

Denne artikel er udgivet i det elektroniske tidsskrift  
**Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet**  
(Proceedings from the Annual Transport Conference  
at Aalborg University)  
ISSN 1603-9696  
<https://journals.aau.dk/index.php/td>

# Hastighed, trængsel og CO<sub>2</sub> udledning fra personbiler

Thomas Sick Nielsen, [tasn@vd.dk](mailto:tasn@vd.dk)  
Vejdirektoratet

---

## Abstrakt

Med udgangspunkt i et spørgsmål om betydningen af køkørsel og trængsel for CO<sub>2</sub> udledningen fra trafikken gennemgik Vejdirektoratet i 2021 mulighederne for at vurdere effekter af trængsel og hastighed for energiforbrug og CO<sub>2</sub> udledning pr. bilkm.

Der er flere typer af emissionsmodeller, der i forskellig grad understøtter en vurdering af betydningen af hastigheder eller trængsel. På det mest overordnede niveau knyttes emissionsfaktorer til gennemsnitshastigheder eller kombinationer af vejtype, tilladt hastighed og trængselsgrad. På et mere detaljeret niveau kan emissionsfaktorer beregnes på baggrund af informationer om et køretøjs hastighed og accelerationer i løbet af en tur/strækning. Den detaljerede beregning stiller dog store krav til datagrundlaget, der ofte ikke kan opfyldes i planlægningsundersøgelser.

For at belyse betydningen af hastighed og trængsel for CO<sub>2</sub> udledningen fra personbiler blev der gennemført en analyse af brændstofforbrug i Connected Cars biler på danske motorvejsstrækninger. Der opstilles en bivariat sammenhæng mellem gennemsnitshastighed og CO<sub>2</sub> udledning, hvor hastigheden må ses som et udtryk for trængselsgraden. Sammenhængen viser, at meget lave gennemsnitshastigheder modsvarer en høj CO<sub>2</sub> udledning pr. bilkm, hastigheder mellem 50 og 90 km/t modsvarer en lav udledning, mens højere hastigheder end 90 km/t, og især hastigheder over tilladt hastighed, giver høje CO<sub>2</sub> udledninger pr. km. Sammenhængen betyder at trængsel på motorvej ofte er med til at reducere udledningen af CO<sub>2</sub> pr. bilkm, men at meget høje trængselsgrader også kan være med til at forøge udledningen pr. km.

---

## 1. Indledning

Med udgangspunkt i et spørgsmål om betydningen af køkørsel og trængsel for CO<sub>2</sub> udledningen fra trafikken gennemgik Vejdirektoratet i 2021 mulighederne for at vurdere effekter af trængsel og hastighed for energiforbrug og CO<sub>2</sub> udledning pr. bilkm. Gennemgangen blev fulgt af ad-hoc analyser af betydningen af trængsel på motorveje for CO<sub>2</sub> udledningen fra personbiler.

For at få et overblik over både sammenhænge og udsagnskraft i kendte modeller i forhold til betydningen af hastighed og trængsel for energiforbrug og CO<sub>2</sub> udledning, blev der gennemført et litteraturstudie af emissionsmodeller og tilgange til emissionsberegninger. Hovedresultaterne fra dette studie præsenteres i afsnit 2.

For at få et detaljeret billede af betydningen af hastigheder og trængsel for CO2 udledningen fra biler på danske motorveje blev der efterfølgende gennemført en analyse, i samarbejde med COWI, af data for brændstofforbrug i Connected cars biler, der kører på motorvejsstrækninger. Hovedresultater fra denne analyse præsenteres i afsnit 3.

## 2. Modeller til beregning af biltrafikkens emissioner og energiforbrug

Modeller til beregning af biltrafikkens emissioner og energiforbrug kan overordnet inddrages i fem niveauer (Smith m.fl. 2010; Grote m.fl. 2016; Kanagaraj og Treiber, 2019):

1. modeller baseret på gennemsnitshastighed (f.eks. COPERT)
2. modeller for vejtyper og trafiksituationer (f.eks. HBEFA)
3. trafikafhængige modeller (nuancer af de to første)
4. modeller baseret på variable, der beskriver en kørecyklus mht. hastighed, acceleration o.l. (f.eks. VERSIT+)
5. modeller der beskriver motorbelastning, rullemodstand mv. (f.eks. PHEM og MOVES).

Dertil kommer en række afledte som f.eks. 'omvendte' energitabsberegninger, der er kommet i anvendelse i ITS-projekter (IntelliGo), hvor det er ønskeligt at anvende foreliggende radardata til at beregne energi og CO2 effekter bedst muligt – samt 'delvise' mikroskopiske beregninger hvor faktorer som køretøjsvægt, dækmodstand, gradienter o.l. antages konstante for at simplificere beregningen samtidigt med, at der sikres en følsomhed for ønskede elementer.

Mens det er fælles for de forskellige tilgange til beregning af emissioner at der arbejdes med køretøjsstørrelser, årgange/EURO-normer, drivmidler o.l. så er der store forskelle når det kommer til hvordan kørselsmønstre og trafik indgår og hvilket datagrundlag der kræves.

Det er især de tre øverste niveauer, der kan være relevante at overveje i forbindelse med planlægningsundersøgelser, der anvender strategiske/makroskopiske trafikmodeller som f.eks. GMM-modellen og OTM. Disse modeller repræsenterer alene overordnede egenskaber for strækninger og perioder såsom trafikmængde, belastning og gennemsnitshastighed for en strækning og en periode - og ikke de enkelte køretøjers bevægelser, hastighed, accelerationer mv.

Emissionsmodeller på niveau fire er på et niveau, der modsvarer resultaterne fra mikrosimuleringsmodeller, 'floating car data'/GPS-data i høj/god opløsning, og video data. Denne type af emissionsmodel kan dermed også være relevante i forbindelse med planlægning af små vejprojekter og projektevalueringer. Emissionsmodeller på niveau fem kan udgøre grundlaget for simple modeller, men er i øvrigt målrettet køretøjs-tekniske forhold som dæktype, gearing, transmissionstab, vindmodstand o.l.

