

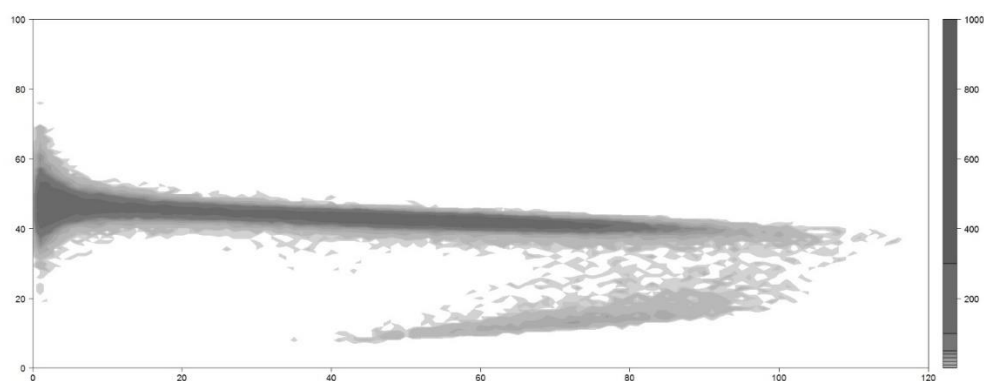
2017:00031 - Åpen

# Rapport

## Kjøretøybasert beregning av fart, energi og utslipp

### Forfattere

Odd Andre Hjelkrem, Petter Arnesen, Ola Rennemo, Erlend Dahl, Unn Karin Thorenfeldt, Anders Kroksæter, Terje Kristensen og Olav Kåre Malmin





# Rapport

## Kjøretøybasert beregning av fart, energi og utslipp

**RAPPORTNR**  
2017:00031**VERSJON**  
1.00**DATO**  
2017-11-28**FORFATTERE**Odd Andre Hjelkrem, Petter Arnesen, Ola Rennemo, Erlend Dahl, Unn Karin Thorenfeldt,  
Anders Kroksæter, Terje Kristensen og Olav Kåre Malmin**OPPDRAKSGIVER**

Statens vegvesen

**OPPDRAKSGIVERS REF.**

Oskar Kleven

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

71

**GRADERING**

Åpen

**GRADERING DENNE SIDE**

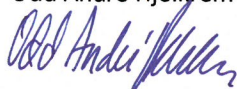
Åpen

**ISBN**

978-82-21-40670-5

**UTARBEIDET AV**

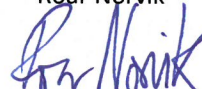
Odd Andre Hjelkrem

**KONTROLLERT AV**

Anders Kroksæter

**GODKJENT AV**

Roar Norvik





## Forord

Denne rapporten presenterer resultatene fra prosjektet *Kjøretøybasert beregning av fart, energi og utslipp*. Prosjektet er gjennomført av SINTEF Teknologi og samfunn avd. Sikkerhet og mobilitet (tidligere avd. Transportforskning), på oppdrag av Statens vegvesen Vegdirektoratet gjennom rammeavtalen for *Regionale Transportmodeller (RTM)*.

Den overordnede målsettingen med prosjektet har vært å utvikle en fartsmodul for en mer realistisk beregning av fart til bruk i Statens vegvesen sine verktøy RTM og EFFEKT. Prosjektet bygger videre på prosjekt som SINTEF har gjennomført tidligere, hvorav de viktigste er *Fartsmodell for næringslivets transporter* og *Data og metoder for modellering av biltrafikkens fart i transportmodeller*. Arbeidet har bestått av to hoveddeler. Den første delen har bestått av faglig metodeutvikling og nødvendige avklaringer for å kunne bringe kunnskapen opp på et nødvendig nivå for implementering. Den andre delen har bestått av utviklingen av en modul med et åpent grensesnitt.

Prosjektgruppen ved SINTEF har bestått av Unn Karin Thorenfeldt, Anders Kroksæter, Odd André Hjelkrem, Petter Arnesen, Anders Straume, Ola Rennemo, Erlend Dahl, Olav Kåre Malmin og Dag Bertelsen. Anders Kroksæter har hatt ansvaret for kvalitetssikring.

