

2019:00982 - Åpen

# Rapport

## Metodeutvikling for modellering av høyere fartsgrenser

Oppdatering av farts- og energimodul for beregning av kjørefart og utslipp.

### Forfattere

Odd Andre Hjelkrem  
Petter Arnesen  
Sahar Babri  
Anders Straume  
Rebecka Snefugli Sondell





EMNEORD:  
Kjørefart  
Fartsgrense  
Motorveg  
Utslipp

# Rapport

## Metodeutvikling for modellering av høyere fartsgrenser

Oppdatering av farts- og energimodul for beregning av kjørefart og utslipp.

**VERSJON**

1.0

**DATO**

2020-02-03

**FORFATTERE**

Odd Andre Hjelkrem  
Petter Arnesen  
Sahar Babri  
Anders Straume  
Rebecka Snefugli Sondell

**OPPDRAGSGIVERE**

Nye Veier og Statens vegvesen

**OPPDRAGSGIVERS REF.**

Metodeutvikling – SINTEF

**PROSJEKTNR**

102019751

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

40

**SAMMENDRAG**

Rapporten beskriver en utvidelse av gjeldende metodikk for estimering av kjørefart og utslipp i verktøy for modellering av transport (RTM) og nytte/kostnadsanalyser (EFFEKT). Bakgrunnen for prosjektet er et behov for å gjøre beregninger for veger med fartsgrense som er høyere enn de som finnes på norske veger i dag, med hovedfokus på 120 km/t. Arbeidet er todelt, hvor den første delen fokuserer på å estimere gjennomsnittlig kjørefart i høyere fartsgrenser basert på datainnsamling fra tilsvarende veger i utlandet, samt en vurdering av fartsnivå ved norske forhold. Den andre delen av arbeidet omhandler modellering av drivstofforbruk og utslipp, og spesielt innføring av virkningsgradsfunksjoner som erstatning for virkningsgradskonstanter. Dette arbeidet er basert på utslippsmålinger fra europeisk typegodkjenning.

**UTARBEIDET AV**

Odd André Hjelkrem

**KONTROLLERT AV**

Anders Straume

**GODKJENT AV**

Unn Karin Thorenfeldt

**RAPPORTNR**

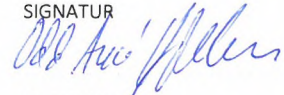
2019:00982

**ISBN**

978-82-14-06370-7

**GRADERING**

Åpen

**SIGNATUR****SIGNATUR****SIGNATUR****GRADERING DENNE SIDE**

Åpen



# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b> .....	<b>5</b>
<b>Summary</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>11</b>
1.1 Beskrivelse av fartsberegning i fartsmodulen.....	12
1.2 Beskrivelse av utslippsberegninger i fartsmodulen .....	13
<b>2 Oppdatering av metodikk for beregning av kjørefart i fartsmodulen</b> .....	<b>15</b>
2.1 Metode .....	15
2.2 Relevante kilder fra litteratursøket .....	15
2.2.1 Trafikkdatabaser .....	15
2.2.2 Data fra litteratur og web.....	16
2.2.3 Fartsmodeller .....	16
2.3 Resultat.....	17
2.3.1 Friflytsfart $C(x_g)$ .....	17
2.3.2 Geometrisk fartspåvirkning .....	18
2.4 Supplerende datainnsamling .....	19
2.4.1 Filtrering av datasett .....	19
2.4.2 Beskrivelse av datasett .....	19
2.4.3 Resultater .....	20
2.5 Anbefalte koeffisienter for oppdatering av fartsmodell for lette kjøretøy.....	23
2.6 Andre faktorer som kan påvirke kjørefart .....	25
<b>3 Estimering av virkningsgradsfunksjoner i fartsmodulen</b> .....	<b>27</b>
3.1 Datagrunnlag .....	27
3.2 Teori.....	29
3.2.1 Willans approksimasjon.....	30
3.3 Estimeringsmetodikk .....	31
3.3.1 Preparering av data .....	32
3.4 Resultater fra estimering .....	33
3.5 Validering.....	34
3.6 Anbefalte funksjoner for oppdatering av fartsmodul.....	35
<b>4 Oppsummering</b> .....	<b>37</b>
<b>Referanser</b> .....	<b>38</b>



## Sammendrag

I forbindelse med at Nye Veier og Statens vegvesen ønsker å utrede konsekvenser av høyere fartsgrenser, beskriver denne rapporten en videreutvikling av fartsmodulen som brukes i regionale transportmodeller (RTM) og nytte/kostnadsverktøyet EFFEKT. Arbeidet fokuserer på temaene kjørefart samt energiforbruk og utslipp, og mer spesifikt, vurderes utviklingen av kjørefartsberegningene og virkningsgradsfunksjonene i fartsmodulen. Før dette prosjektet var fartsmodulen begrenset oppover til fartsgrenser på 100 km/t, som følge av begrenset erfaringsmateriale fra høyere hastigheter, og var dermed dårlig egnet for å estimere kjørefart ved høyere fartsgrenser. Også utslippsberegningene er videreutviklet, da de tidligere var basert på en konstant som ikke ivaretar faktorer som last og turtall på motoren.

## Kjørefart

Fartsmodulen estimerer kjørefart basert på en regresjonsmodell hvor vegens egenskaper er inkludert som variabler. I hovedsak er dette egenskapene dekkebredde, stigning/fall, antall felt og fartsgrense. For hver mulig kombinasjon av egenskaper er det estimert en kjørefart som er et uttrykk for ønsket gjennomsnittsfart på en strekning. Denne kjørefarten danner utgangspunktet for estimering av fartsprofil på strekningen gitt egenskaper ved kjøretøy og sjåfør. Med fartsprofil menes her en mer detaljert fremstilling av fart, for eksempel en estimert fartsverdi per sekund eller per 20 meter langs en lengre strekning.

Datagrunnlaget for fartsmodulen er hovedsakelig data fra trafikkregistreringsstasjoner for å estimere fart basert på antall felt og fartsgrense, samt data fra GPS-registreringer langs veg for å estimere effekt av dekkebredde og stigning/fall på kjørefart. Tidligere versjoner av fartsmodulen har vært begrenset til fartsgrense 100 km/t på grunn av begrensninger i daværende datagrunnlaget. I dette arbeidet har datagrunnlaget blitt utvidet for å kunne estimere kjørefart opp til fartsgrenser på 120 km/t.

Fremgangsmåten for å utvide datagrunnlaget har tatt utgangspunkt i å finne observasjoner om fartsvalg i høyere fartsgrenser. I Norge er høyeste tillatte fartsgrense 110 km/t, så det er derfor sett på om det eksisterer erfaringsgrunnlag i utlandet. Her er det hentet erfaringer fra naboland, som viser en tendens til at gjennomsnittlig kjørefart øker med fartsgrense opp til ca 110 km/t. I fartsgrenser 120 og 130 km/t er observert fartsnivå noe lavere enn fartsgrense. Det kan spekuleres i at fartsvalg er et resultat av vegens geometri og personlige preferanser, og at fartsgrense er en begrensning på fartsvalg i fartsgrenser opp til 110 km/t. Det er derimot ikke rapportert noen funn som støtter opp under dette.

På grunn at av det har blitt flere veger med fartsgrense 110 km/t siden fartsmodellen ble estimert første gang, har det blitt gjort en supplerende datainnsamling fra norske trafikkregistreringspunkt. Dette har blitt brukt til å reestimere koeffisienter for referansefart, basert på observert friflytsfart. Begrepet friflytsfart er her definert som gjennomsnittlig fart for trafikanter med en tidsluke forover og bakover i samme kjøreretning på mer enn 5 sekunder. For et kjøretøy som kjører i 100 km/t (=27,78 m/s) innebærer det omtrent 140 meter til neste kjøretøy, både fremover og bakover. Dette er gjort for å unngå eventuelle effekter andre trafikanter kan ha på fartsvalg. Grensen på 5 sekunder er basert på analyser av fartsobservasjoner, som viser at fartsvalget stabiliserer seg i dette området.

Observasjonene for friflytsfart for to- og flerfeltsveger i alle fartsgrenser er vist i tabellen under. Tallene er basert på en supplerende datainnsamling i 2018/2019, samt en tidligere datainnsamling fra 2015.

Tabell 1: Tallverdier for gjennomsnitt friflytsfart og antall observasjoner for lette kjøretøy på tofelts- og flerfeltsveier

Fartsgrense	Tofeltsveier			Flerfeltsveier		
	Gjennomsnitt (km/t)	Antall målestasjoner	Antall observasjoner	Gjennomsnitt (km/t)	Antall målestasjoner	Antall observasjoner
30	31,4	1	59 689	--	0	0
40	43,0	5	1 648 190	--	0	0
50	50,3	21	5 209 784	52,6	4	519 362
60	59,4	26	5 797 012	65,1	2	965 029
70	72,5	13	2 188 594	74,9	6	341 881
80	80,5	30	4 356 247	86,6	5	327 145
90	86,4	1	104 828	97,3	6	550 148
100	--	0	0	105,7	12	1 280 800
110	--	0	0	110,0	4	419 269

Observasjonene er gjort i tidsperioden uke 33-38, både i 2015 og 2018, for å utelukke påvirkning av sesongvariasjoner. Dette danner grunnlaget for nye anbefalte verdier for referansefart i fartsmodulen. For fartsgrense 120 km/t er det anbefalt en referansefart på 115 km/t til fartsmodulen. Dette er basert på observert trend i datamaterialet presentert i tabellen over, samt observasjoner fra Sverige og Danmark.

## Utslipp

Energimodulen baserer seg på en estimert fartsprofil som grunnlag for utslippsberegninger. Ved å legge generelle fysiske lover til grunn for energibehov knyttet til å forflytte et objekt langs en rute, blir det teoretiske behovet for effekt fra en motor langs hele fartsprofilen estimert. I tidligere versjoner av fartsmodulen har motorens effektivitet vært representert ved en konstant, som ga et fast forhold mellom drivstoffbehov og energi levert til hjulene som et resultat av forbrenning. I mange tilfeller vil dette være en god nok tilnærming. Unntakene fra dette er der hvor en antar at motorens effektivitet vil være lavere, som for eksempel ved høye fartsnivå. Derfor er det i dette prosjektet estimert virkningsgradsfunksjoner, for å forsøke å fange opp at motoren ikke er like effektiv i alle bruksområder.

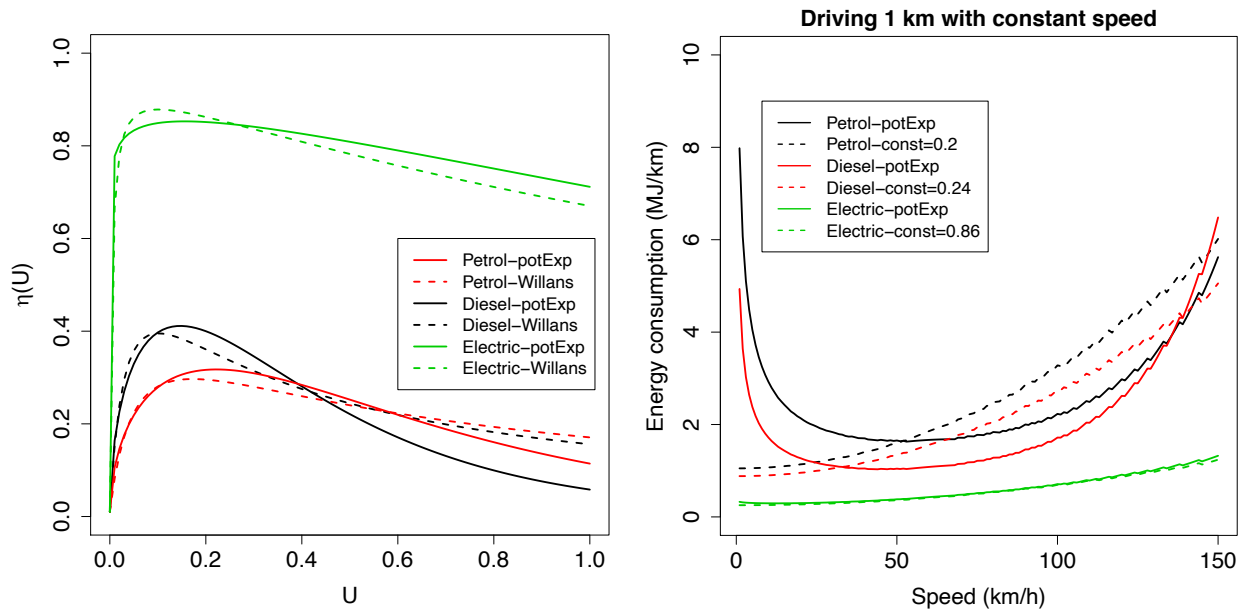
En modellering av bilmotorer i form av virkningsgradsfunksjoner krever data og/eller kunnskap om de sammenhenger og mekanismer som spiller inn. Da det her er snakk om å estimere virkningsgradsfunksjoner for en generell bilpark hvor en skiller kun på energibærer (diesel/bensin/elektrisitet), er det formålstjenlig med datasett på samme nivå. En datakilde som er benyttet i dette prosjektet er data fra europeiske typegodkjenninger. Dette er laboratoriemålinger av alle nye kjøretøy som blir solgt i Europa, hvor det også blir registrert CO<sub>2</sub>-utslipp. Typegodkjenningen er så veldefinert i utførelse at man kan betrakte hver måling som et datapunkt, hvor bilens egenskaper er input og målt CO<sub>2</sub>-utslipp er output. Det elementet som er ukjent er motorens virkningsgrad, men ved å modellere hver typegodkjenning, kan man estimere en virkningsgradsfunksjon ved å minimere avviket mellom observert og estimert CO<sub>2</sub>-utslipp.

I utgangspunktet kunne estimeringen startet med en hvilken som helst kurve for å representere virkningsgradsfunksjonen, men basert på forventet atferd er det benyttet to utgangspunkt. Den første er Willans approksimasjon, som er en forenklet representasjon av sammenheng mellom effektbehov fra motoren og dens virkningsgrad. Den andre er benevnt potExp, etter kurveformen.



Basert på typegodkjenningstester fra 24 000 bensinbiler, 35 000 dieselmotorer og 4 500 batterielektriske biler, ble det estimert tre ulike virkningsgradsfunksjoner for hvert teoretiske utgangspunkt. Disse er vist i figuren til venstre under. Her ser en at hver kurve har et veldefinert toppunkt, og at det er forskjeller mellom energibærere. Den viser også at batterielektriske biler har best virkningsgrad, og at bensinbiler har generelt lavest virkningsgrad. Begrepet relativt effektuttak ( $U$ ) sier noe om hvor mye effekt motoren må levere, relativt til sin maksimale effekt. Det vil si at situasjoner som krever mye effekt fra motoren, som høy kjørefart, store akselerasjoner, bratte stigninger o.l., vil ligge til høyre i figuren. I dette området ser en at virkningsgraden er lav, som betyr at energi inn til motoren, i form av drivstoff, er høyere enn andre områder i figuren, for å levere tilsvarende mengder energi til fremdrift.

