denna typ av koppling mellan hastighet och trafik tillstånd för alla vägtyper som existerar i den modellerade regionen så kan modellutdata direkt användas för att beräkna den totala energiåtgången. Då energiåtgången enligt denna beräkning enbart bygger på indata i form av en beskrivning av vägnätet, samt antal fordon och deras hastighet, och t.ex. inte på totala antalet fordon på ett specifikt vägsegment, så kan energiåtgången beräknas för bl.a. ett individuellt origin-destination par, utan att resultatet påverkas av flödet och flödesfördelningen i andra origin-destination par.

Analys av energiförbrukning

Projektdeltagare

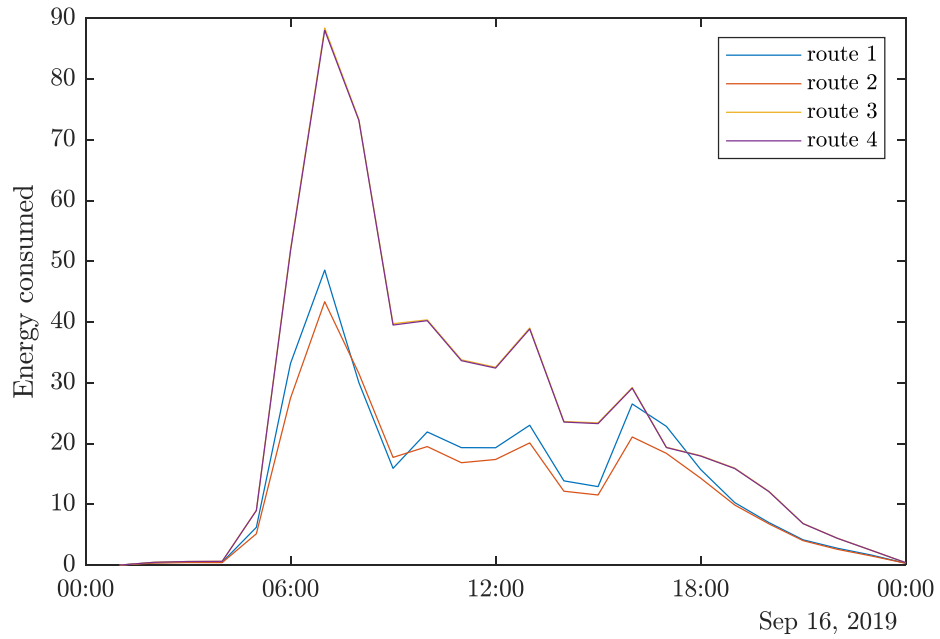
- *Linköpings universitet: Nikolaos Tsanakas, David Gundlegård, Clas Rydergren*
- *RISE: Ian Marsh*

I detta arbetspaket har vi kombinerat resultaten från arbetspaketet om skattning av länkflöden och arbetspaketet om modellering av energiförbrukning för att illustrera skattning av nätverksövergripande energiförbrukning över tid.

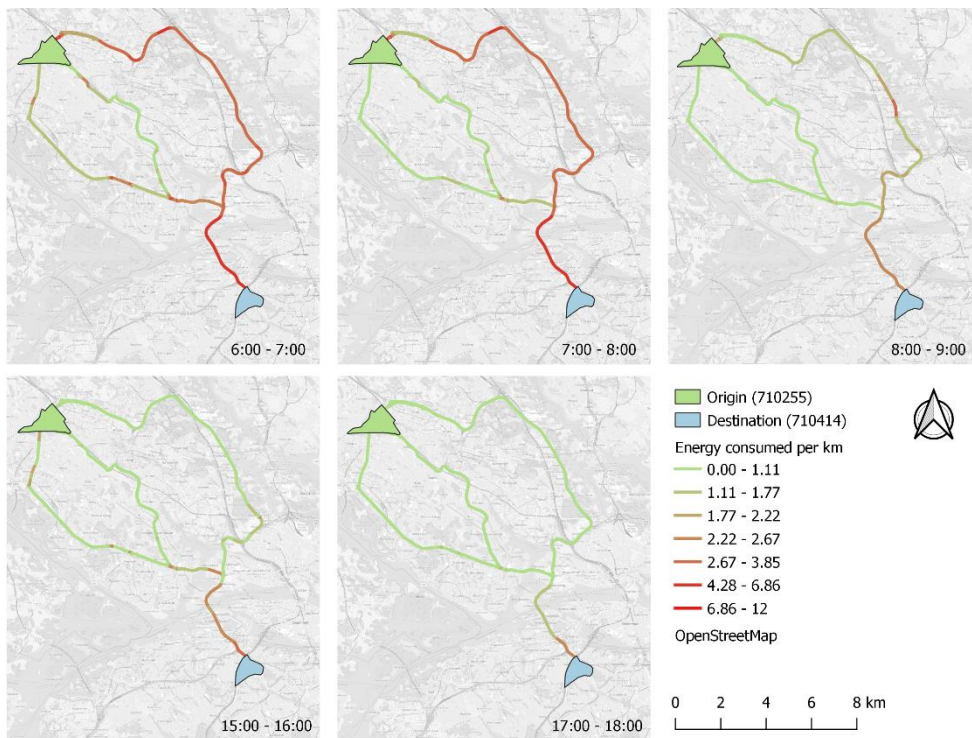
Här visar vi ett exempel som illustrerar resultaten som återfinns i Gundlegård m.fl., (2021). Vi återanvänder här den reserelation som illustrerades redan i Figur 1, en reserelation för resor med start i den grönt markerade zonen (norra) och som slutar i den som är markerad i blått (södra).