Statens vegvesen har sørget for å stille data til rådighet for prosjektet. En arbeidsgruppe ledet av Oskar Kleven fra Vegdirektoratet har fulgt prosjektet. De har bidratt med viktige innspill underveis. Det ble også avholdt en workshop i starten av prosjektet for å belyse problemstillinger. Her deltok også Trude Tørset og Arvid Aakre fra NTNU med gode innspill.

Trondheim, november 2017



Roar Norvik

Forskningssjef



## Sammendrag

Rapporten beskriver arbeidet med å utvikle en beregningsmodell for fart, energi og utslipp for bruk i verktøy for nytte/kostnads-analyser (NKA), primært regionale transportmodeller (RTM) og EFFEKT. Bakgrunnen for arbeidet er behovet for å beregne fart på en enhetlig måte uavhengig av hvilket ledd i NKA-verktøyrekken beregningen gjøres. Formålet med prosjektet har vært å videreutvikle fartsberegningsmetodikken, og implementere dette i dagens analyseverktøy, basert på tidligere arbeider som SINTEF har gjort, blant annet beskrevet av Tørset m.fl. (2011) og Levin m.fl. (2015). Dette har krevd utvikling av både metodiske og systemtekniske løsninger.

Beregningene som er presentert i rapporten brukes til å estimere fart, forbruk og utslipp for kjøretøy på veg. Metoden er basert på kjøretøyegenskaper, vegegenskaper, fartsmodell og sjåføregenskaper, og starter med å beregne energibehovet for å kunne flytte et kjøretøy langs en strekning, etter et fartsprofil. Ved hjelp av kjente sammenhenger, og virkningsgrader på grunnleggende prosesser, vil dette gi en beregningsmåte som kan overføres til flere kjøretøy, kjøreruter og sjåførtyper. En grov oversikt over beregningsmetodikken er vist i figuren under.



*Figur 1: Flytskjema for beregning av fart, energi og utslipp.*

En stor del av prosjektet har hatt fokus på utvikling av en selvstendig modul for beregningsrutinene. Modulen er bygd opp slik at den inneholder alle beregningssteg vist i figuren over. Med selvstendig menes at den kan både kjøres som et selvstendig program, og kjøres via andre program. Dette betyr at modulen kan benyttes også av systemer som ikke inngår i NKA-verktøyene.

I løpet av prosjektet har det blitt gjort flere analyser for å bygge opp det faglige grunnlaget for beregningsmodulen. Analysene ble valgt ut i forkant av prosjektet, og er hovedsakelig gjort for å utvide validitetsområdet til beregningene. Den første arbeidspakken bestod av en estimering av friflytsfart for lette kjøretøyer basert på tilgjengelige norske registreringer. Fartsmodellen ble estimert på grunnlag av 130 000 turer, som inkluderte omtrent 245 millioner GPS-datapunkter. Den funksjonelle formen til fartsmodellen ble tilpasset til følgende regresjonsmodell:

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

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 ( $x_k$ ). Det ble estimert en fartsmodell for hver av de følgende kategoriene: 2-feltsveg med fartsgrense 70, 80 eller 90 km/t, 2-feltsveg med fartsgrense 50 eller 60 km/t, og 4-feltsveg 70, 80, 90 eller 100 km/t.

Den andre arbeidspakken fokuserte på å inkludere en korleksjon for trafikkbelastning, basert på omtrent 0,5 milliarder datapunkter fra Statens vegvesens tellepunkt. For flere ulike vegkategorier ble det estimert "volume/delay"-funksjoner (VDF) på formen