Resulterende drivstofforbruk ved økende kjørefart er vist i figuren til høyre under. Kurvene er beregnet for kjøretøy med konstant fart langs en strekning på 1 km. Stiplet linje viser resultater med konstant virkningsgrad, som var implementert i tidligere versjoner av fartsmodulen. Heltrukket linje viser resultater med virkningsgradsfunksjoner, som er implementert i nye versjoner av fartsmodulen. Det understrekes at egenskaper ved kjøretøyet vil avgjøre formen på kurven, og dette er et eksempel for et kjøretøy med vekt 1500 kg og en motor på 100 kW.



Figur 1: Til venstre: Estimert virkningsgrad som funksjon av relativt effektuttak. Resultatene er vist for potExp-formelen i heltrukket linje og stiplet linje for Willans-formelen. Til høyre: Estimert energiforbruk fra en personbil på 1500 kg med motor på 100 kW, gitt kjøring i konstant fart. Stiplet linje er med konstant virkningsgrad, heltrukket linje er med estimerte virkningsgradsfunksjoner.

## Summary

This report describes updates in the methodology for estimation of speed and fuel consumption in tools for transport modelling and cost benefit calculation in Norway, more specifically RTM (Regional Transport Model) and EFFEKT. The project has been financed by the system owners of RTM and EFFEKT, with special regard to the need for modeling effects of higher speed limits on Norwegian motorways. The methodology for estimating speed and fuel consumption is a part of the Energy Module (EM), which before this project was limited to roads with speed limits below 100 km/h, due to limitations in the original data set used for estimating speed in the EM. The fuel consumption methodology is further developed to include engine efficiency functions, as opposed to the previous energy efficiency constants, in order to better capture effects of higher vehicle speeds.

## Operating speed

The EM estimate operating speed based on a regression model where the variables are road properties such as pavement width, slope, number of lanes and speed limit. For each combination of properties, a desired speed is estimated as an average speed for a section. This forms the basis for estimation of a speed profile which also include properties of the vehicle and driver. Speed profile is here defined as a detailed representation of operating speed with a typical resolution of 1 Hz, alternatively 20 meters.

The data set used for the speed estimation is mainly collected from automatic traffic detection sites and GPS-logs. Previous versions of the EM were limited to roads with a maximum speed limit of 100 km/h, due to limitations in the original data set used for the estimation. In this report, the data set has been extended to estimate speeds up to 120 km/h. As the highest allowed speed limit in Norway is 110 km/h, the data set is only extended up to this value for data from detection sites. The speed estimation for higher speed limits than 110 km/h are based on experiences drawn from similar countries with higher allowed speed limits. Here, we see a tendency of compliance between average speed and speed limit up to 110 km/h. However, for 120 and 130 km/h, the average speed is somewhat lower than the speed limit. We hypothesize that the speed limit is the limiting factor up to 110 km/h, and that road geometry and personal preferences are the limiting factors for higher speed limits. However, we did not find any literature or data to properly test this hypothesis.

As 110 km/h was recently introduced as an allowed speed limit in the original estimation, a supplementary data collection has been performed from detection sites. This data set was used for a re-estimation of coefficients for reference speed, based on free flow speed. The term free flow speed is here defined as the average speed for vehicles with a time gap higher than 5 seconds, in both directions in the same driving direction. For a vehicle driving in 100 km/h (= 27,78 m/s), the distance gap is approximately 140 meters to the next vehicle, either to the rear or front. This definition is used to exclude any disturbances from other vehicles on the speed choice. The 5 second limit is based on an analysis of speed observations, showing that the average speed converges to a value at gaps around 5 seconds.

A summary of the speed observations for two lane and multilane roads is shown in the table below. These numbers are based on the original data collection in 2015, and the supplemental data collection in 2018/2019.

Table 2: Values for average free flow speed and number of observations for cars on two lane and multilane roads.

Speed limit (km/h)	Two lane roads			Multilane roads		
	Average speed (km/h)	Number of registration sites	Number of observations	Average speed (km/h)	Number of registration sites	Number of observations
30	31,4	1	59 689	--	0	0
40	43,0	5	1 648 190	--	0	0
50	50,3	21	5 209 784	52,6	4	519 362
60	59,4	26	5 797 012	65,1	2	965 029
70	72,5	13	2 188 594	74,9	6	341 881
80	80,5	30	4 356 247	86,6	5	327 145
90	86,4	1	104 828	97,3	6	550 148
100	--	0	0	105,7	12	1 280 800
110	--	0	0	110,0	4	419 269

The observations were made in week 33 to 38, in both 2015 and 2018, to exclude effects from seasonal variations. This form the basis for recommended values for reference speed in the EM. For a speed limit of 120 km/h, a reference speed of 115 km/h is recommended, based on an observed trend in the data set, as well as observations from Sweden and Denmark.

### Fuel consumption

The EM use the estimated speed profile as a basis for calculating fuel consumption. By applying well known equations for vehicle dynamics, the energy demand for moving a vehicle along a specific route is calculated. The resolution of the energy demand is the same as the speed profile, and represents the theoretical power demand from the drive line of the vehicle. In previous versions of the EM, the efficiency of the engine has been modelled as a constant value, resulting in a fixed relationship between fuel consumption and energy delivered to the wheels due to combustion. In many cases, this approach is satisfactory. However, there are some situations where the efficiency is lower, e.g. for high speeds. Therefore, a set of efficiency functions are estimated in the project, to better model the operational properties of an engine.

A detailed model of engine mechanisms requires detailed data about the input and output for engines. Because the EM contain vehicle types differentiated on energy carriers, a dataset on the same level is sufficient. In this project, we used data from European type approvals, which are laboratory tests of all new vehicle models sold in Europe, where CO<sub>2</sub>-emissions are measured. Type approvals are so well defined, that each vehicle test may be considered as an experiment, with the vehicle properties as input, and CO<sub>2</sub>-emission as output. The unknown element is the engine efficiency function, but this can be estimated by minimizing the deviation between measured and estimated CO<sub>2</sub>-emission.

The starting point of the estimation could in theory be any function representing the engine efficiency, but two specific functions are used based on expected shape of the function. The first function is Willans approximation, which is a simplified representation of the relationship between required power delivered from the engine and efficiency. The second function is named potExp after its functional form.

Based on type approvals of 24 000 petrol cars, 35 000 diesel cars and 4 500 electric cars, efficiency functions were estimated for each fuel type, and for each theoretical starting point. These are shown to the left in the figure below. Here, we see that each function has a defined maximum, and that there are some differences

between each fuel type. It also shows that electric cars have the highest efficiency, while petrol cars in general have the lowest efficiency. The term relative power is defined as the power delivered from the engine relative to the maximum power of the engine. From this, we see that power demanding situations such as high speeds, high accelerations and steep slopes will operate in the right section of the functions. In this area, the efficiencies are relatively low, which means that the amount of fuel demand from the engine is higher per unit delivered to the wheels.

The resulting fuel consumption as a function of constant speed over 1 km is shown in the figure to the right. Dotted lines show the results using a constant engine efficiency, which was previously used in the EM. Solid lines show the equivalent results using engine efficiency functions. The results are highly dependent on vehicle properties, and the example below is based on a vehicle weighing 1500 kg and with an engine power of 100 kW.

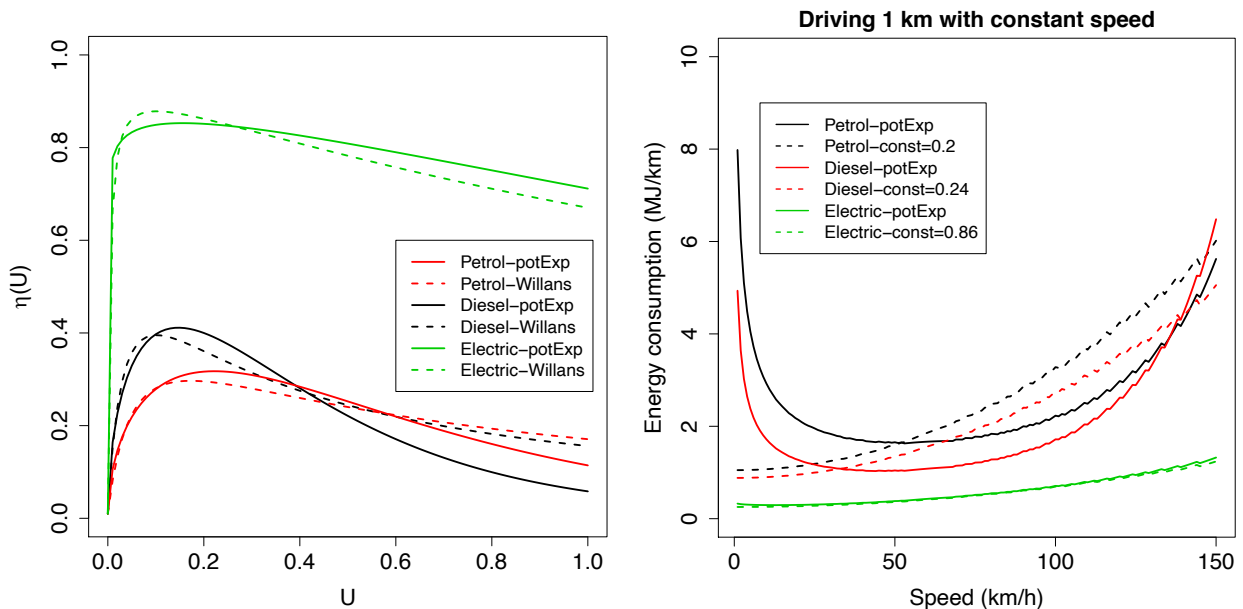


Figure 2: Left: Estimated engine efficiency as a function of relative power. Results are shown for the potExp-function in dotted lines, while solid lines are based on the Willans approximation. Right: Estimated energy consumption for a car weighing 1500 kg and with an engine power of 100 kW, driving at constant speed. Dotted lines represent constant engine efficiencies, while solid lines are estimated with engine efficiency functions.

## 1 Innledning

Denne rapporten beskriver et prosjekt som er utført for å videreutvikle metodikken for analyser av vegprosjekter, med spesifikt fokus på kjørefart, energiforbruk og utslipp, slik at metodikken også egner seg for analyser av høyere hastigheter. Bakgrunnen for dette er at Nye Veier og Statens vegvesen ønsker å utrede konsekvenser av å bygge veg med fartsgrense over 110 km/t. På oppdrag fra Nye Veier gjennomførte SINTEF i 2018 et forprosjekt for å vurdere behov for tilpassing og videreutvikling av aktuelle deler av dagens metodikk og verktøy for analyser av vegprosjekter, til bruk i overordnet planlegging (bl.a. NTP). Dette var primært knyttet til bruk i analyser av prosjekter som er planlagt for høyere fartsgrenser enn dagens metodikk er beregnet på, opptil 120-130 km/t. Som en videreføring av dette forprosjektet ble det satt i gang et eget prosjekt for å behandle temaene **kjørefart** samt **energiforbruk og utslipp**. Her er også Statens vegvesen med som oppdragsgiver. Resultatet av arbeidet er dokumentert i denne rapporten.

Per i dag er farts- og energimodulen, som brukes for å beregne kjørefart i analyseverktøyene RTM (Malmin m.fl. 2019) og EFFEKT (Statens vegvesen 2015a og 2015b), begrenset oppad til fartsgrenser på 100 km/t (selv om det kan være mulig med 110 km/t i inndata). Hvis det gjøres beregninger med 100 og særlig 110 km/t, er dette helt i «ytterkant» av dagens bruksområde. Hovedgrunnen til dette er at fartsmodulen er basert på observerte data, og på tidspunktet fartsmodulen ble estimert, fantes det en begrenset mengde data fra veger med fartsgrense 100 og 110 km/t. Dagens fartsmodell er estimert på grunnlag av data fra norske veger (data før 2015, opptil 100 km/t). I forbindelse med at en utredning av konsekvenser av høyere fartsgrenser, er det vurdert hvordan fartsmodulen kan videreutvikles for å kunne beregne en kjørefart på strekninger med høyere fartsgrenser. På grunn av at fartsmodulen er basert på data, vil det være nødvendig å ha erfaringsmateriale som en del av grunnlaget for metodeutvikling. For norske veger finnes det forholdsvis begrenset erfaringsmateriale for 100 km/t, enda mindre for 110 km/t og (selvsagt) ingenting for 120 og 130 km/t. Slik vi ser det er det for lite grunnlag for å bruke dagens metodikk for lavere fartsgrenser direkte som utgangspunkt for høyere fartsgrenser, og det er bakgrunnen for dette arbeidet.

Også beregningen av energiforbruk og utslipp trenger forbedringer for å gi mer realistiske prediksjoner. Særlig virkningsgradsparameterne, som benyttes i energimodellen i fartsmodulen, har potensial for forbedring. Per i dag er dette en konstant verdi, mens den i realiteten vil være en funksjon av blant annet last og turtall på motor. En grunnleggende antagelse for videreutviklingen er at virkningsgraden avtar ved økende kjørefart, som vil føre til økt energiforbruk og utslipp. Derfor må det teoretiske grunnlaget undersøkes og eventuelt forbedres for at beregningene representerer observerte sammenhenger.

Gjennom dette arbeidet er også en del av metodegrunnlaget for lavere fartsgrenser behandlet, slik at alle fartsgrenser opp til opptil 120 km/t er dekket. De oppgraderte virkningsgradsfunksjonene og kjørefartsberegningene som presenteres i denne rapporten er implementert i siste versjon av farts- og energimodulen, og vil være tilgjengelig fra og med versjon 4.1 av RTM og versjon 6.71 av EFFEKT.

Videre i kapittel 1 er det presentert en beskrivelse av fartsmodellen og utslippsberegningene som brukes i fartsmodulen i dag, basert på Hjelkrem m.fl. (2017). Deretter diskuteres utviklingen av kjørefartsberegningene i kapittel 2, som avsluttes med en anbefaling av nye koeffisienter for fartsmodellen. Kapittel 3 tar for seg videreutviklingen av virkningsgradsfunksjonene og presenterer anbefalte funksjoner for personbiler for neste versjon av fartsmodulen. Kapittel 5 sammenfatter funnene og konkluderer rapporten.