Udfordringer ved de øverste niveauer er især at de enten blander vejtyper, trængsel og hastighed sammen – eller baserer sig på klassifikationer/typer, der ikke understøtter at man følger et hastigheds- eller trængselskontinuum. Dermed fås et 'oversætterarbejde' mellem trafikdata og fordeling på trafiksituationer til emissionsberegning. For de detaljerede mikroskopiske modeller er der til gengæld store krav til datagrundlaget, f.eks. repræsentation af acceleration og deceleration, der kræver en meget høj temporal opløsning (typisk én måling pr. sekund pr. køretøj).

IPCC og EMEP/EEAs manualer for beregning af emissioner udgør væsentlige referencepunkter for nationale emissionsopgørelser. Manualerne beskriver flere metoder, der afhængigt af dataadgangen, kan anvendes til at fremstille de bedst mulige emissions-opgørelser. For opgørelser af klimagasser foretrækkes opgørelser

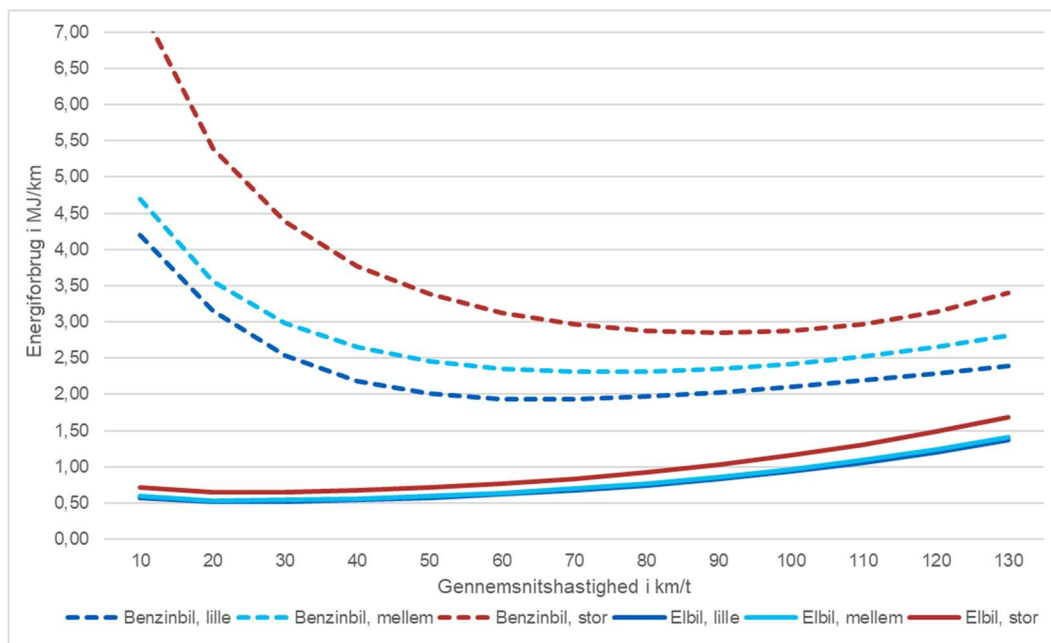
baseret på forbrugt/solgt brændstof for CO<sub>2</sub>, mens opgørelser for klimagasserne CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O kræver oplysninger om kørte km efter brændstoftyper og EURO normer, køretøjsklasser mv. (IPCC 2006). I EMEP, EEA (2019) manualen fokuseres på beregning af alle andre emissioner end CO<sub>2</sub>. Beregningerne foreslås her baseret på køretøjskm efter gennemsnitshastigheder og køretøjsteknologi som den foretrukne metode. Det er her COPERT programmet stilles til rådighed (COPERT: COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) sammen med en database med generelle sammenhænge mellem gennemsnitshastighed og energiforbrug eller varme emissioner for forskellige køretøjsstørrelser, årgange og drivmidler.

COPERT muliggør beregninger for emissioner og energiforbrug ved forskellige gennemsnitshastigheder baseret på den karakteristiske kurvelineære sammenhæng, der ses i figur 1. Kurven er beskrevet ved funktionen nedenfor, men med forskelle i parametre/kurveforløb for biler af forskellig størrelse, årgang, drivmiddel etc. Derudover kan der tages hensyn til bilparkens tilstand/alder og betydningen af koldstarter, der afhænger af både turlængder og det lokale klima.

COPERT kurven: varme emissioner eller energiforbrug pr. km =

$$\left( \alpha V^2 + \beta V^2 + \gamma + \frac{\delta}{V} \right) \frac{1}{\varepsilon V^2 + \zeta V + \eta} (1 - RF)$$

V= hastighed i km/t og  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$  og  $\eta$  er parametre, der er specifikke for en køretøjsklasse og en emission. RF er en reduktionsfaktor, der kan repræsentere betydningen af iblanding af biobrændstof o.l. på CO<sub>2</sub> udledningen (baseret på EMEP, EEA 2022).



Figur 1: Eksempel på COPERTs hastighedsfunktion. Energiforbrug pr. km for EURO6d benzin og el-biler som en funktion af gennemsnitshastigheden. Der er ikke taget højde koldstart/opvarmingsperiode (COPERT 5.6.1).

Som grundlag for beregning af emissioner med COPERT programmet foreslås at trafikken opdelt på trafiksituationer der tilknyttes en gennemsnitshastighed: Bytrafik med trængsel, bytrafik, land-trafik og motorvej. Disse trafiksituationer har bl.a. været anvendt til at definere mange af de køretøjsmålinger, der ligger bag de forskellige databaser med emissionsfaktorer, der udgør grundlaget for COPERT. De officielle danske emissionsopgørelser, der dækker hele landet på én gang, anvender en fordeling af trafikken på tre klasser: by, land og motorvej med gennemsnitshastigheder for personbiler på hhv. 40, 70 og 100 km/t. Grundlaget for beregningen opstilles af DTU ud fra bl.a. Vejdirektoratets data (Winther, 2018).

COPERT modellens generaliserede sammenhæng mellem emission og hastighed er baseret på mange års arbejde og opsamling fra forskellige kilder. Sammenhængen trækker på gennemsnitshastigheder fra forskellige trafiksituationer (og trafikmiljøer) og hastighederne er gennemsnitshastigheder over en længere strækning/cyklus inklusive stop. Den opstillede sammenhæng med gennemsnitshastigheden anvendes også ofte til at vurdere emissionernes størrelse i forbindelse med f.eks. trafikmodelberegninger.