Utifrån INRIX GPS-data så har vi identifierat de rutter som redan tidigare illustreras i Figur 1. Efter filtrering av dessa rutter så har de fyra rutter (två av dem är snarlika, men inte identiska) som illustreras i Figur 2 tagits fram. Dessa rutter och den restid som upplevs vid olika tider på dygnet har använts som indata till den datadrivna nätutläggningen. Från restider per timma så har en fördelning av trafiken i reserelationen tagit fram för de fyra rutterna.

Utdata från utläggningen ger flöde per segment vilket kombineras med restiderna för att skapa indata till HBEFA-modellen, enligt arbetspaketet runt modellering av energiförbrukning. Exempel på utdata från modellen illustreras i Figur 5 och Figur 6. I Figur 5 illustreras energiåtgången för de fyra rutterna över tid. Energianvändningen ges i enheten MJ per timma och rutt. Användningen på rutt tre och rutt fyra och högre än på rutt ett och två. Det kan förklaras av rutternas längd, antal fordon, och trängseln på dem. Rutt tre och fyra är båda c:a 5km längre än rutt ett och två. Rutt tre och fyra används av fler fordon enligt modellens estimat, vilket i sin tur är rimligt då dessa rutter till stor del utgörs av motorväg. Trängseln den illustrerade dagen (16 september 2019) är måttlig, även om det finns en fördröjning på motorvägen under eftermiddagens maxtimma. I Figur 6 illustreras energianvändningen på de fyra rutterna istället på en karta. I figuren illustreras energiåtgången per vägsegment och timma för fem utvalda timmar under dagen. Tekniska detaljer kring modellberäkningarna och resultat återfinns i Gundlegård m.fl., (2021).



Figur 5: Energianvändning för respektive rutt i reserelationen (MJ per timma).



Figur 6: Energiåtgång per kilometer och rutt, för olika tidsintervall under dagen, i reserelationen.

Projektledning och resultatspridning

Projektmedlemmar

- *Linköpings universitet: Nikolaos Tsanakas, David Gundlegård, Clas Rydergren, Joakim Ekström, Johan Olstam, Nils Breyer*
- *RISE: Ian Marsh, Henrik Abrahamsson, Pei-Lun Hsu*

Projektet har genomförts som ett samarbete mellan LiU och RISE. RISE har fokuserat på maskininlärningstekniker för att estimerade lokala flöden, och LiU har fokuserat på att utveckla tekniker för att skapa nätverksövergripande dynamiska trafikflöden samt att skapa en teknik för att kalibrera resefterfrågan. Det innebär att RISE fokuserat på maskininlärning i arbetspaketet om skattning av länkflöden, och att LiU utvecklat flödesmodeller samt tittat mer på detta kopplas till energiåtgång baserat på HBEFA.

Under projektets första år så hade vi fysiska möten på plats på LiU Campus Norrköping, därefter övergick vi till online-möten varannan vecka.

Resultatspridningen har främst skett genom publikationer. För estimering av länkflöden baserat på maskininlärning så finns resultaten i två RISE-publikationer, Marsh m.fl. (2021a) och Marsh m.fl. (2021b) samt i Hsu (2021). För nätverksövergripande flödesestimering så återfinns i Tsanakas m.fl. (2020) samt Tsanakas m.fl. (2021). Den förstnämnda av dessa är publicerad i internationell peer-review journal (open access) och den andra är under review för samma journal. Artiklarna Tsanakas m.fl. (2020) och Tsanakas m.fl. (2021) ingår båda i doktorsavhandlingen Tsanakas (2021) som försvarades i juni 2021. Beskrivningen av modellering av energiåtgång baserat på HBEFA återfinns i Gundlegård m.fl. (2021). I denna artikel återfinns även numeriska resultat för beräkningsprocessen som utvecklats i projektet.