## 1.1 Beskrivelse av fartsberegning i fartsmodulen

Dagens fartsmodell for personbiler er basert på observerte data om valgt fart på det norske vegnettet. Datasettet består av 245 millioner GPS-målinger, fordelt på 119 kjøretøy, og 130 000 turer. Fra denne databasen ble tre regresjonsmodeller for fart estimert. En modell beskriver 2-feltsveger med fartsgrense 70, 80 og 90 km/t, en beskriver 2-feltsveger med fartsgrense 50 og 60 km/t, og en beskriver 4-feltsveger med fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t. For hver modell er farten estimert basert på de avhengige variablene dekkebredde, stigning, fall og krumning.

Følgende regresjonsmodell ble tilpasset i de tre tilfellene:

$$fart = C(x_g)e^{U(x_d, x_s, x_f, x_k)},$$

der  $C(x_g)$  er koeffisienter som vi definerer som referansefarten til de involverte fartsgrensene (for eksempel  $x_g = 70$ ,  $x_g = 80$  eller  $x_g = 90$  for 2-feltsveg ved henholdsvis fartsgrensene 70, 80 og 90 km/t), og  $U(\cdot)$  er en lineær funksjon (ulikt definert i de tre tilfellene) av variablene dekkebredde ( $x_d$ ), stigning ( $x_s$ ), fall ( $x_f$ ) og krumning ( $x_k$ ).

Modellen er bygget på en slik måte at **alle** tenkelige verdier for dekkebredde, fall, stigning og krumning kan evalueres for alle de tre modellene (og kun positive fartsverdier vil returneres). Det er likevel viktig å påpeke at modellene er estimert på et begrenset *dataområde*. En bør derfor bruke modellen med forsiktighet dersom man ønsker å predikere fart utenfor dataområdet.

De tre regresjonsmodellene er uttrykt som tre versjoner av  $U(\cdot)$ :

- 2-feltsveger ved fartsgrense 50 og 60 km/t:

$$U(x_d, x_s, x_f, x_k) = \beta_s x_s + \beta_f x_f + \beta_k x_k + \beta_{sk} x_s x_k + \beta_{fk} x_f x_k + \beta_{kk} x_k^2$$

- 2-feltsveger ved fartsgrense 70, 80 og 90 km/t:

$$U(x_d, x_s, x_f, x_k) = \beta_d(x_d - 8.0) + \beta_s x_s + \beta_f x_f + \beta_k x_k + \beta_{sk} x_s x_k + \beta_{fk} x_f x_k + \beta_{kk} x_k^2$$

- 4-feltsveger ved fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t:

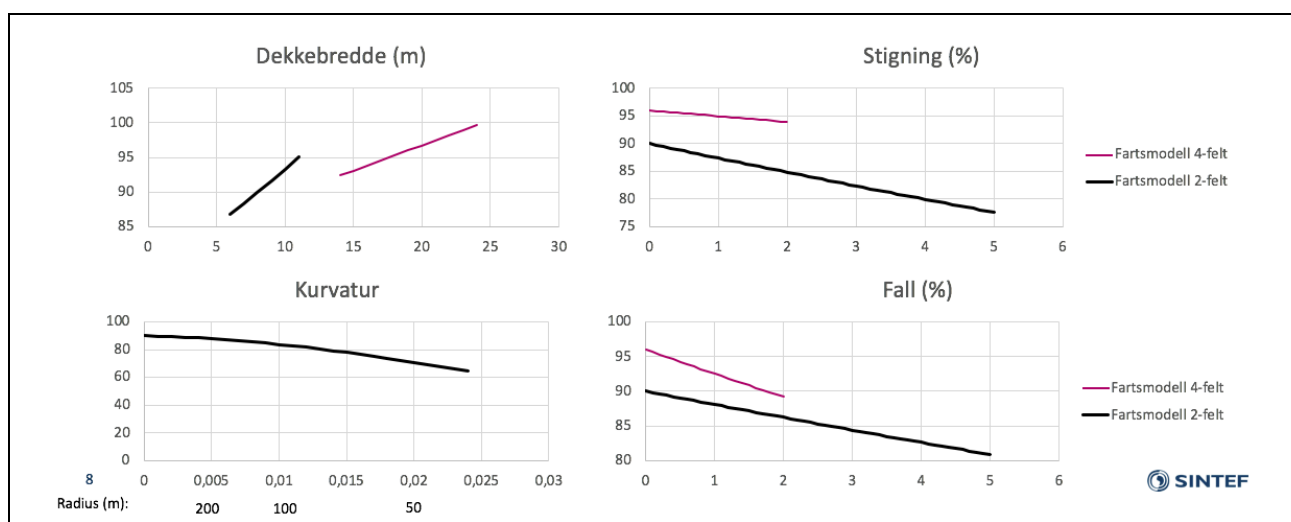
$$U(x_d, x_s, x_f, x_k) = \beta_d(x_d - 19) + \beta_s x_s + \beta_f x_f$$

For at denne skal utvides til å være gyldig for andre fartsgrenser, må det estimeres parametere i regresjonsmodellen. For en 4-feltsveg med fartsgrense 110 km/t og høyere vil den mest nærliggende regresjonsmodell være modellen for 4-feltsveg med fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t. I så fall vil en kunne ha benyttet seg av de samme parameterverdiene for  $\beta$  (effekt av krumning, stigning, fall og dekkebredde), men nye verdier for referansefarten  $C(x_g)$  må estimeres fra data. Det antas at denne fremgangsmåten vil gi realistiske resultater kun hvis de geometriske egenskapene ved vegen ikke beveger seg utenfor gyldighetsområdet, som vist i Tabell 3.

Tabell 3: Gyldighetsområde for datagrunnlag brukt for å estimere fartsmodeller for tre ulike vegkategorier. Fartsmodellen for 4-felt blir ikke påvirket av kurvatur, som er basert på at man fra data fra veger med radius over 250 m ikke fant en sammenheng mellom fart og kurvatur. Derfor er dette gyldighetsområdet markert med rødt.

	2-felt 50 og 60 km/t	2-felt 70, 80 og 90 km/t	4-felt 70, 80, 90 og 100 km/t
Dekkebredde (m)	-	6 til 11	14 til 24
Stigning (%)	0 til 5	0 til 6	0 til 2
Fall (%)	0 til 5	0 til 6	0 til 2
Radius (m)	20 -	10 -	250 -

Forskjellen mellom fartsmodellene for 2-felt (70, 80 og 90 km/t fartsgrense) og 4-felt er vist i Figur 3, hvor estimert fart ved fartsgrense 90 km/t er vist ved ulike verdier for dekkebredde, stigning, fall og kurvatur.



Figur 3: Datagrunnlag for estimering av fartsmodell for 4-feltsveg

## 1.2 Beskrivelse av utslippsberegninger i fartsmodulen

Energimodellen i fartsmodulen bruker egenskaper om vegstandard, kjøretøy og sjåfør for å beregne energiforbruk. I bunnen ligger de fysiske motstandene som et kjøretøy møter, representert ved følgende formel for stigning, rullemotstand, luftmotstand og akselerasjonsmotstand:

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot g \cdot C_r \cdot \cos \alpha + \rho \cdot 0,5 \cdot v^2 \cdot A \cdot C_d + m_e \cdot a$$

Basert på dette er det mulig å beregne *energibehovet* til et kjøretøy. For å beregne *energiforbruket* til et kjøretøy må en modellere det som skjer mellom tank og hjul. Den enkleste representasjonen for dette er i form av en virkningsgrad, altså et energitap basert på motorens effektivitet. Virkningsgraden er forholdet mellom *energi ut av motoren* (energibehov i henhold til ligningen over) og *energi inn i drivlinjen*

(energiinnhold i drivstoff). Energitalpet oppstår på grunn av for eksempel varmeutvikling i motoren og andre deler av drivlinjen. Noen typiske verdier for virkningsgrad er vist i Tabell 4.

Tabell 4: Eksempel på verdier for virkningsgrad

	Bensin	Diesel	Hydrogen	E85	HVO100
Typiske verdier for virkningsgrad (Fra tank til drivhjul)	0,20	0,24 (Personbil) 0,35 (Tung bil)	0,45	0,20	Som diesel

I en motor vil virkningsgraden avhenge av hvordan motoren opererer. For eksempel vil en forbrenningsmotor ha et optimalt virkningsområde, og dermed ha lavere virkningsgrad jo lengre unna dette området motoren opererer i. Ved spesielt lav eller høy belastning på motoren vil de fleste forbrenningsmotorer ha lavere virkningsgrad. Å bruke en konstant virkningsgrad vil derfor i flere tilfeller være en lite hensiktsmessig forenkling, blant annet ved lav og høy fart. Da vil motoren virke så langt utenfor sitt optimale område at virkningsgraden er lavere, og dermed vil energiforbruket være høyere. Derfor vil det være en fordel å benytte *funksjoner* for virkningsgrad i stedet for en konstant verdi når denne effekten ønskes modellert og evaluert.

Relevante forklaringsvariabler som kan inngå i en slik funksjon er for eksempel trykk, temperatur, motorhastighet og motorbelastning. På grunn av designet til farts- og energimodulen er det kun motorbelastning som er relevant, da hverken trykk, temperatur eller motorhastighet inngår i forklaringsmodellen. En virkningsgradsfunksjon vil derfor være et estimat for virkningsgrader ved ulik motorbelastning.



## 2 Oppdatering av metodikk for beregning av kjørefart i fartsmodulen

### 2.1 Metode

Fordi prosjektet tar sikte på å utvide gyldighetsområdet til fartsmodulen, er det søkt etter litteratur og data om målt og estimert fart på motorveger. Det er gjort et litteratursøk kun i begrenset omfang i prosjektet, og det er ikke tatt sikte på å gjøre et fullstendig strukturert søk etter «alle» referanser. Følgende prosedyre ble fulgt:

- Søk etter datakilder for fartsmålinger, med følgende søkeord i Google: *traffic, speed, data, open, gps*
- Søk etter sammenlignet fart og fartsgrense i vitenskapelig litteratur på Google scholar, med følgende søkeord: *free flow speed, posted speed limit, motorway, highway*
- Søk etter fartsmodeller beskrevet i vitenskapelig litteratur på Google scholar, med følgende søkeord: *speed prediction models, highway, motorway*.

Søkeresultatene ble lest gjennom på tittelnivå for å vurdere relevans. I tillegg ble det vurdert at nyere kilder har høyere relevans, og at kilder fra Nord-Europa har høy relevans. For hver relevant kilde ble både referanser og siteringer sjekket for relevans. I tillegg ble det søkt etter fartsmålinger spesifikt fra Sverige og Danmark med et ustrukturert litteratursøk via søkemotoren Google, med søkeordene hastighetsgräns, motorveje og fart.

Relevante funn fra søket er presentert tabellarisk i kapittel 2.2, sortert etter type (trafikkdatabaser, data fra litteratur og web, og fartsmodeller). Deretter er relevante resultat fra de ulike kildene presentert i kapittel 2.3. I etterkant av søket ble det gjort en supplerende datainnsamling fra Statens vegvesen sine trafikkregistreringsstasjoner, som er beskrevet i kapittel 2.4.

## 2.2 Relevante kilder fra litteratursøket

### 2.2.1 Trafikkdatabaser

Tabell 5: Kilder som inneholder åpne databaser

Kilde	Type	Beskrivelse
Open traffic collection <sup>1</sup>	Oversikt over datakilder for trafikkteillinger	Åpen nettside hvor det kan legges inn lenker til eksisterende datasett fra trafikkteillinger verden rundt. Per nå inkluderer dette stort sett trafikkteillinger, og i mindre grad fartsmålinger. Det er heller ikke store datamengder fra nordiske land, og det ble ikke funnet datasett som kunne være anvendbart for prosjektets formål.
Data fra SVV	Data fra trafikkregistreringsstasjoner	Data brukt til å estimere fartsmodellene beskrevet i forrige kapittel.

<sup>1</sup> <https://github.com/graphhopper/open-traffic-collection>

## 2.2.2 Data fra litteratur og web

Tabell 6: Kilder fra litteratur og web som beskriver fartsnivå

Kilde	Type	Beskrivelse
VTI <sup>2</sup>	Presentasjon	Fartsmålinger på svenske motorveger.
Trafikverket <sup>3</sup>	Rapport	Fartsmålinger på svenske motorveger.
Vejdirektoratet <sup>4</sup>	Excel-dokument	Fartsmålinger på danske motorveger.
Calvi m.fl. (2012)	Vitenskapelig artikkel basert på italiensk studie.	Studie om beskriver fartsmålinger fra et eksperiment i kjøresimulator. Forsøkspersonene kjørte gjennom to scenarier, hvor den eneste forskjellen var at det ene scenariet hadde tunnel på deler av strekningen. Man fikk derfor sett på fartsforskjeller med og uten tunnel. Resultatene viste at i tunnelene var farten redusert med mellom 3,1 og 13,5 km/t, sammenlignet med kontrollscenariet.
Deardoff m.fl. (2011)	Vitenskapelig artikkel basert på amerikansk studie.	I denne studien ble det sett på sammenheng mellom fart og fartsgrense på flere vegtyper med fartsgrense mellom 30 og 120 km/t. Det ble vist en statistisk signifikant korrelasjon mellom fartsgrense og snittfart, og estimert modeller som viser at snittfart er omtrent lik fartsgrense.
Parker Jr (1997)	Vitenskapelig artikkel basert på amerikansk studie	Studie som ser på sammenheng mellom fart og fartsgrense.
Kockelman (2006)	Vitenskapelig artikkel basert på amerikansk studie	Studie som ser på endring i kjørefart ved økt fartsgrense.

## 2.2.3 Fartsmodeller

Tabell 7: Kilder som beskriver fartsmodeller

Kilde	Type	Beskrivelse
De Andrade m.fl. (2016)	Vitenskapelig artikkel basert på en brasiliansk studie	Fartsmodell for motorveger estimert på data fra brasilianske veger.
TRB (2011)	Rapport	Inneholder en oversikt over de fleste fartsmodeller som har blitt estimert frem til utgivelsesdato.
Gong & Stamatidis (2008)	Vitenskapelig artikkel basert på amerikansk studie	Fartsmodell for motorveger estimert på data fra amerikanske veger.