Der er dog en vis usikkerhed i forhold til hvad COPERT sammenhængen repræsenterer og hvordan den kan anvendes og fortolkes. Spørgsmål er f.eks. hvad der er den rigtige referenceskala når grundlaget for COPERT er kørecyklus med forskellige længde (Lejri, Leclercq, 2020), hvad der er den rigtige opløsning/aggregeringsgrad på de data der går ind i emissionsberegningen med COPERT, og i hvilken grad COPERT f.eks. kan anvendes til at repræsentere ændringer i trængsel/trafiksituation på samme vej.

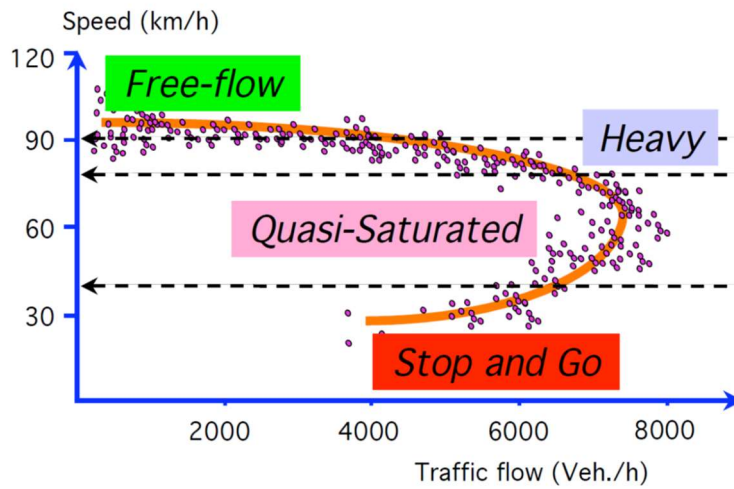
I forhold til skalaen har tests peget på at anvendelse af COPERT funktionen på links/strækninger forudsætter at gennemsnitshastigheden måles over en strækning på mindst 400 meter. I det omfang der optræder data fra kortere strækninger, bør de aggregeres/sammenlægges med tilstødende strækninger (Samaras, 2020). Test af betydningen af aggregeringsgraden i tid har peget på, at gennemsnitshastigheder for én time (ofte den mindste tidsenhed for resultater fra trafikmodeller) fører til for lave emissioner (Lejri m.fl., 2018). Disse tests af COPERT sammenhængens gyldighed dækker dog alene veje i byområder og det er ikke givet at konklusionerne vil være de samme for veje i åbent land med højere hastigheder. I forhold til betydningen af trængsel viser analyser, at der i grundlaget for COPERTs sammenhæng mellem gennemsnitshastigheder og emissioner indgår forskellige grader af trængsel i gennemsnitshastighederne og, at der generelt er mere trængsel i de køremønstre, der udgør grundlaget for funktionens lave gennemsnitshastigheder. COPERT sammenhængen har dermed en implicit trængselsgrad, der ikke direkte kan kontrolleres når modellen anvendes. F.eks. er lave gennemsnitshastigheder mellem 15 og 60 km/t udtryk for forskellige grader af trængsel på forskellige vejtyper og det fanges ikke op når COPERT sammenhængen anvendes (Smit m.fl. 2008).

Når det kommer til opgørelse af Danmarks nationale emissioner, vurderes COPERT dog generelt at være velfungerende. Det baseres bl.a. på sammenligning mellem beregninger baseret på COPERT og opgørelser baseret på brændstofsalg. Ovenstående diskussioner knytter sig derfor især til anvendelse af COPERT til emissionsberegninger efter trafikale analyser. For anvendelse af COPERT taler dog, at der ofte i trafikanalyser er meget små forskelle mellem beregninger med forskellige emissionsmodeller (f.eks. HBEFA og COPERT), at de tilgængelige metoder alle har en væsentlig fejlmargen og, at der ikke er en klar tendens mht. hvad der vurderes at være mest retvisende (Smit m.fl., 2010).

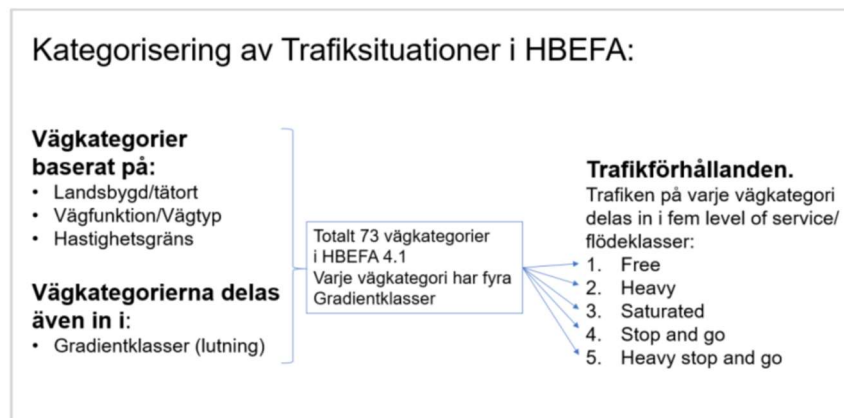
HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) er en emissionsmodel for trafiksituationer og kan ses som et alternativ til COPERT. HBEFA var oprindeligt et resultat af et samarbejde mellem Tyskland, Østrig og Schweiz, men i dag indgår også Frankrig, Norge, Sverige og Europa Kommissionen v. Joint Research Center (JRC). HBEFAs trafiksituationer er baseret by/land, fem vejklasser, forskellige tilladte hastigheder, og 4-5 trængselsniveauer (se figur 2 og 3). Håndbogen udvikles løbende på baggrund af ændringer af vejplanlægningen og f.eks. behov for at repræsentere nye trængselssituationer. Fra version 4 medtages således en 'heavy stop+go' (gennemsnitshastigheder på 5-10 km/t) trængselssituation og overordnede byveje med hastighedsgrænse på 30 km/t. Der opereres i dag med emissionsparametre i 365 forskellige trafiksituationer, herunder 5 niveauer af trængsel.