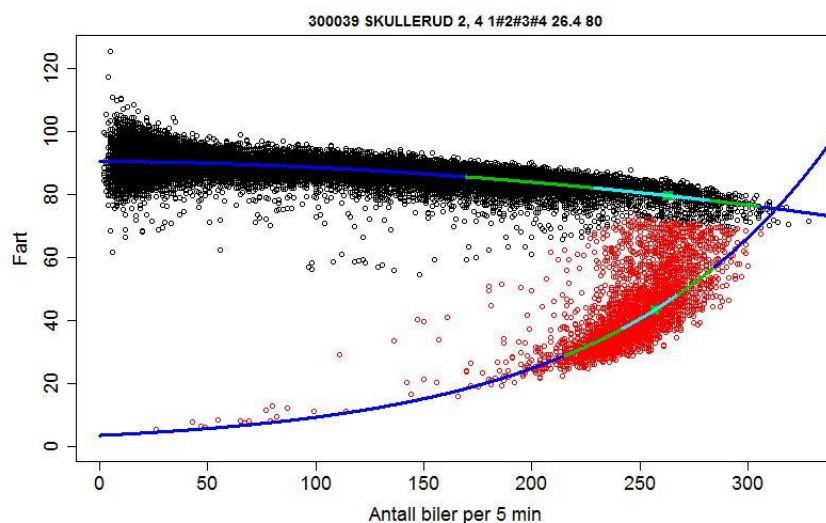
$$fart = a + bx + cx^2$$

for observasjoner uten sammenbrudd i trafikken. Her er  $x$  antall biler som passerer tellepunktet per 5 minutt, og  $a$ ,  $b$  og  $c$  er estimerte koeffisienter. Regresjonslinjen for sammenbrudd antas å være på formen

$$fart = Ce^{\alpha x}$$

der  $C$  og  $\alpha$  er koeffisientene som må estimeres i dette tilfellet. I figuren under er det for et tellepunkt vist registreringer som er klassifisert som sammenbrudd (i rødt) og ikke sammenbrudd (svart). Det er også vist kurven til en VDF som er tilpasset de observerte data. De grønne/lyseblå linjene viser fordeling av sammenbrudds-punkter.





Figur 2: Eksempel på VDF, med de observasjonene som ligger til grunn for estimeringen.

Den tredje arbeidspakken bestod av en kartlegging av virkningsgrader og utslippsfaktorer for ulike kjøretøytyper. Her ble det kartlagt flere parametere som er viktig for å beregne energiforbruk og resulterende utslipp for de fleste relevante kjøretøytyper. Allikevel er det flere parametere som det er vanskelig å finne data for, som for eksempel ladbare hybrider. Energiberegningene er basert på den velkjente sammenhengen mellom effektbehovet for fremdrift, gitt fart, gravitasjonsmotstand, rullestand, luftmotstand og akselerasjonsmotstand:

$$P_f = v \{R_g + R_r + R_l + R_a\}$$

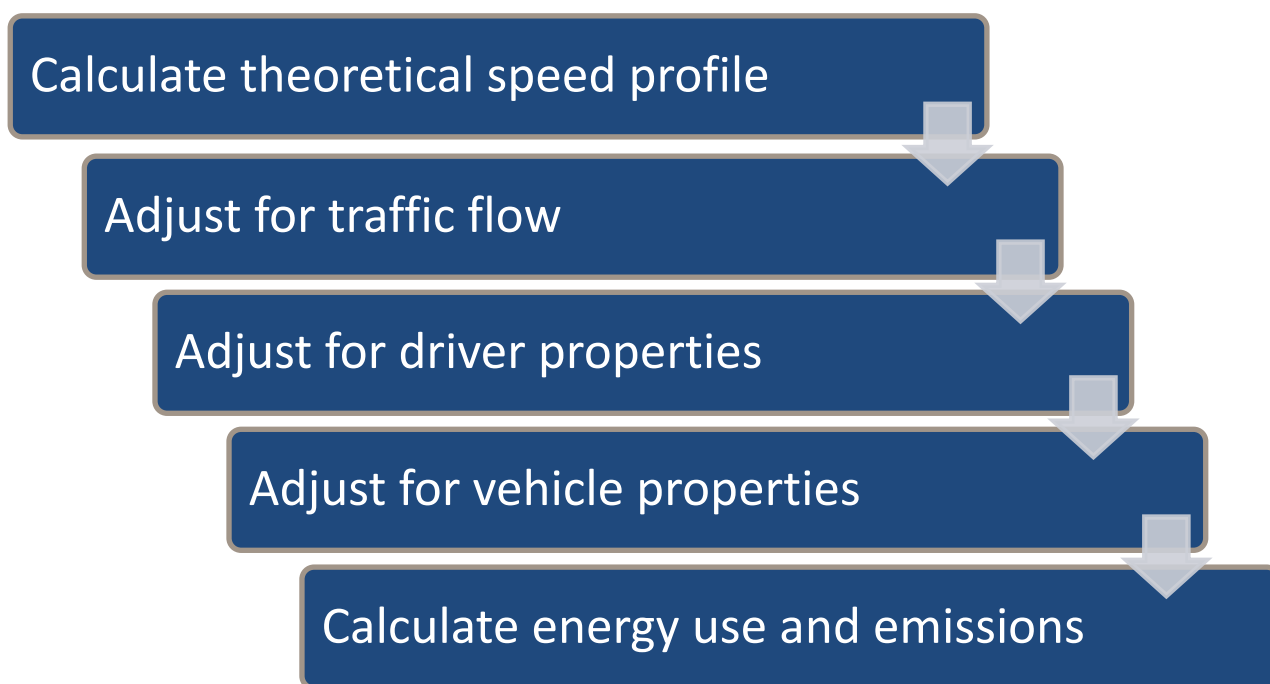
Den fjerde arbeidspakken omhandlet betydningen av ulike kjøretøy og sjåfører for beregningen. Det som angår kjøretøy har vært dels en kartlegging av fysiske størrelser på kjøretøy (vekt, bredde, motstandskoeffisienter osv.), dels en beskrivelse av kjøretøyparkens sammensetning. Det siste har blitt utført med Transportøkonomisk Institutt som samarbeidspartner. Arbeidspakke fire inneholdt også en undersøkelse av betydningen av sjåføratferd, inkludert en kartlegging av sjåførsesifikke parametere knyttet til kjøremåte og planleggingshorisont (noe som påvirker blant annet akselerasjon og retardasjon).

Selv om prosjektet har vært innholdsrikt, er det avdekket flere oppgaver undervegs som bør utforskes videre. Spesielt gjelder dette de områder hvor det ikke er funnet nok empirisk datagrunnlag, som for eksempel veger med smal vegbredde, helning, krapp kurvatur o.l. Det samme gjelder for eventuelle effekter fra vær og føre. For kjøretøyeenskapene er det en del uavklart når det gjelder drivverk. Dette er data som finnes blant bilprodusentene, men som er vanskelig å få tilgang til på grunn av konkurransehensyn. I tillegg er det potensiale for å forbedre dagens metodikk for behandling av kø, både årsakssammenheng, køforplantning og -opløsning.

## Summary

This report describes a model for calculating the speed, energy and emissions from a vehicle, developed for use by tools for cost-benefit analyses (CBA), primarily Regional Transport Models (RTM) and EFTEKT. The motivation for the work has been the need for a unified methodology for speed calculation, independent of which step in the CBA the calculation is performed. The main goal has been to develop a module for calculating speed, energy and emissions, and to implement the module in the analysis tools in use today. It is based on previous work by SINTEF, including Tørset et al (2011) and Levin et al (2015). The nature of the project has resulted in development of both methodology and software.

The calculations described in the report are used for the estimation of speed, energy use and emissions from road based vehicles. The method is based on detailed information about vehicle-, road- and driver properties, as well as traditional speed models. By using well known formulas, as well as energy conversion efficiencies, the energy use is calculated based on the resulting speed profile. In this way, the methodology can in principle be used for any type of vehicle, and any type of engine. A sketch of the calculation steps is shown in Figure 3 .



*Figure 3: Flow chart showing the calculation steps for speed, energy and emissions.*

An important part of the project was devoted to developing an independent module for the calculations. The module is structured to contain all the calculation steps shown in the figure above. The module can be run as a stand-alone program, or embedded in other programs. This means it can be used by any system, not only CBA tools.