Tekniken som utvecklats inom ramen för detta projekt kommer till användning i två nystartade projekt finansierade av Trafikverket: Multimodal trafikledning (TrV, pågår 2021-2023) och Code probe (TrV, pågår 2022-2023). I det förstnämnda kommer den utläggningsteknik som utvecklats inom detta projekt att tillämpas inom området trafikledning i storstadsregioner. I det sistnämnda så kommer tekniken för estimering av trafikefterfrågan förfinas.

Resultat

Projektets syfte är att förstå hur energianvändningen från vägtrafik i städer utvecklas över tid. Det övergripande målet var att skapa ett ramverk baserat på kostnadseffektiva trafiksensorer som kontinuerligt kan övervaka energiförbrukningen på timnivå från vägtrafiken. Projektets effektmål är att genom bättre förståelse för städernas energikonsumtion från transportsystemet åstadkomma en energieffektivare planering och styrning av transportsystemet.

Inom ramen för projektet har ett flertal olika metoder för skattning av länkflöden och trafikarbetet utvärderats. Inför projektet identifierades två olika metoder, dels metoder baserat på lokal skattning av länkflöden, dels nätverksbaserade metoder

som utgår från en efterfrågan för ett större geografiskt område och därefter skattar hur efterfrågan fördelar sig i transportnätverket. Båda metoderna utnyttjar kostnadseffektiva sensorer med hög spatiotemporal täckning, som data från uppkopplade GPS-fordon och data från mobilnäten.

I Marsh m.fl. (2021a) och Marsh m.fl. (2021b) beskrivs resultatet för den lokala skattningen av länkflöden och i Tsanakas m.fl. (2020) och Tsanakas m.fl. (2021) beskrivs resultatet för den nätverksbaserade metoden. I Gundlegård m.fl. (2021) beskrivs en metod för att skatta energiåtgång baserat på utdata från den nätverksbaserade metoden. Tillsammans bildar dessa metoder ett ramverk för att med hjälp av kostnadseffektiva sensorer skatta transportsystemets energiåtgång över tid. Egenskaperna för sensordata gör det också möjligt att kontinuerligt över tid utföra beräkningarna för stora delar av Sverige.

Projektets resultat har hittills, utöver slutrapporten, publicerats i en doktorsavhandling, ett examensarbete samt i en välrenommerad internationell tidskrift. Ett flertal publikationer kommer också att publiceras efter projektets slut.

Med projektresultatet får projektavvärmare, exempelvis kommuner eller regioner, på sikt bättre möjligheter att följa upp hur transportarbetet varierar i tid och rum, vilket ger bättre underlag för att fatta beslut som främjar ett mer energieffektivt transportsystem. Den mer detaljerade uppföljningen av transportarbete och energiåtgång ger också bättre möjligheter att förstå olika åtgärders påverkan på transportsystemets energiåtgång, vilket i sin tur leder till nya möjligheter att identifiera energieffektiva åtgärder i transportsystemet.

Diskussion

Den teknik som utvecklats i detta projekt för estimering av nätverksövergripande energiåtgång från vägtrafik har stor potential att förbättra de metoder som finns tillgängliga idag. De tekniker som finns idag baseras på liknande metoder som de som finns för att skatta trafikarbete. Dessa metoder finns beskrivna i Berglund och Schultze (2020). Utvecklingen kring dessa metoder pekar i den riktning som har tagits i detta projekt, inte minst när det gäller att skapa bättre uppskattningar av resefterfrågan baserat på sensor och mobilnätdata.

Projektet har visat på hur nya typer av data kopplad till vägtrafiksystemet kan användas dels för att modellera trafiksystem, också specifikt kan användas för uppföljning av trafikflöden och energiåtgång nätverksövergripande. Projektet har visat hur restidsdata, trots att de inte direkt kopplar till trafikflöden, kan användas för att modellera trängseffekter i trafiksystemet, och vara underlag till en teknik för att estimerade trafikefterfrågan som inte bygger på kalibrering av hastighets-flödessamband.