<sup>2</sup> <https://www.slideshare.net/Tylosandsseminariet/ons0915-anna-vadeby>

<sup>3</sup> [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11311/RelatedFiles/2012\\_070\\_sammanstallning\\_av\\_aktorsmatningar\\_hastighet\\_2007\\_2011.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11311/RelatedFiles/2012_070_sammanstallning_av_aktorsmatningar_hastighet_2007_2011.pdf)

<sup>4</sup> [http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden\\_og\\_data/statistik/trafikken%20i%20tal/hvor\\_hurtigt\\_korer\\_vi/Sider/Hastighedsbarometer.aspx](http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/statistik/trafikken%20i%20tal/hvor_hurtigt_korer_vi/Sider/Hastighedsbarometer.aspx)

## 2.3 Resultat

### 2.3.1 Friflytsfart $C(x_g)$

En sammenstilling av funnene er vist i Tabell 8. Her ser en at gjennomsnittsfart ligger rundt fartsgrensen, bortsett fra for fartsgrense 130 km/t i Danmark, hvor gjennomsnittsfarten er målt til 120 km/t. Dette er en indikasjon på at gjennomsnittsfarten øker med fartsgrensen opp til et visst nivå. En ser også at det er stor forskjell i fart mellom tunge og lette kjøretøy, som i stor grad er forårsaket av fartssperre.

Tabell 8: Gjennomsnittlig kjørefart i ulike fartsgrenser i andre land

Fartsgrense	Lette kjøretøy, Sverige	Tunge kjøretøy, Sverige	Lette kjøretøy, Danmark	Lette kjøretøy, Storbritannia
90	87	80		
100	96	82		
110	110	85	113	
112				110,4
120	117	85		
130			120	

Selv om det tilsynelatende er en sammenheng mellom friflytsfart og fartsgrense, er det en viss mulighet for at dette kan skyldes sammenhengen mellom fartsgrense og vegstandard. Studien utført av Parker (1997) viste at sjåfører på motorveger vil velge fart primært ut fra vegens geometriske utforming og trafikkbelastning, og ikke nødvendigvis fartsgrense. Dette ble bekreftet av Kockelman m.fl. (2006), som viste at gjennomsnittsfarten og fartsfluktuasjoner ble mer påvirket av geometri, tverrsnitt og feltbruk enn fartsgrense. Samme studie påviste en økning i 3 mph (ca 5 km/t) i 85-percentil ved øking i fartsgrense fra 55 mph (ca 89 km/t) til 65 mph (ca 105 km/t).

### 2.3.2 Geometrisk fartspåvirkning

Teoretiske fartsmodeller har blitt utviklet siden 1950-tallet. Formålet har som oftest vært å finne en sammenheng mellom vegens utforming og fart (som regel 85-percentilen), med den bakenforliggende årsak at farten blir redusert på veger med utfordrende geometri. På motorveger har standarden som regel vært så god at vegens utforming ikke har vært sett på som et hinder for kjørefart. Derfor har det heller ikke vært fokus på å estimere fartsmodeller for motorveger. Dette kommer tydelig frem i rapporten til TRB (2011), som har utformet en oversikt over de aller fleste fartsmodeller som fantes frem til 2011. Noen eksempler er vist i Tabell 9, og det er tydelig at fåtallet inkluderer tyngre kjøretøy. Samtidig estimerer de fleste 85-percentilen i stedet for gjennomsnittsfart.

Tabell 9: Oversikt over fartsmodeller. Hentet fra TRB (2011)

	Leisch and Leisch, 1977	Lamm et al., 1987–1990	Krammes et al., 1995	Morrall and Talarico 1994	Islam and Seneviratne, 1994	Voigt and Krammes, 1996	Passetti and Fambro, 1999	Fambro et al., 2000	McFadden and Elefteriadou, 2000	Fitzpatrick and Collins, 2000	Fitzpatrick et al., 2000	Polus, Fitzpatrick, and Fambro, 2000	McFadden et. al., 2001	Donnell et al., 2001	Gibreel et al., 2001	Jessen et al., 2001	Schurr et al., 2002	IHSDM, 2003	Adolini-Minnicino and Elefteriadou, 2004	Figueroa Medina and Tarko, 2005	Schurr, Spargo, Huff, and Pestl, 2005	Misaghi and Hassan, 2005	Nie and Hassan, 2007
<b>Vehicle Types</b>																							
Passenger cars	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X <sup>3</sup>	X	
Trucks	X	X <sup>4</sup>											X					X		X			
<b>Speeds</b>																							
85th percentile		X	X	X	X	X	X	X	X <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X		X <sup>2</sup>		X	X	
Mean	X														X	X		X	X				
95th percentile															X	X			X <sup>2</sup>	X			
Speed distribution																			X				
<b>Speed Reduction From Tangent to Curve</b>																							
Delta V <sub>85</sub>		X	X							X	X							X				X	
Delta 85V																					X	X	
85MSR								X														X	
85MSI																						X	

Det ble funnet to kilder som estimerer kjørefart på motorveger. Den første er brasiliansk (De Andrade m.fl., 2016), som estimerer friflytsfart basert på fartsgrense, antall felt, motorvegtype, områdetype, kurvatur og rampetetthet. Den andre er amerikansk (Gong & Stamatiadis, 2008), men den estimerer 85-percentil uavhengig av fartsgrensen.

## 2.4 Supplerende datainnsamling

I løpet av desember 2018 og januar 2019 ble data fra Statens vegvesen sine trafikkregistreringsstasjoner gjort tilgjengelig for dette prosjektet. Datasettet bestod av data fra veger med fartsgrense 100 og 110 km/t, og dekker hele 2018. Utvalget av trafikkregistreringsstasjoner er fra den mengden som er klassifisert som friflytspunkt av Statens vegvesen. Det vil si punkter som ikke er påvirket av øvrige vegelementer, for eksempel rundkjøringer og andre kryss.

Datasettet bestod av enkeltkjøretøysobservasjoner, det vil si en observasjon tilsvarer ett kjøretøy som har passert punktet. Hver observasjon er tidsstemplet, med verdier for kjørefelt, fart, lengde og tre kvalitetsindikatorer (true/false). Dersom en av kvalitetsindikatorerne har verdien false, vil det indikere at målingen har en mulig feil, basert på de rutiner Statens vegvesen har for å vurdere kvalitet. Det supplerende datasettet ble benyttet i analysen sammen med tilsvarende datasett innsamlet i 2015, som beskrevet i Hjelkrem m.fl. (2017).

### 2.4.1 Filtrering av datasett

For å bestemme friflytsfart i hvert tellepunkt ble det gjort en filtrering av enkeltkjøretøysobservasjonene. Det er gjort en antagelse om at en sjåfør velger fart uten å bli påvirket av andre trafikanter, dersom avstanden til kjøretøyet foran er større enn 5 sekunder (tilsvarer ca 140 meter ved kjørefart 100 km/t). Dette er basert på resultater fra Hjelkrem (2015). På grunn av dette er alle observasjoner med tidsluke **kortere** enn 5 sekunder til både  **neste**  og  **forrige**  kjøretøy, i samme retning (dvs at vi også tar hensyn til kjøretøy i tilstøtende kjørefelt), **utelatt** fra videre analyse. Denne antagelsen er videre belyst i avsnitt 2.4.3.

Selv om datasettet fra 2018 inneholder data fra punkter som er klassifisert som friflytspunkt, måtte en av målestasjonene fjernes fra analysen fordi den ligger rett før avkjørsvei til Gardermoen flyplass, noe som sannsynligvis påvirker farten.

I tillegg er det gjort en filtrering av hvilke målestasjoner i datasettet fra 2015 som er aktuelle for å bestemme friflytsfart. Det medfører at målestasjoner hvor **ytte faktorer** kan tenkes å påvirke farten er **utelatt** fra videre analyse. Eksempel på slike tilfeller er hvis målestasjonen ligger i umiddelbar nærhet av kryss eller en lavere/høyere fartsgrense.

I løpet av analysen ble det sett nøyere på variasjoner i datasettet, både i tid og rom. En første indikasjon på variasjon mellom datasett var at gjennomsnittsfarten gikk betraktelig ned mellom 2015 og 2018 for fartsgrenser 100 og 110 km/t, også på målestasjoner som var representert i begge datasett. Forklaringen på dette var at datasettet for 2018 inneholdt data for hele kalenderåret, mens datasettet for 2015 inneholdt kun data fra uke 33-38 i 2015. Dermed vil lavere fartsnivå på vinterføre bidra til å redusere gjennomsnittlig friflytsfart for 2018-data. Dette ble adressert ved å foreta enda en filtrering av 2018-datasettet, og kun inkludere data fra uke 33-38 i 2018 i videre analyse.

### 2.4.2 Beskrivelse av datasett

Detaljert informasjon om målestasjonene som er inkludert i det supplerende datasettet er vist i Tabell 10. Etter filtreringen er det igjen over 1,2 millioner observasjoner av friflytsfart. Observasjonene er delt inn i lengdeklasser i tabellen, og vi ser at den største andelen av observasjonene er for lette kjøretøy under 5,6 meter.

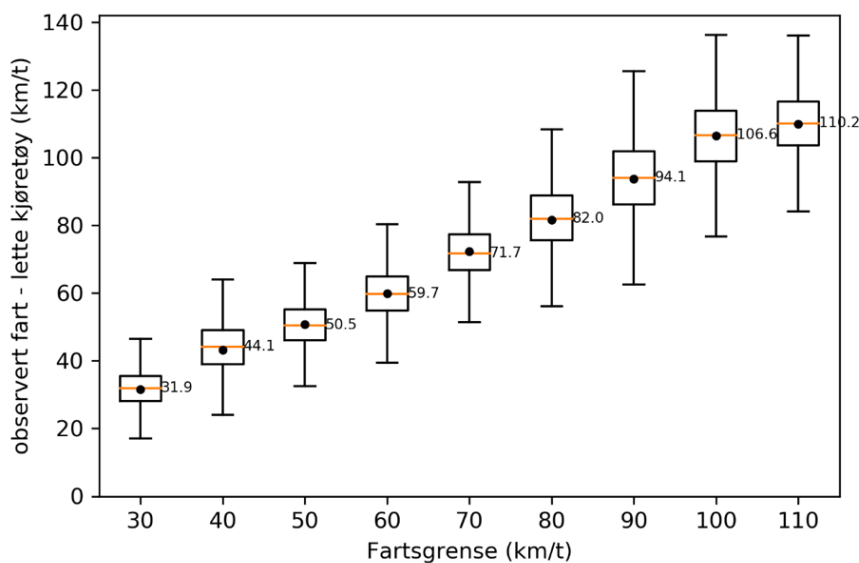
Tabell 10: Beskrivelse av egenskaper ved målestasjoner i det supplerende datasettet.

ID	Fartsgrense	Antall felt	Dekkebredde	Antall obs [ $<5,6$ m]	Antall obs [5,6 m - 7,5 m]	Antall obs [7,5 m - 12,5 m]	Antall obs [12,5 m - 16 m]	Antall obs [ $>16$ m]
200200	110	4	21,8	117 457	3 787	4 427	3 925	5 243
200211	100	4	23,2	93 476	4 019	4 274	4 035	6 288
100284	100	5	-	110 821	4 903	5 216	2 076	13 240
100282	100	4	-	98 751	1 472	2 696	651	719
200011	100	4	23,2	92 127	4 026	4 326	2 725	7 653
100002	100	4	-	132 736	5 530	7 962	2 671	8 271
200246	100	4	20,8	124 219	5 801	7 370	6 397	12 206
400019	100	4	17	149 901	7 525	12 141	3 868	18 420
600137	100	4	23,5	81 128	3 728	4 909	1 834	6 251

En tilsvarende tabell er ikke vist for datasettet fra 2015, på grunn av det store antallet målestasjoner. Totalt er det 26,2 millioner observasjoner av friflytsfart, fordelt på 127 målestasjoner, hvorav 2 også er representert i det supplerende datasettet fra 2018.

### 2.4.3 Resultater

Fra datasettet er det beregnet gjennomsnittlig friflytsfart for lette kjøretøy for hver fartsgrense, i tillegg til 25-, 50-, og 75-percentiler. Sistnevnte for å visualisere variasjonen i fart i hver fartsgrense. Resultatene er vist i Figur 4, som viser at median fart ligger omtrent på fartsgrensen i både 50 og 60 km/t. For fartsgrense 70, 80, 90 og 100 km/t ligger median fart markant over fartsgrense, mens den ligger på fartsgrensen i 110 km/t.



Figur 4: Variasjon i friflytsfart for ulike fartsgrenser, lette kjøretøy under 5,6 meter. Gul strek: median, svart punkt: gjennomsnitt. Tallene ved siden av hver boks er median. Hver «boks» inneholder 50 % av observasjonene.

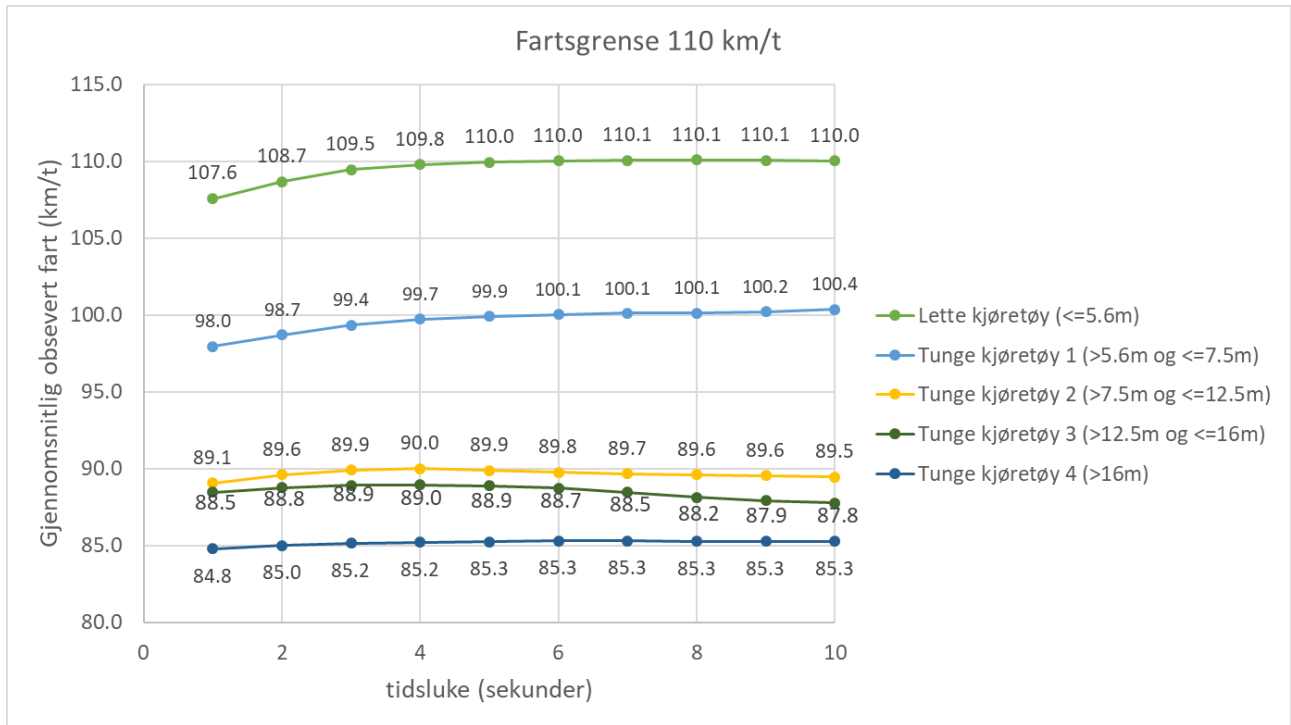
Antall felt vil sannsynligvis påvirke gjennomsnittlig kjørefart. Det er derfor mest aktuelt å benytte observasjoner fra flerfeltsveier for å estimere kjørefart i fartsgrense 120 km/t. Tabell 11 viser gjennomsnittsfart og antall observasjoner for lette kjøretøy på to- og flerfeltsveier.