During the project period, several analyses were carried out to strengthen the calculation model. The first analysis was an estimation of a theoretical speed model for cars. The estimation was done on the basis of 130 000 trips, which spanned over a total of 245 million GPS-points. The functional form of the speed model was:

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

Here,  $C(x_g)$  are coefficients defined as reference speed for a specific speed limit, and  $U(\cdot)$  is a linear function of the variables road width ( $x_d$ ), upgrade ( $x_s$ ), downgrade ( $x_f$ ) and curvature ( $x_k$ ). A speed model was estimated for each of the following categories: two lane road with speed limit 50 or 60 km/h, two lane road with speed limit 70, 80 or 90 km/h, and four lane road with speed limit 70, 80, 90 or 100 km/h.

The second analysis focused on including a correction for traffic volume, based on about 0.5 billion data points from loop detectors. Several Volume Delay Functions (VDF) were estimated to the following expression:

$$speed = a + bx + cx^2$$

For observations without traffic breakdown. Here,  $x$  equals the number of passing vehicles in a 5 minute interval, and  $a$ ,  $b$  and  $c$  are estimated coefficients. For observations with traffic breakdown, the speed is expressed as

$$speed = Ce^{\alpha x}$$

In this case,  $C$  and  $\alpha$  are coefficients to be estimated. In the figure below, several observations from a loop detector is displayed. The black observations are without traffic breakdown, while the red are classified as traffic breakdown. A VDF is fitted to the observed data, with a green/light blue line indicating the distribution of breakdown points.

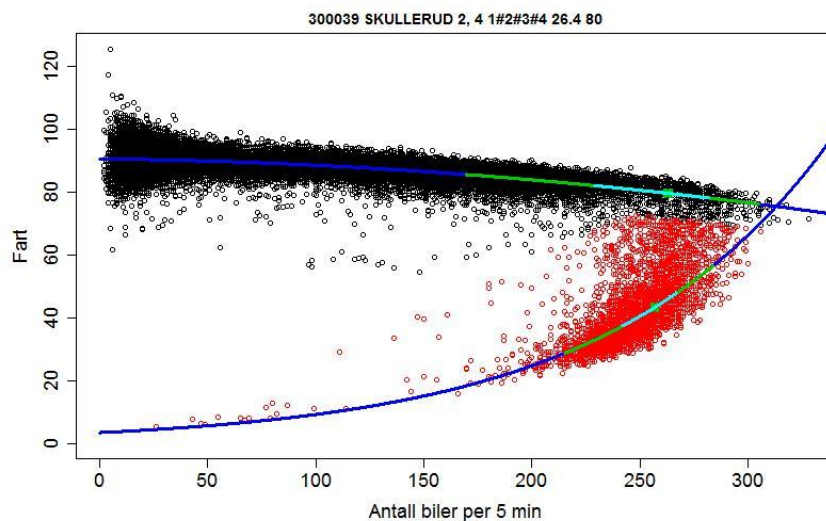


Figure 4: An example of a VDF fitted to observations.

The focus of the third analysis was to map energy conversion coefficients and emission factors for different engine types and energy sources. Here, some key parameters for calculating energy consumption and resulting emissions were estimated based on available data sources. Still, some parameters were not mapped due to limited data, for example plugin-hybrid electric vehicles (PHEV). The energy calculations are based on the well-known relationship between required effect at a given speed, and gravitational-, rolling-, air-, and acceleration resistances:

$$P_f = v \{R_g + R_r + R_l + R_a\}$$

The fourth analysis was concerned with the impact of vehicle and driver properties on the calculated speed. Vehicle properties of interest were the physical properties of different vehicle types, e.g. weight, width and resistance coefficients, as well as the vehicle park composition. The latter work was done in cooperation with the Institute of Transport Economics (TØI). Finally, the effect of driver properties on key parameters were investigated, such as acceleration, deceleration and horizon length.

During the project period, several issues for further research was identified. This is especially the case for empirical data, where an increase in diversity with regards to road and vehicle properties is required. For road properties, more data is needed from segments with deviating road width, slopes and curvatures, as well as data from periods with adverse weather conditions. Concerning vehicle properties, the data need is generally narrowed down to engine properties, which is hard to get access to due to industrial competition. Additionally, there is a potential for improving the methodology for origin, propagation and dissipation of queues.