När traditionella trafikmodeller används för att skatta flöde, restider och trängsel så är det problematiska att analysera delområden i en region. Detta på grund av att trafiken i en region kan ha sitt ursprung i en annan region, vilket gör att även denna region måste inkluderas i modellen. Tekniken som tagits fram i detta projekt lider inte av detta problem på samma sätt. Tekniken möjliggör analys av

enskilda reserelationer och till och med enskilda fordonstyper (givet att efterfrågan kan estimeras för enskild fordonstyp). Tekniken som utvecklats möjliggör snabbare analyser och en mer detaljerad uppföljning av energiåtgång, jämfört med tidigare modellbaserade tekniker.

Tekniken som har utvecklats i projektet möjliggör enbart uppföljning. Detta är en direkt konsekvens av att restidsdata används som indata. På grund av detta erbjuder inte tekniken möjligheter till utvärdering av till exempel framtida trafikscenarier. Tekniken som utvecklats för energiestimering är direkt kopplad till HBEFA. Detta gör att uppföljningen är begränsad till de vägtyper och den fordonsmix som används i HBEFA. Detta gör att det alltså heller inte går att utvärdera t.ex. en framtida mix med en större andel eldrivna fordon, om det inte är så att det tas fram i de energifaktorer som HBEFA ger.

Teknikerna som har utvecklats i projektet behöver testas mer och kan med stor säkerhet utvecklas även för andra tillämpningar. I en nära framtid kommer tekniken att användas i två nystartade forskningsprojekt där den utläggningsteknik som utvecklats inom detta projekt att tillämpas inom området trafikledning i storstadsregioner samt för förbättrad estimering av trafikefterfrågan.

På längre sikt ser vi att uppföljning av energiåtgång från vägtrafik med de tekniker som har utvecklats i projektet ger de verktyg för uppföljning som kommer att behövas för att se till att utvecklingen för vägtrafiken följer den plan för effektivisering som grundats i politiska beslut.

Publikationslista

Breyer, N., (2020), OD Stockholm: Data description. Report 2020-11-19

Denna publikation innehåller information om de data vi använt som en av källorna till initial skattning av efterfrågan. Publikationen beskriver formatet på de data som kommer från mobilnätet från en svensk operatör, och som omfattar en OD-matris för Stockholmsregionen. Data som beskrivs i denna rapport och används i projektet har tagits fram med hjälp av tekniker utvecklade i tidigare forskningsprojekt utförda av LiU. Denna publikation är medskickad som bilaga.

Gundlegård, D., Rydergren, C., Tsanakas, N., (2021), Estimating energy consumption from data-driven traffic flow estimates, Working paper

Denna publikation sammanfattar dels teknikerna för att skatta nätverksövergripande länkflöden givet en trafikefterfrågan, tekniken som använts för estimering av reseefterfrågan, samt en övergripande bild av hur HBEFA har använts i projektet. Publikationen innehåller också numeriska resultat av estimering av energiåtgång från reserelationer i Stockholmsområdet. Denna publikation är medskickad som bilaga.

Hsu, P.-L., (2021), Machine Learning-Based Data-Driven Traffic Flow Estimation from Mobile Data, Master-uppsats KTH, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1590038&dswid=2915>

Denna publikation beskriver maskininlärningstekniker för att estimeras och prediktera trafikflöden. Publikationen är en master-uppsats från utförts av Pei-Lun Hsu under handledning av bl.a. Ian Marsh från RISE. Pei-Lun har varit anställd hos RISE under arbetets gång.

Marsh I., Hsu, P.-L., Ghandeharioon, C., (2021a), Data-driven traffic flow: A state-of-the-art report, RISE report 2021:93

Denna publikation sammanfattar forskningsläget när det gäller att estimeras och göra prediktioner på trafikflöden från lokala trafiksensorer. Här beskrivs de grunder som behövs för att analysera kopplingen mellan trafikflöde och restid från de datakällor som används i projektet. Denna publikation är medskickad som bilaga.

Marsh I., Abrahamsson, H., Hsu, P.-L., (2021b), Data-driven traffic flow: Summary of experiments, Working paper

Denna publikation innehåller resultat från de numeriska experiment som gjort med restidsdata från INRIX och flödesdata från MCS i Stockholmsregionen. Denna publikation är medskickad som bilaga.

Tsanakas, N., (2021), Data-Driven Approaches for Traffic State and Emission Estimation, Doktorsavhandling Linköpings universitet, <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=2915&pid=diva2%3A1554995>

Denna publikation är den doktorsavhandling som har delfinansierats av detta projekt. Avhandlingen innehåller en översikt över de tekniker för närverksövergripande flödesestimering som använts i projektet och innehåller de två publikationerna Tsanakas, m.fl., (2020) och Tsanakas, m.fl., (2021).