Figur 4 viser et eksempel på HBEFAs faktorer for energiforbrug til kørsel med svenske personbiler (2020) på tre forskellige vejtyper og i fem forskellige trafiksituationer for hver vejtype. Anvendelsen af HBEFA emissionsfaktorer forudsætter at trafikken fordeles på de forskellige belastningsgrader. Her vil der ofte være et behov for at 'oversætte' fra trafikdata/modeldata ved at kombinere med mere detaljerede måledata af f.eks. hastigheder (f.eks. VMZ Berlin Betreibergesellschaft mbH; SPV Spreeplan Verkehr GmbH, 2019) eller en fordeling af trafikken efter belastningsgrader (f.eks. Trafikverket, 2020; WSP 2020)

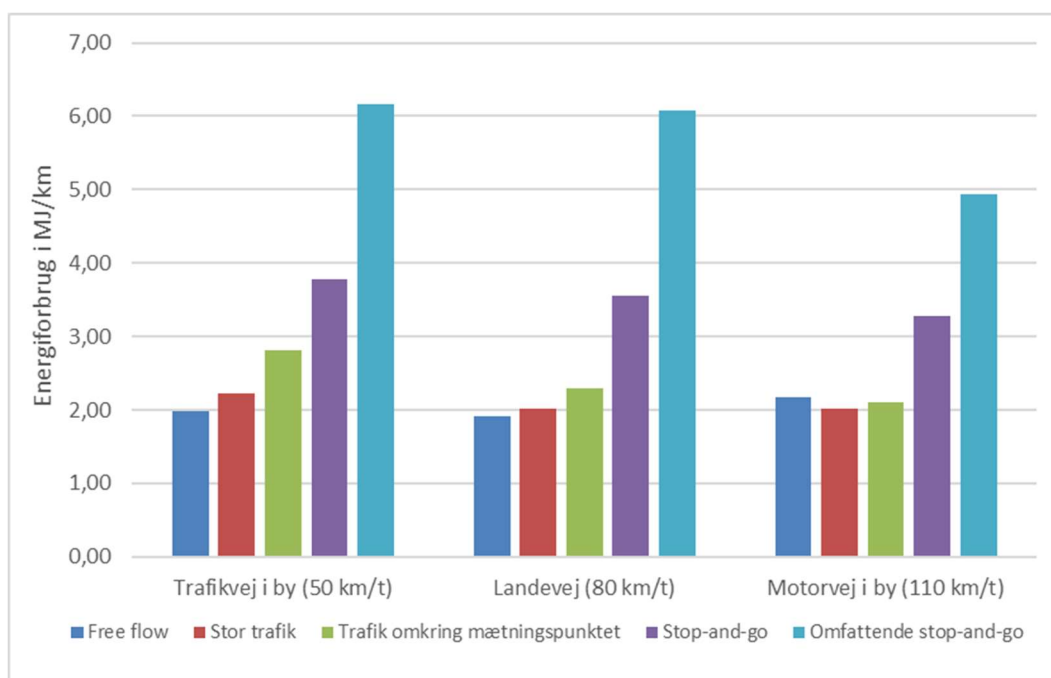
kombineret med antagelser om hvornår eller hvor stor en andel af trafikken, der skal antages afviklet over kapacitetsgrænsen som stop-and-go kørsel med lav hastighed og lavt samlet flow.



Figur 2: opdeling af trafikafviklingen i fire trafiksituationer/niveauer af trængsel (Boulter, McCrae, 2009).



Figur 3: HBEFAs inddeling af trafikken i trafiksituationer (WSP, 2020).



Figur 4: Energiforbrug pr. km for tre vejtyper og fem trafiksituationer. Udtræk fra HBEFA 4.1 for svenske personbiler 2020.

Den væsentlige forskel mellem emissionsfaktorer fra COPERT og HBEFA er, at COPERT 'hænger' alle forhold ved trafikafviklingen, der har betydning for emissioner, op på gennemsnitshastigheden mens HBEFA anvender en kombination af vejtyper (med forskellige tilladte hastigheder og behov for stop ved kryds o.l.) og trafiksituation/trængsel/belastningsgrader inden for hver vejtype. I HBEFA er trængselsgraden dermed klart repræsenteret, mens dette ikke er tilfældet for COPERT.

Ud over graden af trængsel må det forventes, at især antallet af kryds og tilsvarende konflikter har stor betydning for køremønstret og dermed emissioner. Hverken COPERT eller HBEFA tager direkte hånd om disse ting. For COPERT indgår det i gennemsnitshastigheden, mens det i HBEFA indgår i kombinationen af vejklassen og dens beliggenhed i by eller land.

Med trafikafhængige emissionsmodeller erstattes sammenhængen med gennemsnitshastigheden på tværs af alle vejtyper eller en inddeling af trafikken efter diskrete trafik- og trængselssituationer, med emissionsparametre, der afhænger af skalerbare parametre for trafikafviklingen på den enkelte vej. Der har været gjort forsøgt på at udvikle COPERT modellen i denne retning vha. sammenhænge mellem gennemsnitshastighed og emissioner for vejtyper (Samaras, 2020). Det lader imidlertid ikke til, at der i øjeblikket foreligger produkter/løsninger, der dækker alle vejtyper eller hastigheder og som dermed kan anvendes sammen med resultater fra en geografisk bredt dækkende strategisk trafikmodel som f.eks. GMM-modellen.

Når der er data til rådighed, der beskriver de enkelte køretøjers bevægelse i en høj opløsning, kan emissioner beregnes vha. emissionsmodeller, der baseres på data for kørecyklus. Data af denne type kan komme fra både mikrosimuleringsmodeller, GPS-data og video-optagelser og vil give en direkte beskrivelse af både hastighed og accelerationer, der kan indgå i emissionsberegningen. Eksempler på emissionsmodeller er f.eks. hollandske VERSIT+/EnViVo (v. TNO, NL), der både kan anvendes til at beregne emissioner baseret på en inddeling af ture/kørslen i klasser af køremønstre (tomgang, bykørsel, dynamisk bykørsel, aggressiv bykørsel, kørsel på landevej etc.) og til at beregne emissioner på baggrund af en løbende/instant logning (min. én koordinat i sekundet) af et køretøjs hastighed og acceleration (Lighterink og De Lange, 2009; Smith m.fl., 2007).