Tabell 11: Tallverdier for gjennomsnitt friflytsfart og antall observasjoner for lette kjøretøy på tofelts- og flerfeltsveier

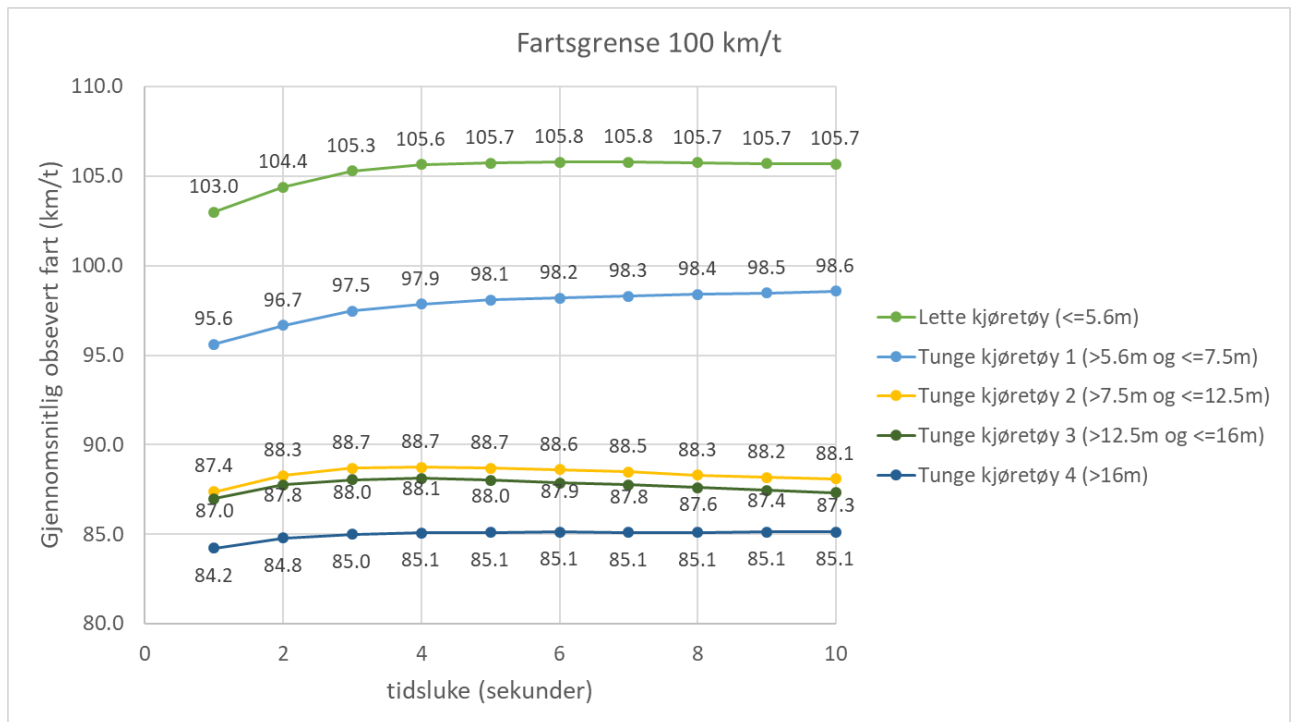
Fartsgrense	Tofeltsveier			Flerfeltsveier		
	Gjennomsnitt (km/t)	Antall målestasjoner	Antall observasjoner	Gjennomsnitt (km/t)	Antall målestasjoner	Antall observasjoner
30	31,4	1	59 689	--	0	0
40	43,0	5	1 648 190	--	0	0
50	50,3	21	5 209 784	52,6	4	519 362
60	59,4	26	5 797 012	65,1	2	965 029
70	72,5	13	2 188 594	74,9	6	341 881
80	80,5	30	4 356 247	86,6	5	327 145
90	86,4	1	104 828	97,3	6	550 148
100	--	0	0	105,7	12	1 280 800
110	--	0	0	110,0	4	419 269

Tallverdier vist i Tabell 11 er beregnet basert på observasjoner med tidsluke **lengre** enn 5 sekunder til både  **neste** og  **forrige** kjøretøy, i samme retning. For å sjekke om at den terskelverdien er stor nok for høyere fartsgrenser er det beregnet gjennomsnittsfart med ulike tidsluker for fartsgrense 100 km/t og 110 km/t. Resultatet er vist i Figur 5 (fartsgrense 110 km/t) og Figur 6 (fartsgrense 100 km/t).

Figur 5 og Figur 6 viser at gjennomsnittsfarten er lavere enn friflytsfart der hvor tidslukene er kortere enn 5 sekunder, spesielt for lette kjøretøy. Over terskelverdien fra 5 sekunder øker ikke gjennomsnittsfarten. Dette underbygger antagelsen om å sette grensen på 5 sekunder for å beregne friflytsfart for høyere fartsgrenser.



Figur 5: Gjennomsnittlig observert fart for fartsgrense 110 km/t beregnet med ulike tidsluker til både neste og forrige kjøretøy



Figur 6: Gjennomsnittlig observert fart for fartsgrense 100 km/t beregnet med ulike tidsluker til både neste og forrige kjøretøy



Dersom man benytter resultatene presentert hittil for å estimere kjørefart i fartsgrense 120 km/t, vil det være vanskelig å ekstrapolere resultatene fra lavere fartsgrenser direkte. Det er begrunnet med at det er flere mulige trendlinjer å benytte seg av. En metode ville vært å anta at trenden er en utflating, som ville resultert i en kjørefart på ca 110 km/t i fartsgrense 120 km/t. En annen ville vært å anta at kjørefart ligger omtrent på fartsgrense, med en tilfeldig variasjon på +/- 3-4 km/t avhengig av stedlige forhold, som ville resultert i en kjørefart på 120 km/t i fartsgrense 120 km/t. Ved å inkludere observasjonene fra Sverige og Danmark i argumentasjonen, ser det ut som om realiteten heller mer mot utflatings-trenden, men at kjørefarten flater ut på et nivå som ligger noe under tilsvarende verdier fra Sverige. Dette gir en estimert kjørefart på **115 km/t i fartsgrense 120 km/t for lette kjøretøy**.

Resultatene for tunge kjøretøy viser at snittfart for kjøretøy over 16 meter er ca. 85 km/t i både fartsgrense 100 og 110 km/t. For kjøretøy mellom 7,5 og 16 meter er tilsvarende gjennomsnittsfart ca. 89 km/t. I kategorien 5,6 til 7,7 meter er gjennomsnittsfarten ca. 99 km/t. Dette viser at det er store variasjoner i observert fart for ulike type tunge kjøretøy og antyder at fartsmodell for tunge bør differensieres på hver type. Ser en på alle tunge kjøretøy (altså de over 5,6 meter) vil fartssperren føre til at gjennomsnittlig friflytsfart er omtrent **90 km/t**, som også i dag er implementert i fartsmodellen for tunge kjøretøy. For de kortere tunge kjøretøy, altså de i gruppen 5,6 til 7,5 meter, er det per i dag ingen fartsmodell tilgjengelig, men fra resultatene ser man behovet for å definere ulike fartsmodeller for ulike type tunge kjøretøy.

## 2.5 Anbefalte koeffisienter for oppdatering av fartsmodell for lette kjøretøy

Tabell 12 til Tabell 16 viser de verdiene som er anbefalt å implementere i fartsmodulen, basert på resultatene fra denne studien. Det er kun koeffisienter for referansefart som er re-estimert. Koeffisienter for geometrisk påvirkning har ikke blitt endret, og er inkludert i tabellene for ordens skyld.

Tabell 12: Anbefalte verdier for oppdatering av fartsmodell hvor fartsgrense er 30 og 40 km/t uavhengig av antall felt

Fartsgrense	Koeffisient for referansefart $C(x_g)$	Koeffisient for stigning $\beta_s$	Koeffisient for fall $\beta_f$	Koeffisient for krumning $\beta_k$	Koeffisient for krumning, andregradsledd $\beta_{kk}$
30	30*	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9
40	43	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9

\*få antall målestasjoner. Verdien er satt til fartsgrense.

Tabell 13: Anbefalte verdier for oppdatering av fartsmodell hvor antall felt i hver kjøreretning er 1, og fartsgrense er 50 og 60 km/t

Fartsgrense	Koeffisient for referansefart $C(x_g)$	Koeffisient for stigning $\beta_s$	Koeffisient for fall $\beta_f$	Koeffisient for krumning $\beta_k$	Koeffisient for krumning, andregradsledd $\beta_{kk}$
50	50.3	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9
60	59.4	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9

Tabell 14: Anbefalte verdier for oppdatering av fartsmodell hvor antall felt i hver kjøreretning er flere enn 1, og fartsgrense er 50 og 60 km/t

Fartsgrense	Koeffisient for referansefart $C(x_g)$	Koeffisient for stigning $\beta_s$	Koeffisient for fall $\beta_f$	Koeffisient for krumning $\beta_k$	Koeffisient for krumning, andregradsledd $\beta_{kk}$
50	52.6	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9
60	63.7**	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9

\*\*få antall målestasjoner. Verdien er justert ut ifra gjennomsnittsfart for fartsgrense 50 km/t og 70 km/t.

Tabell 15: Anbefalte verdier for oppdatering av fartsmodell hvor antall felt i hver kjøreretning er 1, og fartsgrense er 70, 80 og 90 km/t

Fartsgrens e	Koeffisient for referansefart $C(x_g)$	Koeffisient for dekkebredde $\beta_a$	Koeffisient for stigning $\beta_s$	Koeffisient for fall $\beta_f$	Koeffisient for krumning $\beta_k$	Koeffisient for krumning, andregradsledd $\beta_{kk}$	Koeffisient for interaksjon mellom stigning og krumning $\beta_{sk}$	Koeffisient for interaksjon mellom fall og krumning $\beta_{fk}$
70	72.5	0,0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	-3.825	-3.517
80	80.5	0,0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	-3.825	-3.517
90	90*	0,0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	-3.825	-3.517
100	100***	0,0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	-3.825	-3.517
110	110***	0,0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	-3.825	-3.517
120	115***	0,0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	-3.825	-3.517

\*få antall målestasjoner. Verdien er satt til fartsgrense.

\*\*\*ingen observasjoner

Tabell 16: Anbefalte verdier for oppdatering av fartsmodell hvor antall felt i hver kjøreretning er flere enn 1, og fartsgrense er større enn 70 km/t.

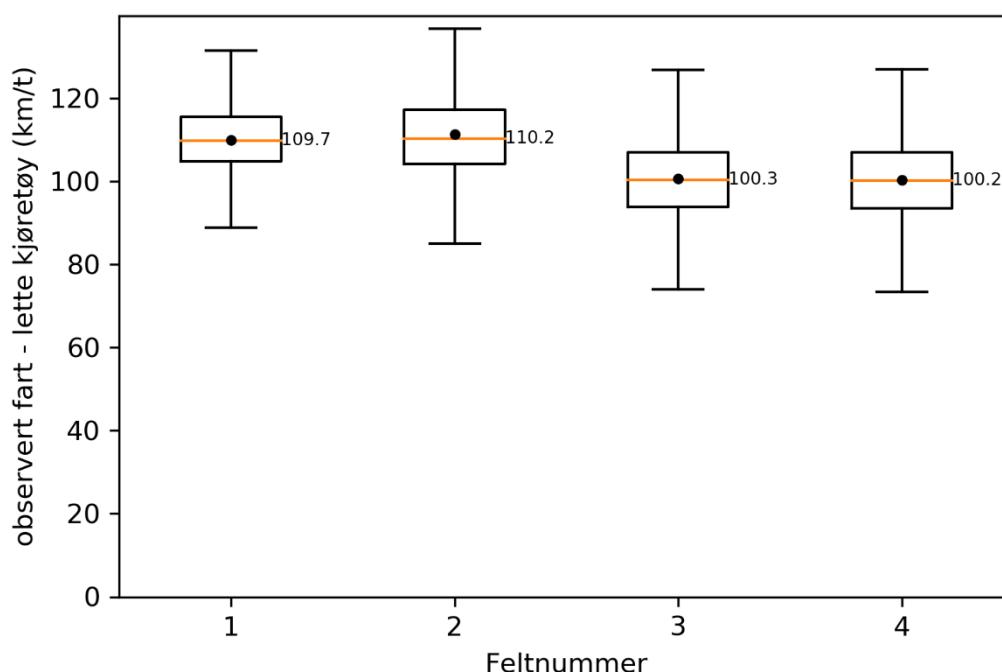
Fartsgrense	Koeffisient for referansefart $C(x_g)$	Koeffisient for dekkebredde $\beta_a$	Koeffisient for stigning $\beta_s$	Koeffisient for fall $\beta_f$
70	74.9	0,0076	-0.0111	-0.0368
80	86.6	0,0076	-0.0111	-0.0368
90	97.3	0,0076	-0.0111	-0.0368
100	105.7	0,0076	-0.0111	-0.0368
110	110,0	0,0076	-0.0111	-0.0368
120	115	0,0076	-0.0111	-0.0368

## 2.6 Andre faktorer som kan påvirke kjørefart

I forbindelse med studien har det kommet blitt undersøkt hvordan estimert kjørefart blir påvirket av andre faktorer, og da spesielt hvilket kjørefelt man er i på flerveitsveg, om man er i tunnel eller ikke, og til slutt om en økende elbilbestand kan påvirke observert fart. Dette er videre belyst i det følgende.