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>3</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1 Bakgrunn</b>	<b>13</b>
<b>2 Beskrivelse av modell</b>	<b>15</b>
2.1 Beregningsrutine	16
<b>3 Faglig metodeutvikling</b>	<b>18</b>
3.1 Estimering av fartsmodell for lette kjøretøy	18
3.1.1 Tilrettelegging for analyse	19
3.1.2 Analysemetodikk	20
3.1.3 2-felt 70, 80, 90 km/t	22
3.1.4 2-felt 50, 60 km/t	24
3.1.5 4-felt 70, 80, 90, 100 km/t	26
3.2 Korreksjon for trafikkbelastning	28
3.2.1 Estimering av VDF - formelverk	29
3.2.2 Beregning av sannsynlighet for sammenbrudd i trafikken	36
3.2.3 Samvirkende effekter mellom kjøretøy	37
3.3 Beregning av energiforbruk, drivstofforbruk og utslipp	43
3.3.1 Virkningsgrader	44
3.3.2 Beregning av utslipp	49
3.4 Betydning av kjøretøy og sjåfør	53
3.4.1 Kjøretøypark	53
3.4.2 Betydningen av kjøretøyets egenskaper	54
3.4.3 Betydningen av sjåføratferd	55
3.5 Håndtering av forsinkelse i kryss og andre flaskehalser	58
<b>4 Frittstående beregningsmodul</b>	<b>59</b>
4.1 Implementering av fartsmodell for lette kjøretøy	61
4.2 Tilrettelegging for bruk av VDF i RTM	62
<b>5 Oppsummering og mulige tema for videreutvikling</b>	<b>66</b>
<b>6 Referanser</b>	<b>68</b>

## TABELLISTE

<i>Tabell 1: Beskrivelse av et datapunkt fra en ISA-enhet.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabell 2: Estimerte parametere i fartsmodellen for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 70, 80 og 90 km/t. Legg merke til at den korrigerte referansefarten for 90 km/t er satt til fartsgrensen (merket *) da ingen tellepunkter med tilsvarende feltkode og fartsgrense finnes i datagrunnlaget.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabell 3: Estimerte parametere i fartsmodellen for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 50 og 60 km/t.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabell 4: Estimerte parametere i fartsmodellen for lette biler på 4-feltsveg med fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t..</i>	<i>26</i>
<i>Tabell 5: Resulterende estimer for VDF etter sammenstilling. ....</i>	<i>36</i>
<i>Tabell 6: Estimerte parametere for kurvene som definerer sannsynligheten for sammenbrudd i Figur 21. ....</i>	<i>37</i>
<i>Tabell 7: Antall datapunkter og sammenbrudds-punkter registrert som funksjon av valgt tungbilandel. Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 5,6 meter.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabell 8: Antall datapunkter og sammenbrudds-punkter registrert som funksjon av valgt tungbilandel. Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 12,5 meter.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabell 9: Anbefalte verdier for virkningsgrader ved elektrisk drivlinje og regenerativ bremsing. ....</i>	<i>47</i>
<i>Tabell 10: Verdier for beregning av forbruk og lokalt CO<sub>2</sub>-utslipp.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabell 11: Gjennomsnittlig utslipp for personbiler i Norge (TØI, 2011). ....</i>	<i>51</i>
<i>Tabell 12: Tier 1 utslippsverdier som gram NO<sub>x</sub> pr kg drivstoff for ulike kjøretøytyper. Kilde: (EMEP, EEA, 2016).....</i>	<i>52</i>
<i>Tabell 13: Verdier for gjennomsnitt, standardavvik, maksimum og minimum av maksimum akselerasjon og maksimum retardasjon for tre forskjellige kjøremåter (Berge, 2007).....</i>	<i>56</i>
<i>Tabell 14: Utvidet VDF-definisjon for alle vegtyper. ....</i>	<i>63</i>