Mere detaljerede modeller som PHEM og MOVES kan tage højde for vindmodstand, rullemodstand, transmissionstab mv. – ud over hastighed og acceleration. De kan også anvendes i simplificeret form ved at indsætte gennemsnitsværdier for forskellige delelementer. Et eksempel på dette er MOVES-modellen, der generelt anvender motorbelastningen (VSP) i sine beregninger af emissioner og energiforbrug. Jiménez m.fl. (1999) simplificerede beregningen af VSP til brug på personbiler som gengivet nedenfor.

$$\text{Vehicle Specific Power (kW/ton pr. sekund) (1) = } 1,1VA + 9,81G + 0,000305(V + V_w)^2V$$

V=hastighed i m/s; A= acceleration i m/s<sup>2</sup>; G=gradient; V<sub>w</sub> = modvind i m/s. Parameterværdierne 1,1; 9,81 og 0,000305 repræsenterer typiske tab og modstande i US amerikanske personbiler (Jiménez m.fl. 1999).

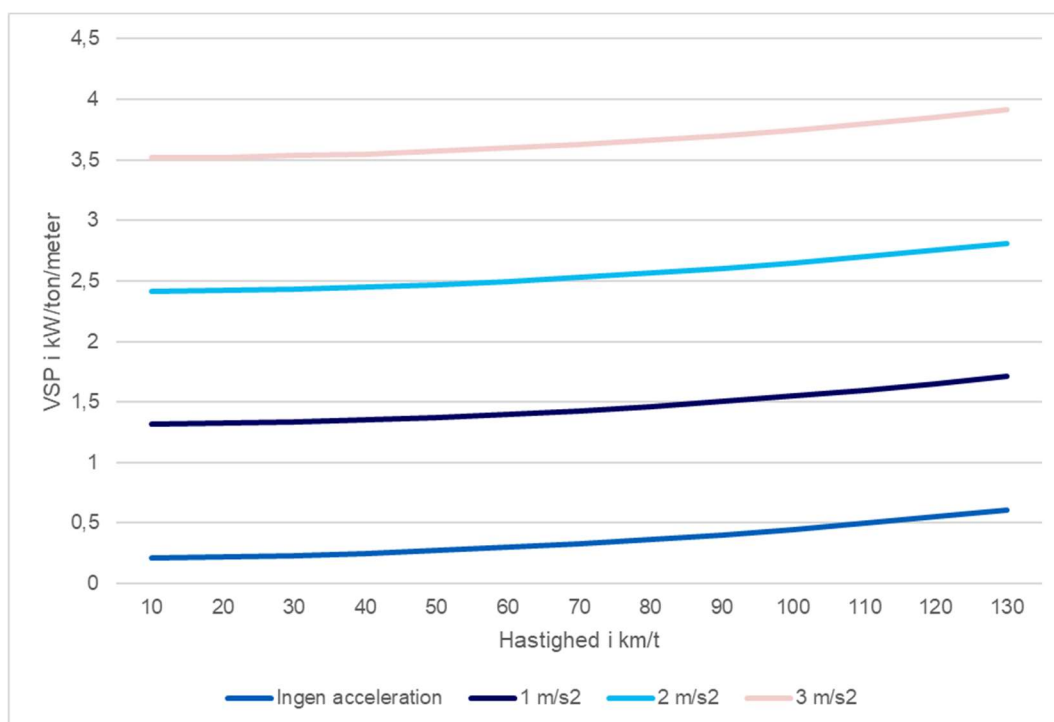
Zhao m.fl. anvender en yderligere simplificeret udgave under antagelse af, at vind og gradient i praksis ikke har betydning i de områder som beregninger skal gennemføres for.

$$\text{Vehicle Specific Power (kW/ton pr. sekund) (2) = } V(1,1A + 0,132) + 0,000302V^3$$

V=hastighed i m/s; A= acceleration i m/s<sup>2</sup>. Parameterværdierne 1,1; 0,132 og 0,000302 repræsenterer typiske tab og modstande i kinesiske personbiler (Zhao m.fl. 2019).

VSP er proportionalt med energiforbrug og emissioner inden for en række belastningsområder (størrelser af VSP – såkaldte VSP bins).

Figur 4 nedenfor illustrerer beregningen af motorbelastning (VSP) som en funktion af hastighed og niveauer af acceleration. I modellen har niveauet af acceleration stor betydning for resultatet med mulighed for at påvirke sammenhængen mellem motorbelastning og realiseret hastighed væsentligt hvis der knytter sig forskellige grader af acceleration til de forskellige hastigheder, hvad der typisk gør.



Figur 4: Beregnet energibehov (VSP: Vehicle Specific Power) til kørsel med personbil ved forskellige hastigheder og grader af acceleration (baseret på Jiménez m.fl. 1999 med antagelse om at gradient og modvind=0).

Hovedforskellen til de simple modeller som COPERT og HBEFA er, at disse lægger et niveau af acceleration eller hastighedsvariation på gennemsnitshastigheder eller trafiksituationer for at nå frem til et 'rigtigt' niveau for emissioner eller energiforbrug. Detaljerede modeller som MOVES forudsætter at både hastighed og accelerationer måles/opgøres i høj opløsning og dermed kan være et input til beregninger.

Kravene til input data er svære at opfylde i de fleste planlægningsundersøgelser. Kommercielle GPS-data har f.eks. begrænsninger knyttet til logningen, der kan medføre at accelerationer ikke kan måles præcist. Simulerede data fra mikrosimuleringsmodeller er ofte frembragt med henblik på at vurdere kapaciteten overordnet, men ikke nødvendigvis med henblik på at gengive de dele af adfærden der er væsentlige for motorbelastninger og emissioner. Undtagelser er mere målrettede indsamlinger/logninger af bildata eller behandling af videodata/droneoptagelser fra udvalgte områder. Samtidigt er det også muligt at opbygge/kalibrere simuleringsmodeller med henblik på at analysere emissioner og effekter af tiltag på emissioner. Graden af sammenfald med og evt. konflikt med anvendelser af simuleringer til kapacitetsanalyse er dog ikke velbeskrevet.