### Kjørefelt

På motorveger med flere felt er det naturlig å anta at fartsnivået er lavest i høyre felt sammenlignet med venstre og eventuelle midtfelt. Dette er visualisert med et eksempel i Figur 7, og tilsvarende plott fra andre målestasjoner i fartsgrense 100 og 110 km/t viser samme tendens. Fordi at feltkode på nåværende tidspunkt ikke er en variabel i fartsmodellen, er det ikke mulig å inkludere dette resultatet i metodikk for estimering av kjørefart. Derfor er det gjennomsnitt av observasjoner, uavhengig av felt og retning, som er brukt i videre analyse.



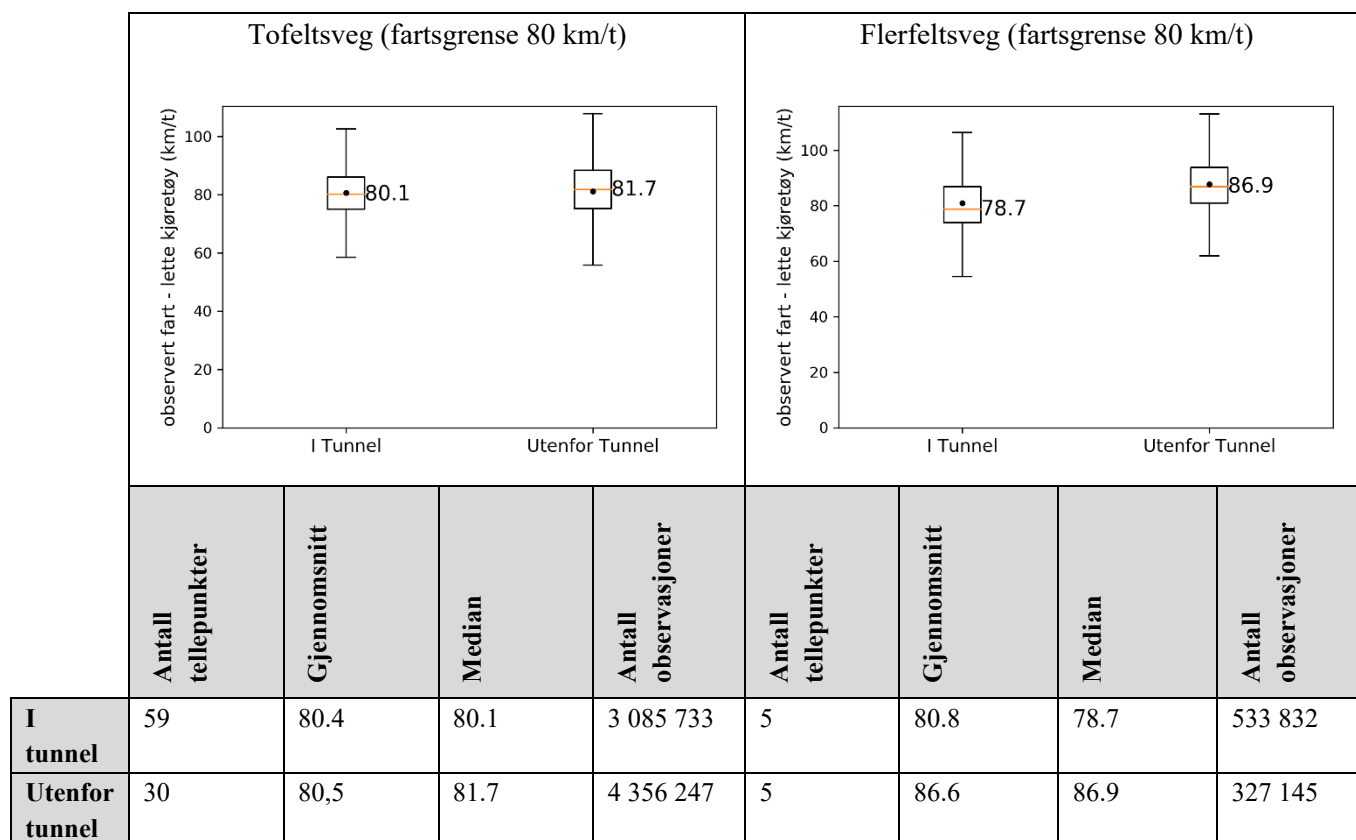
Figur 7: Variasjon i fart mellom felt på målestasjon nr 600137 med fartsgrense 100 km/t. Høyre felt (3 og 4, i motsatte retninger) har lavere fartsnivå enn venstre felt (1 og 2). Gul strek: median, svart punkt: gjennomsnitt. Tallene ved siden av hver boks er median. Hver «boks» inneholder 50 % av observasjonene

### Tunnel

Dersom man skal bygge ny motorveg over lengre strekninger, vil det ofte være aktuelt å legge deler av strekningen i tunnel. Derfor har analysen også tatt mål av seg å se på hvordan tunnel påvirker kjørefart. Fra litteraturstudiet er det vanskelig å konkludere om tunnel har en effekt på kjørefart, og det finnes kun en målestasjon i det supplerende datasettet hvor det er tunnel. Fartsnivået i tunnelen er 107,1 km/t, mot gjennomsnittlig 105,6 for andre målestasjoner i samme fartsgrense (100 km/t) uten tunnel. Dette indikerer at fartsnivået kan øke i tunnel, men det er for lite datagrunnlag til å innføre dette i fartsmodellen.

Derfor var det etterspurt data fra målestasjoner i tunneler i lavere fartsgrenser (80 km/t) for å prøve å finne en sammenheng. Figur 8 oppsummerer resultater for friflytsfart i fartsgrense 80 km/t i tunnel og utenfor tunnel

for tofelts- og flerfeltsvei. Resultatene viser ikke en åpenbar tendens i at friflytsfart er høyere i tunnel en utenfor tunnel på tofeltsveg, men på flerfeltsveger er gjennomsnittsfarten 6 km/t høyere utenfor tunnel. Dette tyder på at man bør være obs på at estimat for kjørefart kan være for høyt dersom man gjør analyser av prosjekt med tunnel på flerfeltsveger.



Figur 8: Variasjon i friflytsfart i tunnel og utenfor tunnel for tofelts- og flerfeltsvei i fartsgranse 80 km/t. Gul strek: median, svart punkt: gjennomsnitt. Tallene ved siden av hver boks er median. Hver «boks» inneholder 50 % av observasjonene.

## Elbilbestanden

Datasettet som ble brukt for å estimere friflytsfart i første versjon av fartsmodulen ble samlet inn i 2014-2015. På denne tiden var elbilbestanden på omtrent 70 000 kjøretøy, med en markedsandel på 17 % av nybilsalget<sup>5</sup>. I 2018 var bestanden i underkant av 200 000 kjøretøy, og tilsvarende markedsandel var 31 %. Rekkeviddeangst kan f.eks føre til at man vil holde fartsnivået nede. Samtidig har det i denne tidsperioden blitt lansert elbiler med større batterikapasitet, og dermed lengre rekkevidde, slik at det er uvisst om fartsnivået påvirkes av elbilandel. Det er heller ikke mulig å detektere om et kjøretøy er elektrisk eller ikke i datasettene som er analysert i denne studien.

<sup>5</sup> Norsk elbilforening: <https://elbil.no/elbilstatistikk/>

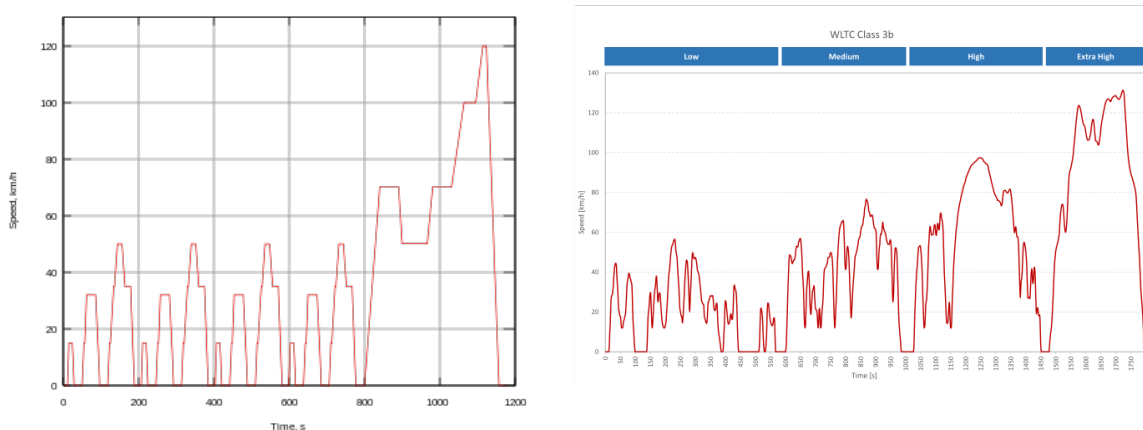
### 3 Estimering av virkningsgradsfunksjoner i fartsmodulen

Som nevnt innledningsvis er det per i dag en konstant virkningsgrad i farts- og energimodulen. Derfor er det foreslått å estimere virkningsgradsfunksjoner med motorbelastning som forklaringsvariabel. Til dette arbeidet trenger man derfor data om målt forbruk ved ulike motorbelastninger. I forprosjektet ble det vurdert om data fra europeiske typegodkjenninger kunne brukes til dette formålet. Vurderingen tilsa at dette var mulig, og estimeringer ble derfor gjennomført. Videre i dette kapittelet er det gitt en presentasjon av datagrunnlaget samt arbeidet med å estimere virkningsgradsfunksjoner for lette kjøretøy.

#### 3.1 Datagrunnlag

Typegodkjenning av kjøretøy i EU blir utført på nasjonalt nivå for å sertifisere at bilmodeller møter alle EUs krav til sikkerhet, klima, miljø og produksjon før den blir tilgjengelig for salg i EU (European Commission 2016). Dette blir innrapportert fra hvert medlemsland til EU, og lagret i en åpent tilgjengelig database<sup>6</sup>. Databasen inneholder for eksempel navn på produsent, biltype, bilmodell, versjon, merkenavn, CO<sub>2</sub>-utslipp, vekt, sporvidde, motorkapasitet, drivstofftype og motorkraft.

CO<sub>2</sub>-utslipp blir målt ved en fast standard testprosedyre. Som oftest blir dette gjort i en lab på dynamometer med avgassmåler påkoblet kjøretøyet. Testprosedyren går ut på at kjøretøyet gjennomfører en kjøresyklus, som er en forhåndsdefinert sekvens av fartsendringer. Frem til 2017 var standard kjøresyklus NEDC (New European Driving Cycle), men denne blir erstattet med WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures). Fartsprofil for både NEDC og WLTP er vist i Figur 9.



Figur 9: Kjøresykluser brukt i typegodkjenninger. Y-aksen viser fart, X-aksen viser tid. Venstre: NEDC. Høyre: WLTP

Testprosedyren for NEDC innebærer at kjøretøyet starter med kald motor, og at kjøreløysene er på gjennom hele testen. Spesifikasjoner for motorolje, dekk og drivstoff er predefinert. Det er ikke krav til å ha Air condition aktivert. Kjøresyklusen har ingen predefinerte valg for gir, og testen gjennomføres i 20-30 °C. Som vist i Figur 9 består NEDC-syklusen av to faser, som simulerer henholdsvis by (lav fart)- og motorvegekjøring

<sup>6</sup> <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-14#tab-european-data>

(høy fart). Omtrent 21 % av syklusen er akselerasjon, og 15 % er retardasjon. Kjøretøyet står på tomgang i 24 % av testen. Gjennomsnittsfart er 34 km/t, og toppfart er 120 km/t.

For WLTP-testen er prosedyrene noe forandret, som i stor grad skyldes kritikk mot realismen i NEDC-testen. Den mest åpenbare forskjellen er at selve kjøresyklusen er lengre (23 km mot 11 km, 30 min mot 20 min), farten er høyere (gjennomsnitt 46,5 km/t og toppfart 131 km/t), og mer detaljert (fire faser: lav, middels, høy og ekstra høy). Akselerasjon og retardasjon står for henholdsvis 44 % og 40 % av testen, mens kjøretøyet står i ro 13 % av tiden. I tillegg er det i testprosedyren økte krav til lastvekt, temperatur og predefinerte girvalg.

Tabell 17 (personbiler) og Tabell 18 (varebiler) viser antall tilgjengelige typegodkjenninger fordelt på NEDC og WLTP, samt gjennomsnittlig vekt og motorstørrelse.

*Tabell 17: Antall typegodkjenninger mellom 2012 og 2017, samt utvikling i motorkraft og vekt. Personbiler.*

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>N (NEDC)</b>	375 415	442 475	417 709	440 645	493 818	4 910 351
<b>N (WLTP)</b>	0	0	0	0	0	1 991
<b>Gjennomsnittlig vekt (kg)</b>	1566	1527	1535	1533	1540	1528
<b>Gjennomsnittlig effekt (kW)</b>	115	111	118	118	115	116

*Tabell 3: Antall typegodkjenninger mellom 2012 og 2017, samt utvikling i motorkraft og vekt. Varebiler.*

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>N (NEDC)</b>	148 612	255 707	1 426 115	1 495 301	1 636 740	1 650 249
<b>N (WLTP)</b>	0	0	0	0	0	2
<b>Gjennomsnittlig vekt (kg)</b>	2045	1897	1760	1786	1815	1825
<b>Gjennomsnittlig effekt (kW)</b>	142	93	84	86	88	93

### 3.2 Teori

Grunnlaget for prosjektet baserer seg på at hver typegodkjenning kan anses som et separat eksperiment med definerte forutsetninger og et unikt måleresultat. Forutsetningene er som følger:

- Kjørezyklusen bestemmer hvor mye energi som kreves av motoren til enhver tid.
- Rullemotstand kan beregnes ved å anta en koeffisient for rullemotstand på 0,015.
- Fordi typegodkjenning utføres i laboratorier vil det ikke være en reell luftmotstand, men en simulert luftmotstand er tilført i form av ekstra motstand på hjulet. Den beregnes ved å anta en koeffisient på 0,3.
- Det er ingen høydeforskjeller å ta hensyn til.
- Akselerasjonsmotstand er gitt fra fartsprofilen.
- Motoren har en bunnlast på grunn av energi til bl.a. kjørellys. Denne er avhengig av tid, og legges på flatt over hele kjøresyklusen. En får dermed inkludert energiforbruk knyttet til tomgangskjøring.
- Andre egenskaper fra kjøretøyet som er nødvendig er vekt og motoreffekt. Dette er oppgitt i typegodkjenningsdata.