Tsanakas, N., Ekström, J., Gundlegård, D., Olstam, J., Rydergren, C. (2020), Data-driven network loading, Transportmetrica B: Transport Dynamics, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21680566.2020.1847213>

Denna publikation innehåller alla tekniska detaljer kring den framtagna nätutläggningen baserad på observerade restider.

Tsanakas, N., Gundlegård, D., Rydergren, C., (2021) O-D matrix estimation based on data-driven network assignment, under revision för publicering i Transportmetrica B; Transport Dynamics.

Denna publikation innehåller alla tekniska detaljer kring den framtagna tekniken för estimering av reseefterfrågan. Denna publikation är under revision för publicering. Denna publikation är medskickad som bilaga.

Referenser, källor

Abrahamsson, T., (1998), Estimation of origin-destination matrices using traffic counts – A literature survey, IR-98-021, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.51.248&rep=rep1&type=pdf>

Ahlberg, J., Danielsson, A., Drageryd, L., Gundlegård, D., Ramsey, J., Sjöholm, A., Sjöstrand, S., (2021), Probedata: förstudie kring användning av GPS-baserad probedata för skattning av hastigheter, länkflöden och ruttval, Report: TRV 2019/98384 https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_004501_004600/Publikation_004533/Probedata%20F%C3%B6rstudie%20Publik.pdf

Berglund, M., Schultze, C.J., (2020), Analys av metoder för beräkning av trafikarbete, förstudie, Rapport WSP, 2020-07-03

Breyer, N., (2020), OD Stockholm: Data description. Report 2020-11-19

Ericsson, E., Nolinder, E., Persson, A., Steven, H., (2019), Work programme 2016 - 2018 for HBEFA Version 4.1, Report of the work carried out for work package 2, <http://www.hbefa.net>

Gundlegård, D., Rydergren, C., Tsanakas, N., (2021), Estimating energy consumption from data-driven traffic flow estimates, Working paper

Notter, B., Keller, M., Cox, B., (2019), Handbook of emission factors for road transport 4.1: Quick reference, <http://www.hbefa.net>

Marsh I., Hsu, P.-L., Ghandeharion, C., (2021a), Data-driven traffic flow: A state-of-the-art report, RISE report 2021:93

Marsh I., Abrahamsson, H., Hsu, P.-L., (2021b), Data-driven traffic flow: Summary of experiments, Working paper

Hsu, P.-L., (2021), Machine Learning-Based Data-Driven Traffic Flow Estimation from Mobile Data, Master-uppsats KTH, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1590038&dswid=2915>

Tsanakas, N., Ekström, J., Olstam, J., (2017), Reduction of errors when estimating emissions based on static traffic model outputs, Transportation Research Procedia, 22, pp. 440-449

Tsanakas, N., Ekström, J., Olstam, J., (2020), Estimating Emissions from Static Traffic Models: Problems and Solutions, Journal av Advanced Transportation, 3, pp 1-17

Tsanakas, N., (2021), Data-Driven Approaches for Traffic State and Emission Estimation, Doktorsavhandling Linköpings universitet, <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=2915&pid=diva2%3A1554995>

Tsanakas, N., Ekström, J., Gundlegård, D., Olstam, J., Rydergren, C. (2020), Data-driven network loading, Transportmetrica B: Transport Dynamics, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21680566.2020.1847213>

Tsanakas, N., Gundlegård, D., Rydergren, C., (2021), O-D matrix estimation based on data-driven network assignment, under revision för publicering i Transportmetrica B; Transport Dynamics

Bilagor

1. Administrativ bilaga
2. Breyer, N., (2020), OD Stockholm: Data description. Report 2020-11-19
3. Marsh I., Hsu, P.-L., Ghandeharion, C., (2021a), Data-driven traffic flow: A state-of-the-art report, RISE report 2021:93
4. Marsh I., Abrahamsson, H., Hsu, P.-L., (2021b), Data-driven traffic flow: Summary of experiments, Working paper
5. Tsanakas, N., Gundlegård, D., Rydergren, C., (2021) O-D matrix estimation based on data-driven network assignment, under revision för publicering i Transportmetrica B; Transport Dynamics. KÄNSLIG INFORMATION
6. Gundlegård, D., Tsanakas, N., Rydergren, C., (2021), Estimating energy consumption from data-driven traffic flow estimates, Working paper. KÄNSLIG INFORMATION