### 3. Hastigheder, trængsel og CO2 udledning fra personbiler på motorveje

Trængsel opstår ved høje belastningsgrader og kan generelt identificeres ved, at hastigheden er reduceret i forhold til 'normalen' for en given vejstrækning eller type. Sammenhængen mellem hastighed, trængsel og CO2-udledning fra trafikken vil være forskellig mellem forskellige vejtyper. De overordnede emissionsmodeller som COPERT og HBEFA enten blander vejtyper, hastigheder og trængsel - eller baserer sig på diskrete situationer, der gør det umuligt at følge et forløb og bl.a. vurdere skift og ekstremer. Logningen af brændstofforbruget i Connected cars biler har til gengæld givet en mulighed for direkte at vurdere sammenhængen mellem hastighed/trængsel og CO2 udledning for biler, der kører på danske motorveje.

Analysen har taget udgangspunkt i tidligere analyser af motorvejstrafik (Barth og Boriboonsomsin 2008; Zarin og Ardekani, 2015) og har haft fokus på at optegne/beskrive en bivariat sammenhæng mellem realiserede gennemsnitshastigheder på danske motorveje og CO2 udledning pr. bilkm. Med sit udgangspunkt i gennemsnitshastighed og kørsel over en vis afstand (en tur) er fremgangsmåden beslægtet med COPERT-tilgangen, men har derudover vægt på at opstille sammenhængen for en enkelt vejtype: motorvej.

#### Data

Sammenhængen mellem trængsel og CO2 udledning er baseret på analyse af data fra Connected Cars. Connected Cars indsamler GPS-data fra et stort antal personbiler tilmeldt tjenesten. Det gør det muligt at måle hastigheder og knytte kørslen til udvalgte motorvejsstrækninger. Fra en del af bilerne kan der også indsamles data for det løbende forbrug af brændstof igennem motoren (mindste mål: 1 dl). På dette grundlag kan CO2 udledning pr. km, for køretøjer der kører på de udvalgte motorvejsstrækninger, opgøres.

Analysen i projektet baseres på data for brændstofforbrug i Connected Cars biler, der kørte på Hillerødmotorvejen og Køge Bugt Motorvejen i slutningen af 2019 og begyndelsen af 2020. Derudover blev der indsamlet nye data for brændstofforbrug fra biler der kørte på Motorring 3, Østjyske motorvej og Nordjyske Motorvej i efteråret 2021. For 2021 har det dog vist sig alene at være muligt at indhente data fra dieselvarebiler. Da der for de større varebiler vil være en anden sammenhæng mellem hastighed og CO2



udledning, anvendes datasættet fra 2019-2020 derfor til at vurdere sammenhængen mellem hastighed og CO2 udledning på motorvej.

Connected Cars data består fortrinsvis af nyere biler (kun ca. 10% af bilerne i data er ældre end 2015), men derudover er der en bred dækning af forskellige bilstørrelser, benzin og dieslbiler. Som grundlag for analyserne er bilsammensætningen i data fra hver af de analyserede motorvejsstrækninger vejet af med henblik på at repræsentere det nationale trafikarbejde mht. motorstørrelse, benzin og dieslbiler bedst muligt. Gamle biler indgår dog i udgangspunktet ikke i data og tilsvarende har det heller ikke været muligt at analysere elbiler. Data vurderes dog at give en god repræsentation af sammenhængen mellem gennemsnitshastighed og CO2-udledning pr. km på motorvej for konventionelle biler. Elbiler har mulighed for at regenerere bremseenergi og må derfor forventes at blive påvirket mindre af trængsel og reduceret hastighed end konventionelle biler (se f.eks. COPERT modellens forskel mellem elbiler og konventionelle biler i figur 1). Lastbiler og busser er desuden ikke omfattet af data og analyse.

I det der fokuseres på sammenhængen med gennemsnitshastighed, betyder det, at gennemsnitshastighed kommer til at repræsentere en samlet effekt af hastighed og accelerationer, der igen er et resultat af trafiktæthed/trængselsgraden. Ser man på data, ligger størsteparten af observationerne i hastighedsområdet mellem 100 og 130 km/t og har en stor variation i accelerationer – herunder mange der kører stort set uden acceleration. For lavere hastigheder er det dog næsten alle der har en grad af acceleration – formentligt fordi den lavere hastighed er et udtryk for kørsel i tæt trafik med et større behov for at tilpasse kørslen til trafiksituationen. For lave hastigheder på motorvej er der således en systematisk (negativ) sammenhæng med de samlede accelerationer, der alt-andet-lige kan bidrage til at trække energiforbrug og CO2 udledning op. Zarin og Ardekanis (2015) analyser af hastighedsvariation ved kørsel på motorveje pegede tilsvarende på en hastighedsvariation, der er større/har større betydning for energiforbruget ved lave gennemsnitshastigheder.