Kjørezyklusen blir delt opp i uniforme segmenter mellom to punkt ( $i, i - 1$ ), med hensyn til lik akselerasjon, og følgende sammenheng blir benyttet for energibehov:

$$\Delta E_{i-1,i} = \max\{v_i(mgC_r + 0.5\rho v_i^2 AC_D + ma_i), 0\}$$

En vektor for benyttet motorkraft for hvert segment i kjøresyklusen kan deretter representeres i følgende form:

$$U = (U_2, \dots, U_N) = \left(\frac{\Delta E_{i-1,i}}{W_{max}}\right)_{i=2}^N$$

hvor  $N - 1$  er antall segmenter. Av dette kan en beregne totalt CO<sub>2</sub>-utslipp ved følgende sammenheng:

$$\widehat{CO}_2 = \frac{E_s L}{HV} \sum_{i=2}^N \frac{\Delta E_{i-1,i}}{\eta(U_i)}$$

Her er  $E_s$  spesifikt utslipp av CO<sub>2</sub> per masseenhet av drivstoff,  $L$  lengden på kjøresyklusen,  $HV$  energiinnhold i drivstoff ved forbrenning, og  $\eta$  er virkningsgraden som en funksjon av relativt effektuttak  $U_i$  i hvert segment.

Det totale CO<sub>2</sub>-utslippet blir målt i typegodkjenningen, og en kan dermed sammenligne beregnet og estimert CO<sub>2</sub>-utslipp. Virkningsgradsfunksjonen kan estimeres ved å velge den funksjonen som gir minst avvik mellom målt og beregnet CO<sub>2</sub>-utslipp.

I utgangspunktet gjør de tilgjengelige data det mulig å benytte en helt fri funksjonsform for å estimere virkningsgradsfunksjonen, men det kan gi uheldige utslag for de områder hvor en eventuelt har lite data. I dette tilfellet kan en anta at dette vil være i situasjoner med høy motorbelastning, da typegodkjenningene ikke inkluderer stor belastning på motoren. Dette gjelder spesielt NEDC-testen. Derfor er det gjort nøyere betraktninger rundt funksjonsformen til virkningsgraden, og hva som kan påvirke den. Vi har forutsatt at virkningsgraden er avhengig av kun effektbehov, som er produktet av motorens turtall og last. I tillegg vil girets utveksling kunne påvirke motorlasten.

Å inkludere både turtall, last og girutveksling vil gjøre estimeringen for detaljert for de inndata som er tilgjengelig i bruksområdet, men det er relevant å ta med for en dypere forståelse av de prosessene som inngår, og eventuelle avvik som kan oppstå fra en forenkling.

### 3.2.1 Willans approksimasjon

En lignende forenkling av problemstillingen er kalt Willans approksimasjon (se f.eks. Guzzella & Sciarretta 2007, s. 44):

$$p_{me} \approx e(\omega_e)p_{mf} - p_{me0}(\omega_e)$$

Hvor  $p_{me}$  er gjennomsnittlig trykk produsert av motoren,  $p_{mf}$  er det trykket som kan produseres av en motor som er 100 % effektiv i forbrenning av drivstoff med masse  $m_f$  og brennverdi  $H_f$ :

$$p_{mf} = \frac{H_f m_f}{V_d}$$

Her er  $V_d$  sylindervolumet. Parameteren  $e(\omega_e)$  er motorens effektivitet i å omgjøre kjemisk energi til trykk i sylinderen, og  $p_{me0}$  er sum av alle friksjonstap i motoren. Dette kan forklares med andre ord at arbeidet som utføres av motoren er omtrent lik brennverdien av drivstoffet multiplisert med motorens effektivitet, minus friksjonstap i motoren. For enkle beregninger kan  $e$  og  $p_{me0}$  antas å være konstante, men er i realiteten variable, og stort sett kun avhengig av motorens turtall.

En direkte anvendelse av Willans approksimasjon vil gi en virkningsgrad som er lineært avhengig av effektbehov. Denne er videreutviklet ved å legge til et annengradsledd, slik at forholdet mellom motorens effektivitet og turtall, hvor turtallet her er representert ved effekt ut. Ved å definere  $U$  som relativ effekt ut,  $p_{mf}$  som effekt inn, kan vi utlede følgende sammenheng:

$$p_{mf} = \alpha_1 + \alpha_2 U + \alpha_3 U^2$$

Fordi motorens virkningsgrad er definert som effekt ut dividert med effekt inn, kan vi utlede følgende sammenheng:

$$\eta(U_i) = \frac{U_i}{p_{mf}} = \frac{U_i}{\alpha_1 + \alpha_2 U_i + \alpha_3 U_i^2}$$

hvor  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  og  $\alpha_3$  er parametere som må estimeres.



### 3.3 Estimeringsmetodikk

Estimeringen har gått ut på å bestemme virkningsgraden som en funksjon av last på motoren i form av motstander som kjøretøyet må overkomme for å opprettholde en gitt fartsprofil. Dette er tilpasset formålet og de inndata som er tilgjengelig i tiltenkte bruksområder. Arbeidet hviler på følgende antagelser:

- Virkningsgraden er 0 ved 0 last.
- Noe av energien går med til andre pådrag enn motstander, i form av tidskonstante bidrag fra kjøretøyet, for eksempel oppvarming, lys o.l. Dette er satt å bidra til 8,5 g/km CO<sub>2</sub>-utslipp fra diesel- og bensinbiler, og 3,5 kW fra elektriske kjøretøy.
- Vi undersøker to kurveformer i estimeringen. Den første er basert på Willans approksimasjon:

$$\circ \eta(U_i) = \frac{U_i}{\alpha_1 + \alpha_2 U_i + \alpha_3 U_i^2},$$

mens den andre har vi valgt å kalle en potExp-kurve med følgende funksjonsform:

$$\circ \eta(U_i) = \beta_1 U_i^{\beta_2} e^{-\beta_3 U_i}$$

Da typegodkjenningssdata ikke inneholder forbrukstall for segmenter, men kun ett resultat for hver test, er det avvik mellom sum målt og sum estimert totalforbruk som må minimeres. Matematisk noteres dette ved følgende uttrykk:

$$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3 = \arg \min_{\beta_1, \beta_2, \beta_3} \sum_{t=1}^T \{\widehat{CO}_2^t - CO_2^t\},$$

hvor T er antall kjøretøy som er med i utvalget, og CO<sub>2</sub><sup>t</sup> er målt utslipp for hvert kjøretøy,  $\widehat{CO}_2^t = \widehat{CO}_2^t(\beta_1, \beta_2, \beta_3, A, m, C_r, \rho, C_D, \gamma, L, \lambda, W_{max}^t)$  er estimert CO<sub>2</sub>-utslipp ved å bruke dem forenklete sammenheng mellom virkningsgrad og motorlast. For elektriske kjøretøy er uttrykket følgende:

$$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3 = \arg \min_{\beta_1, \beta_2, \beta_3} \sum_{t=1}^T \{\widehat{E}_{kWh}^t - E_{kWh}^t\},$$

hvor E<sub>kWh</sub><sup>t</sup> er målt energiforbruk, og  $\widehat{E}_{kWh}^t = \widehat{E}_{kWh}^t(\beta_1, \beta_2, \beta_3, A, m, C_r, \rho, C_D, L, W_{max}^t)$  er estimert energiforbruk. Estimeringen er gjort i analyseverktøyet R med tilhørende *optim*-pakke for å bestemme parameterverdier.

### 3.3.1 Preparering av data

I estimeringen er det benyttet data fra varebilsegmentet for virkningsgradsfunksjoner for forbrenningsmotorer. Motivasjonen for dette har vært å velge kjøretøy med motorer som opererer i større grad av motorlastregisteret, enten ved at de har høy vekt og/eller liten motor. Dette hviler på en antagelse om at funksjonene blir mer valide for hele lastregisteret på denne måten. Ved å hente data fra årene 2012 til 2017 har følgende utvalg blitt benyttet:

- Vekt mellom 800 og 3000 kg
- Resultat fra NEDC-test på mellom 75 og 400 g/km
- Motoreffekt mellom 40 og 425 kW

Datasettet er i tillegg redusert ved å gjøre et tilfeldig valg av 10 000 kjøretøy hvor maks benyttet effekt er under 30 %, og tilsvarende mange kjøretøy som har maks benyttet effekt i området mellom 30 % og 40 %. Det er ikke gjort tilsvarende utvalg for kjøretøy med maks benyttet effekt over 40 %, her er alle inkludert. Denne reduksjonen ble gjort for å unngå en overrepresentasjon av kjøretøy som går på lav belastning gjennom hele testen.

For elektriske kjøretøy er datasettet betydelig mindre. Også her er det benyttet data fra årene 2012 til 2017, men her er både varebiler og personbiler inkludert. I tillegg er følgende filter benyttet:

- Resultat fra NEDC-test på mellom 90 og 400 Wh/km
- Motoreffekt over 40 kW.

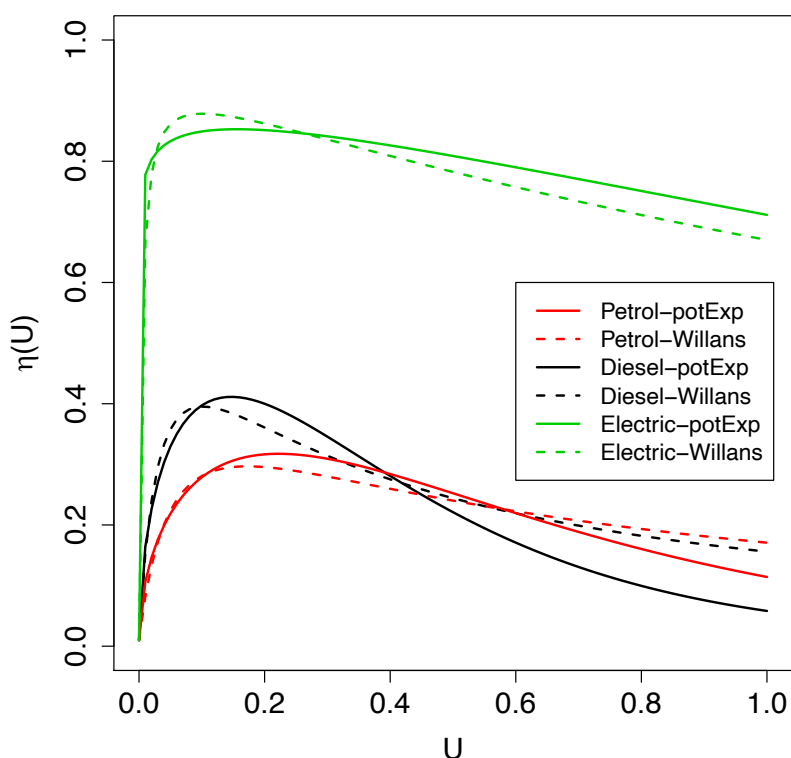
For å kunne skille mellom estimering og validering er datasettet delt i to. For bensinkjøretøy er det 24 000 kjøretøy i testsettet, og 3 580 kjøretøy i valideringssettet. Tilsvarende tall er 35 000 og 2 146 for dieselskjøretøy, og 4 500 og 696 for elektriske kjøretøy. Tabell 18 viser hvilke parametere som er benyttet i estimeringen.

Tabell 18: Parametere for bensin, diesel og elektrisk som har blitt benyttet for å estimere virkningsgradsfunksjoner

	Bensin	Diesel	Elektrisk
Frontareal $A$ ( $m^2$ )	3,4	3,4	2,8
Koeffisient for rullestand $C_r$	0,015	0,015	0,015
Koeffisient for luftstand $C_d$	0,3	0,3	0,3
Lufttetthet $\rho$	1,24	1,24	1,24
Brennverdi $HV$ (MJ/kg)	43,9	43,1	-
$CO_2$ -utslipp ved forbrenning $E_s$ (g/kg)	3180	3140	-

### 3.4 Resultater fra estimering

Resultatet fra estimeringen er vist i Figur 10. Her er virkningsgrad på y-aksen og utnyttet motoreffekt på x-aksen. De heltrukne linjene viser estimert virkningsgrad med potExp-formelen som grunnlag, mens de stiplede linjene viser estimat basert på Willans approksimasjon. For alle tre motortyper ser en at kurvene stiger til et maksimum før virkningsgraden avtar med økende motorlast. Som forventet, ser en at elektriske kjøretøy har en betydelig høyere effektivitet enn forbrenningsmotorer, og at dieselmotorer ligger høyere enn bensinmotorer i venstre halvdel av figuren.



Figur 10: Estimat for virkningsgrad som funksjon av relativt effektuttak. Resultatene er vist for potExp-formelen i heltrukken linje og stiplet linje for Willans-formelen

De estimerte parameterne for kurvene i Figur 10 er vist i Tabell 19.

Tabell 19: Estimerte parametere for potExp ( $\beta_{1,2,3}$ ) og Willans ( $\alpha_{1,2,3}$ ). Personbil/varebil.

	<b>Bensin</b>	<b>Diesel</b>	<b>Elektrisk</b>
$\beta_1$	1,2856	1,9725	0,9767
$\beta_2$	0,5795	0,5458	0,05157
$\beta_3$	2,6255	3,7131	0,3309
$\alpha_1$	0,1181	0,0544	0,0046
$\alpha_2$	2,1153	1,5247	1,0607
$\alpha_3$	3,9871	5,2731	0,4495

### 3.5 Validering

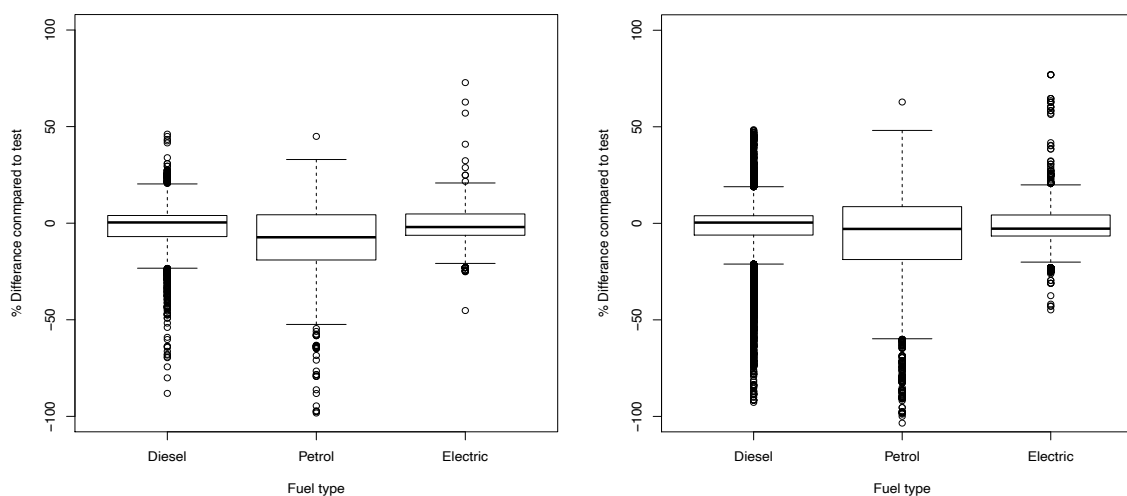
Som nevnt tidligere er det satt av en del av datasettet til bruk i validering av estimatene. I tillegg er det estimert verdier for *konstante* virkningsgrader som har minst mulig avvik fra måleresultat. Dette for å undersøke hvordan en konstant verdi ville målt seg mot funksjoner. Resultatene fra valideringen er vist i Tabell 20, og vi ser at potExp-funksjonen gir best resultat på de fleste. Unntaket er i valideringssettet for bensinkjøretøy, samt både estimering og validering for elektriske kjøretøy, hvor Willans approksimasjon gir best resultat.