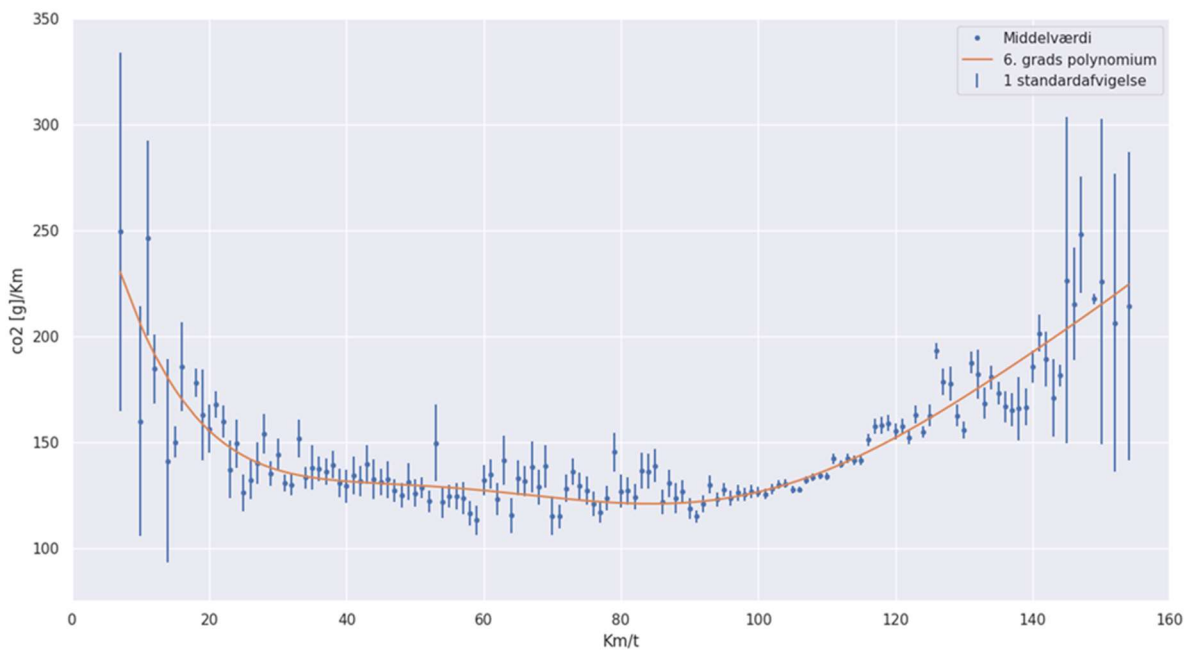
## Resultater

Sammenhængen mellem bilers gennemsnitshastighed og CO2 udledning på motorvej kan optegnes som et kurveforløb, hvor meget lave gennemsnitshastigheder giver høj CO2 udledning pr. bilkm og en hastighed mellem 50 og 90 km/t giver den laveste CO2 udledning. Højere hastigheder end 90 km/t, og især hastigheder over tilladt hastighed, giver høje CO2 udledninger pr. km (se figur 5).

Gennemsnitshastigheden på motorvejen er et udtryk for hvor stor trængslen er. Kørsel ved tilladt hastighed og over hastighedsgrænsen forudsætter at der ikke er trængsel. En gradvist stigende trafiktæthed/trængsel vil presse hastigheden under tilladt hastighed.

Kurveforløbet peger på at trængsel på motorvej kan medvirke til at reducere CO2 udledningen ved at sikre lavere hastigheder ned til omkring 90 km/t eller lavere. I den anden ende kan meget høje trængselsgrader også være med til at øge CO2-udledningen når trafiktætheden reducerer hastigheden til under 50 km/t.

Når der køres med mellem 90 og 50 km/t på motorvej er der meget små forskelle i CO2 udledningen pr. bilkm. De små forskelle i dette område må forventes at være fordi reduktioner i energibehovet til at opretholde gennemsnitshastigheden modvirkes af et større antal accelerationer pga. trafiktætheden.



Figur 5: sammenhæng mellem gennemsnitshastighed og CO2 udledning pr. bilkm på motorvej. Baseret på Connected Cars data fra ca. 12.000 biler der kørte på Køge Bugt Motorveje eller Hillerød Motorvejen i slutningen af 2019 eller begyndelsen af 2020. Observationerne er vejret op til landsgennemsnit for sammensætningen af det samlede trafikarbejde baseret på bilstørrelser og drivmidler.

På baggrund af tal fra trængselsopgørelsen for 2019 vurderes det at størsteparten af trafikken (ca. 82%) på motorvejen afvikles i et hastighedsområde hvor trængsel (en forøgelse af trængslen) vil medvirke til at reducere CO2 udledningen pr. km. Under spidsbelastninger på belastede strækninger medvirker trængsel også til at øge CO2 udledningen pr. km, men det berører kun en lille andel af den samlede motorvejstrafik (ca. 1,5%).

Der knytter sig nogen usikkerhed til at placere det trængselsniveau og den tilhørende hastighed hvor CO2 udledningen pr. bilkm er mindst. Det er en tendens i data at kurveforløbet mellem 40-50 km/t og 90 km/t er relativt fladt/konstant med svagt stigende CO2 udledning når hastigheden falder, men der er også en del usikkerhed ifht. det præcise forløb. Af denne grund betragtes hastighedsområdet 50-90 km/t som et samlet 'minimums område' hvor CO2 udledningen pr. bilkm er lavest (ca. 5,5% af motorvejstrafikken afvikles i dette 'grønne' område).

Der knytter sig også nogen usikkerhed til præcist hvor høj CO2 udledningen pr. km bliver ved meget lave og meget høje hastigheder. En stor del af trafikken afvikles omkring tilladt hastighed og mellem tilladt hastighed og 90 km/t. Der er derfor få observationer og en tilsvarende usikkerhed i 'yderområderne'.

At sammenhængen er baseret på benzin- og dieslbiler, må også ses som en begrænsning ved analysen. Elbilernes antal forventes gradvist at stige og det må forventes gradvist at ændre betydningen af trængsel med accelerationer og nedbremsninger for energiforbrug og udledning. De data der er adgang til, støtter dog ikke en tilsvarende analyse af elbiler.

Analysen afgrænset til at se på CO2 udledning ved kørsel på motorvejsstrækninger. Til- og frakørsel indgår ikke i opgørelserne af de enkelte bilers CO2 udledning. Dermed ses der bort fra den udledning der knytter sig til stop og køkørsel, når man kører igennem kryds for at komme af eller på motorvejen.

Endeligt er det i analysen valgt at analysere med udgangspunkt i en gennemsnitlig bil baseret på de forskellige bilstørrelser og drivmidlers anvendelse i Danmark. Der er forskelle i trafikens sammensætning

mellem forskellige vejtyper og lokaliteter – og det vil have nogen betydning for sammenhængen mellem emissioner og trafikafvikling. Dette har dog heller ikke været en del af de gennemførte analyser.

## Konklusioner

Der er flere typer af emissionsmodeller, der i forskellig grad understøtter en vurdering af betydningen af hastigheder eller trængsel. På det mest overordnede niveau knyttes emissionsfaktorer til gennemsnitshastigheder (COPERT) eller kombinationer af vejtype, tilladt hastighed og trængselsgrad (HBEFA). På et mere detaljeret niveau kan emissionsfaktorer beregnes på baggrund af informationer om et køretøjs hastighed og accelerationer i løbet af en tur/strækning. Den detaljerede beregning stiller dog store krav til datagrundlaget, der ofte ikke kan opfyldes i planlægningsundersøgelser.

Modeller som COPERT og HBEFA er blandt de mest anvendte i planlægningsundersøgelser hvor grundlaget kommer fra trafikmodeller el.lign. Med data fra trafiksimuleringer, videoer eller i nogle tilfælde GPS kan der gennemføres beregninger med mere detaljerede modeller.

For at få et detaljeret billede af betydningen af hastigheder og trængsel for CO<sub>2</sub> udledningen fra biler på danske motorveje blev der gennemført en analyse baseret på logningen af brændstofforbruget i Connected cars biler.

Der blev opstillet en bivariat sammenhæng mellem gennemsnitshastighed og CO<sub>2</sub> udledning ved kørsel på motorvej hvor hastigheden må ses som et udtryk for trængselsgraden. Sammenhængen viser at meget lave gennemsnitshastigheder modsvarer en høj CO<sub>2</sub> udledning pr. bilkm, hastigheder mellem 50 og 90 km/t modsvarer en lav udledning, mens højere hastigheder end 90 km/t, og især hastigheder over tilladt hastighed, giver høje CO<sub>2</sub> udledninger pr. km. Sammenhængen betyder at trængsel på motorvej ofte er med til at reducere udledningen af CO<sub>2</sub> pr. bilkm, men at meget høje trængselsgrader også kan være med til at forøge udledningen pr. km.

Der var ikke mulighed for at inddrage elbiler og større køretøjer end person- og varebiler i analyserne. Samtidigt fokuserer analysen alene på motorvejskørsel uden at medtage kørsel igennem kryds/tilslutningsanlæg eller kørsel på andre veje. Som nævnt vil sammenhængen mellem hastighed og energiforbrug/CO<sub>2</sub> udledning være forskelligt fra vejtype til vejtype. Det skyldes bl.a. at trængslen vil have forskellig betydning for energiforbrug/CO<sub>2</sub> udledning afhængigt af vejtypen. For mange byveje vil en øget trængselsgrad således ofte medvirke til at øge energiforbruget under kørsel i forhold til en vej uden trængsel.

## Referencer

- Barth, M., Boriboonsomsin, K. 2008. Real-World carbon dioxide impacts of traffic congestion, Transportation Research Record 2058, pp. 163-171
- Boulter, P.G., McCrae, I.S. (Eds) 2009. Artemis: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems – final report, TRL, PPR350 url: <http://trl.demo.varistha.co.uk/publications/ppr350>
- EMEP, EEA 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories, EEA report no. 13/2019. url: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019> ; <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view> ; Appendix 4 - Varme emissionsfaktorer (excel): <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/road-transport-appendix-4-emission/view>
- 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, WSP. url: [https://www.hbefa.net/e/documents/Ericsson Steven 2019 HBEFA41 Development WP2 final.pdf](https://www.hbefa.net/e/documents/Ericsson%20Steven%202019%20HBEFA41%20Development%20WP2%20final.pdf) ; <https://www.hbefa.net/e/index.html>
- Grote, M., Williams, I., Preston, J., Kemp, S. 2016. Including congestion effects in urban road traffic CO2 emissions modelling: Do local government authorities have the right options?, Transportation Research Part D 43, 95-106
- HBEFA 2021. <https://www.hbefa.net/e/index.html> . Sidst tilgået 15 februar 2021.
- IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 3, Mobile Combustion. url: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> ; (2019) <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- Jiménez, J.L., McClintock, P., McRae, G.J., Nelson, D.D., Zahniser, M.S. Vehicle Specific Power: A Useful Parameter for Remote Sensing and Emission Studies, 9th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, April 21st 1999
- Kanagaraj, V., Treiber, M. 2019. Fuel-consumption and CO2 emissions models for traffic, I: Palocz-Andresen et al. (Eds.), International Climate Protection, Springer Nature, Switzerland.
- Lejri, D. Leclercq, L. 2020. Are average speed functions scale-free? Atmospheric Environment 224, 117324
- Lejri, D., Can, A., Schiper, N., Leclercq, L. 2018. Accounting for traffic speed dynamics when calculating COPERT and PHEM pollutant emissions at the urban scale. Transportation Research part D: Transport and Environment 63, pp 588-603
- Ligterink, Norbert E., and Ronald De Lange. "Refined vehicle and driving-behaviour dependencies in the VERSIT+ emission model."
- Samaras, C. E. 2020. Mesoscale modeling of the impacts of congestion and ITS measures on vehicle energy consumption and greenhouse gas emissions over urban road networks, Ph.D. Thesis, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, October 2020.
- Smit, R., Brown, A.L., Chan, Y.C. 2008. Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow?, Environmental Modelling and Software 23, 1262-1270
- Smit, R., Ntziachristos, L., Boulter, P. 2010. Validation of road vehicle and traffic emission models – a review and meta analysis, Atmospheric Environment 44, 2943-2953
- Smit, Robin, Richard Smokers, and Elke Rabé. "A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+." Transportation Research Part D: Transport and Environment 12.6 (2007): 414-422.

Trafikverket 2020. Bygg om eller bygg nytt, Effektsamband för transportsystemet, Fyrstegsprincipen, steg 3 och 4, Kapitel 7 Miljö, Trafikverket: Borlänge

VMZ Berlin Betreibergesellschaft mbH; SPV Spreeplan Verkehr GmbH, 2019. Berechnung der Fahrleistungen im Haupt- und Nebennetz sowie Ableitung der HBEFA-Verkehrszustände für die Prognosejahre 2020 und 2025 Abschätzung der verkehrlichen Auswirkungen von Dieselfahrverboten, Schlussbericht, Berlin, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz

Winther, M. 2018. Danish emission inventories for road transport and other mobile sources, Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy no. 277, 2018. url:

<https://dce.au.dk/udgivelser/vr/nr-251-300/abstracts/nr-277-danske-emissionsopgoerelser-til-vejtransport-og-andre-mobile-kilder/>

WSP 2020. Trafikarbetets fördelning på HBEFA-modellens trafiksituationer, Dokumentation av arbetet 2019-20, Rapport for IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Zarin, B. and Ardekani, S. (2015) The Relation between Freeway Average Speed and Speed Noise. *Journal of Transportation Technologies*, 5, 88-101. doi: [10.4236/jtts.2015.52009](https://doi.org/10.4236/jtts.2015.52009).

Zhao, Q., Chen, Q., Wang, L., Real-Time Prediction of Fuel Consumption Based on Digital Map API, *Applied Sciences* 2019, 9, 1369