Tabell 20: Totalt kvadrert avvik mellom målt og estimert resultat. En verdi på 0 vil tilsa ingen avvik

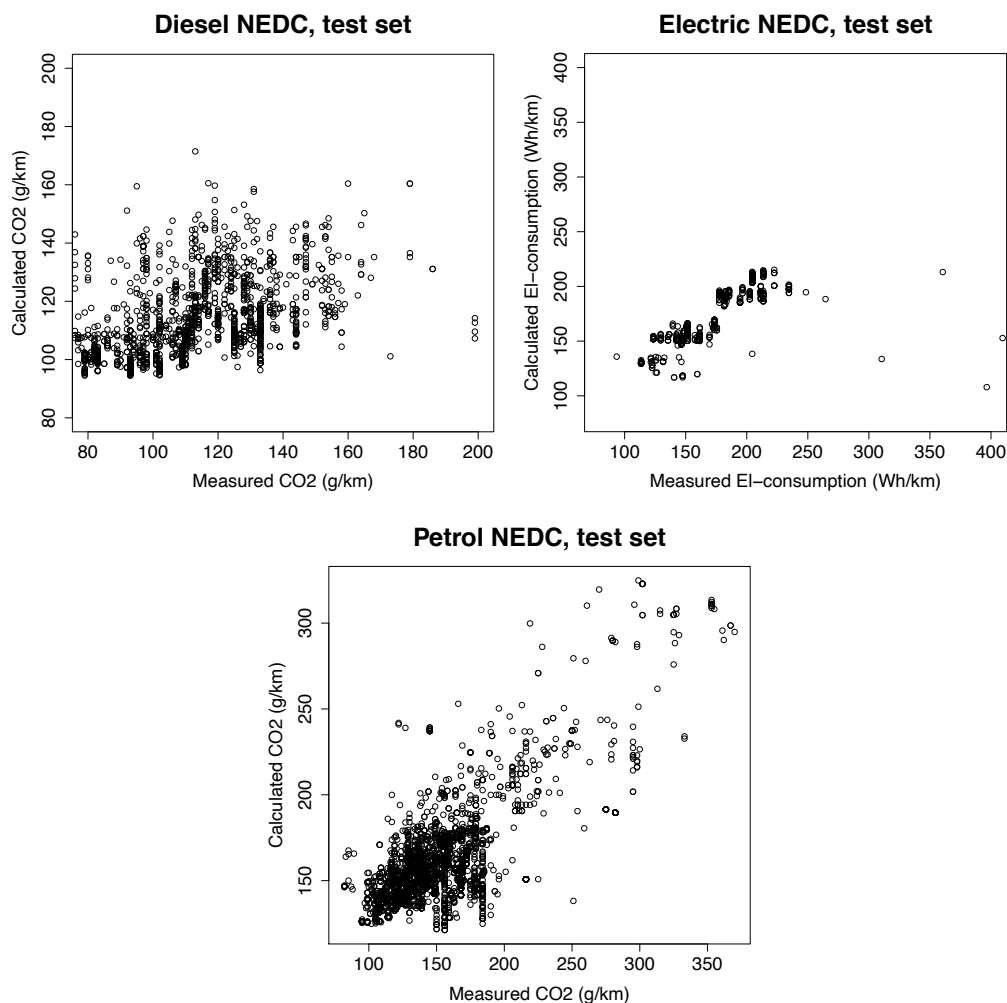
	Bensin		Diesel		Elektrisk	
	Estimering	Validering	Estimering	Validering	Estimering	Validering
<i>N</i>	24 000	3 580	35 000	2 146	4 500	696
Konstant	31 161 445	3 626 154	9 522 134	555 581	2 742 900	355 273
Willan	24 665 965	<b>3 431 238</b>	9 359 874	541 704	<b>2 587 520</b>	<b>338 495</b>
potExp	<b>24 428 548</b>	3 444 883	<b>9 272 384</b>	<b>536 312</b>	2 626 307	341 926

I tillegg er det sett på avviket mellom målt og estimert resultat fra NEDC-testen for alle data som ble benyttet i estimeringen. Figur 11 viser at median avvik ligger rundt 0, bortsett fra bensinkjøretøy, hvor estimert utslipp ligger noe under det som er målt. Figuren viser også at spredningen er omtrent symmetrisk. Dette er videre undersøkt i

Figur 12, hvor et perfekt resultat ville hatt alle punkter liggende langs diagonalen. For elektriske kjøretøy ligger de fleste punkter nært diagonalen, men for bensin og diesel er spredningen større. Spesielt for dieselskjøretøy ser vi også en skjevhet i punktskyen. Antageligvis ligger noe av forklaringen i at flere av diesel- og bensinkjøretøyene har manuelt gir, som gir en ekstra dimensjon av usikkerhet som vår representasjon ikke er detaljert nok til å fange opp. For elektriske kjøretøy er det ikke girutveksling på samme måte, som gjør at utslaget blir mindre på punktskyen.



Figur 11: Spredning for avvik mellom målt og estimert resultat. Hver «boks» representerer halvparten av alle resultat, med heltrukken linje som median. Venstre: test, høyre: validering.



Figur 12: Hvert punkt viser målt verdi (x-aksen) mot estimert verdi (y-aksen) for ett kjøretøy.

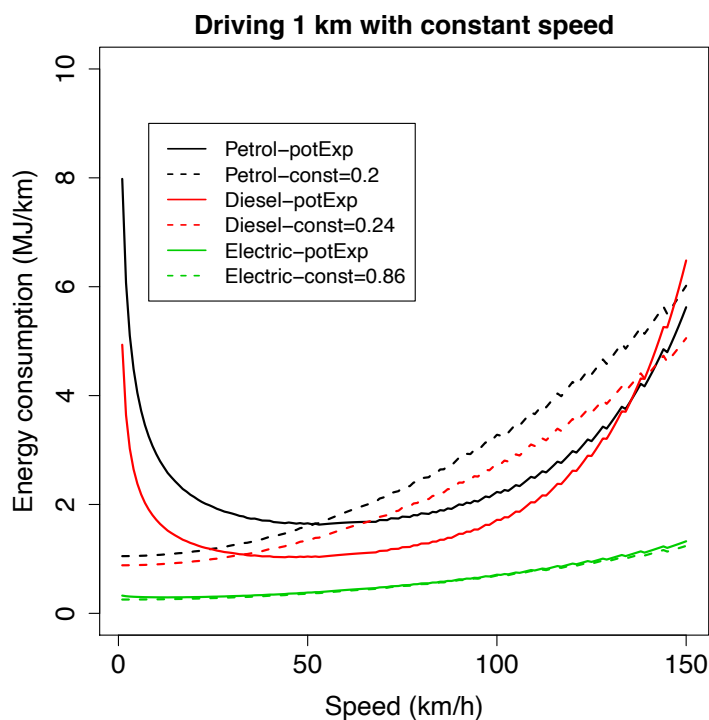
### 3.6 Anbefalte funksjoner for oppdatering av fartsmodul

Basert på resultatene presentert i notatet anbefales det å implementere virkningsgradsfunksjoner for personbiler med potExp-formen i fartsmodulen, med parametrene vist i *Tabell 21*:

Tabell 21: Anbefalte verdier for hver drivstofftype.

	Bensin	Diesel	Elektrisk
$\beta_1$	1,2856	1,9725	0,9767
$\beta_2$	0,5795	0,5458	0,05157
$\beta_3$	2,6255	3,7131	0,3309

For å vise hvilket utslag en virkningsgradsfunksjon vil ha relativt til en konstant virkningsgrad, er det gjort en beregning av energiforbruk for et kjøretøy som kjører en strekning på 1 km i konstant fart. Figur 13 viser dette for konstant fart mellom 0 og 150 km/t. Her ser vi at en konstant virkningsgrad vil føre til en sammenheng som er stigende, og kun avhengig av påvirkning fra luftmotstand. Ved å ta hensyn til motorens virkningsgrad, ser vi at resultatet blir annerledes. Spesielt gjelder dette for lav og høy fart. For elektriske kjøretøy er forskjellen liten (øker litt med økende fart).



Figur 13: Estimert energiforbruk fra en personbil på 1500 kg med motor på 100 kW, gitt kjøring i konstant fart. Stiplet linje er med konstant virkningsgrad, heltrukken linje er med estimerte virkningsgradsfunksjoner

## 4 Oppsummering

Arbeidet i denne rapporten beskriver en videreutvikling av fartsmodulen for å bedre kunne modellere kjørefart og utslipp i høye fartsgrenser. Resultatene er implementert i fartsmodulen som brukes fra og med versjon 4.1 av RTM og versjon 6.71 av EFFEKT.

Oppdateringene gjør at fartsmodulen er i stand til å estimere kjørefart og utslipp på veier med fartsgrense opp til og med 120 km/t. I løpet av prosjektet er det nevnt noen momenter som kan følges opp i det videre. For eksempel tar ikke fartsberegningen hensyn til om veien er i tunnel eller ikke. Observasjonene som ble analysert i dette prosjektet viste at farten på flerfeltsveg var lavere i tunnel enn utenfor, men at det ikke var noen spesiell forskjell på tofeltsveier. Selv om det er mange fartsobservasjoner som ligger til grunn, så er det relativt få trafikkregistreringsstasjoner hvor observasjonene er gjort. Det kan derfor ikke utelukkes at det er andre eksterne faktorer som påvirker farten som ikke er hensyntatt i analysene, og derfor er det vanskelig å konkludere med fart i/utenfor tunnel.

Av andre momenter som kan påvirke fartsvalg så kan det også trekkes frem feltvalg på flerfeltsveier. Analysene viser at det er forskjell i fartsvalg mellom kjørefelt, og at fartsnivået er høyere i venstre felt. Per i dag er ikke transportmodellene så detaljert at det tas hensyn til feltvalg, slik at eventuelle forbedringer i fartsmodulen rundt dette vil ikke være av nytte for de verktøy som baserer seg på resultat fra fartsmodulen.

Den norske kjøretøyparken er i stor endring, og vi får en større og større andel av batterielektriske biler. Bruksmønsteret til elbiler kan skille seg fra andre biltyper på grunn av elbilfordeler og egenskaper ved selve elbilen, for eksempel rekkevidde og lademuligheter. I noen tilfeller kan det tenkes at de elbilene med kortest rekkevidde vil kjøre saktere enn normalt for å være sikker på å komme seg frem til destinasjonen. Ved en eventuell oppdatering av metodikken i transportmodeller som bedre ivaretar egenskaper til en mer variert bilpark, bør det samtidig analyseres variasjon i fartsvalg mellom ulike biltyper.

Virkningsgradsfunksjonene som er estimert i dette prosjektet har gyldighetsområde for personbiler og varebiler, på grunn av omfanget i datagrunnlaget. Per i dag finnes det ikke tilsvarende åpne data fra typegodkjenninger fra ulike typer tyngre kjøretøy. Det vil ikke nødvendigvis være en svakhet i denne sammenhengen, da kjørefarten til tyngre kjøretøy er begrenset av fartssperre i stedet for fartsgrense. Allikevel vil det i andre sammenhenger være fordelaktig å estimere virkningsgradsfunksjoner for tyngre kjøretøy, for eksempel hvis man i en ny trasé har store endringer i stigningsforhold, som vil påvirke fartsprofil og utslipp fra tyngre kjøretøy.

## Referanser

Calvi, A., De Blasiis, M. R., Guattari, C. (2012), An Empirical Study of the Effects of Road Tunnel on Driving Performance, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 53.

de Andrade, G. R., Pitombo, C., Cunha, A. L. N., Setti, J. R (2016): A Model for Estimating Free-Flow Speed on Brazilian Expressways, *Transportation Research Procedia*, Volume 15, 2016

Deardoff, M. D, Wiesner, B. N, Fazio, J. (2011): Estimating Free-flow Speed from Posted Speed Limit Signs, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 16, Pages 306-316.

European Commission (2016): International Technical Harmonisation. Text. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - European Commission. July 5, 2016. [https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/technical-harmonisation/international\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/technical-harmonisation/international_en).

Gong, H., & Stamatiadis, N. (2008). Operating speed prediction models for horizontal curves on rural four-lane highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2075).

Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2007). *Vehicle propulsion systems* (Vol. 1). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hjelkrem, O. A. (2015). Determining Influential Factors on the Threshold of Car-Following Behavior. *Transportation Research Board 94th Annual Meeting* (No. 15-4882).

Hjelkrem, O. A., Arnesen, P., Rennemo, O. M., Dahl, E., Thorenfeldt, U. K., Kroksæter, A., Kristensen, T. & Malmin, O. K. (2017). Kjøretøybasert beregning av fart, energi og utslipp. SINTEF-rapport 2017:31.

Kockelman, K. (2006): CRA International, Inc., Safety Impacts and Other Implications of Raised Speed Limits on High-Speed Roads. *Transportation Research Board*.

Malmin, O. K., Arnesen, P., Babri, S., Hjelkrem, O. A. & Thorenfeldt, U. K. (2019): CUBE - Teknisk dokumentasjon av Regional persontransportmodell. SINTEF.

Parker Jr, M. (1997): Effects of Raising and Lowering Speed Limits on Selected Roadway Sections. *Federal Highway Administration*.

Statens vegvesen (2015a): Brukerveiledning EFFEKT 6.6. Rapport nr 356. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen (2015b): Dokumentasjon av beregningsmoduler i EFFEKT 6.6. Rapport nr 358. Vegdirektoratet.

TRB (Transportation Research Board), 2011: Modelling Operating Speed: Synthesis Report. In *E-Circulars*, Washington DC. p. 126.







Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)