## FIGURLISTE

<i>Figur 1: Flytskjema for beregning av fart, energi og utslipp.....</i>	<i>3</i>
<i>Figur 2: Eksempel på VDF, med de observasjonene som ligger til grunn for estimeringen. ....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 3: Flow chart showing the calculation steps for speed, energy and emissions.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4: An example of a VDF fitted to observations. ....</i>	<i>7</i>
<i>Figur 5: Skisse av komponentene som inngår i beregningsmodellen. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figur 6: Eksempel på rapportering fra beregningsmodellen. Øverste graf: Den røde linjen er beregnet fart, den grønne linjen viser fart beregnet med fartsmodell, oransje linje viser motoreffekt, og blå linje viser bremseeffekt. Nederste graf viser høyde- og krumningsprofil på ruten.....</i>	<i>16</i>
<i>Figur 7: Vertikalkurvaturen til en tenkt veglinje. De røde strekene viser hvordan linjen er oppdelt i homogene segmenter. På første segment fra venstre er det et vegkryss, og på femte segment fra venstre øker fartsgrensen. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figur 8: Illustrasjon av delberegninger. 1: En fartsmodell benyttes for å beregne en fart for hvert segment basert på kurvatur, vegbredde og fartsgrense. 2: Det korrigeres for eventuell trafikkbelastning. 3: En dempingsrutine jevner ut fartsprofilen. 4: Begrensninger i motoreffekt, påvirkning av føreradferd, og forhold i overgangen mellom segmenter (kryss) tas hensyn til. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figur 9: Datapunktene (røde og svarte) som blir brukt til å estimere fartsmodell for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 70, 80 og 90 km/t. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figur 10: Datapunktene (røde og svarte) som blir brukt til å estimere fartsmodell for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 50 og 60 km/t. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figur 11: Datapunktene (røde og svarte) som blir brukt til å estimere fartsmodell for lette biler på 4-feltsveg med fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figur 12: Fundamentaldiagrammet for trafikkflyt. Figuren til venstre viser den teoretiske sammenhengen, figuren til høyre viser en kurvetilpasning til trafikkdata (volum på y-aksen og tetthet på x-aksen). Kilde: Yi (2006).....</i>	<i>29</i>
<i>Figur 13: Datagrunnlag fra 286 av Statens vegvesens tellepunkt spredt utover hele Norge. Rød prikk - observert sammenbrudd. Kart -Topografisk norgeskart.....</i>	<i>29</i>
<i>Figur 14: Gjennomsnittsfarten til de bilene som passere et tellepunkt på 5 minutter plottet som funksjon av antall biler som passere. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figur 15: Svarte og røde punkter representerer henholdsvis punkter før og etter sammenbrudd med grov klassifisering. Estimerte VDF for røde og svarte punkter er vist med blå linjer. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figur 16: Estimering av VDF (blå linjer) samt fordeling til sammenbrudds- og oppbrudds-punkter. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figur 17: Tetthetsplott av datapunktene ved Sarpsfossen bru. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figur 18: Estimerte gjennomsnittlige VDF kurver for tofeltsveger.....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 19: Estimerte gjennomsnittlige VDF kurver for 4-feltsveger.....</i>	<i>35</i>
<i>Figur 20: Resulterende VDF etter sammenstilling.....</i>	<i>35</i>
<i>Figur 21: Estimert sannsynlighet for sammenbrudd gitt en etterspurt trafikk, samt tilpasset sannsynlighetskurve. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figur 22: Sammenheng mellom gjennomsnittsfart og trafikkvolum i 5-minutts intervaller for 2-feltsveger med fartsgrense 50 km/t (øverst til venstre), 60 km/t (øverst til høyre), 80 km/t (nederst til venstre) og 90 km/t (nederst til høyre). Røde punkter har høy tungbilandel, blå punkter har medium tungbilandel, grønne punkter har lav tungbilandel. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figur 23: Sammenheng mellom gjennomsnittsfart og trafikkvolum i 5-minutts intervaller for 4-feltsveger med fartsgrense 60 km/t (øverst til venstre), 100 km/t (øverst til høyre) og 110 km/t (nederst). Røde punkter har høy tungbilandel, blå punkter har medium tungbilandel, grønne punkter har lav tungbilandel. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figur 24: Estimerte sannsynlighetskurver for trafikk med tungbilandel mindre 5 % (rød), mellom 5 og 10 % (grønn), over 10 % (blå) og samlet (svart). Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 5,6 meter. ....</i>	<i>41</i>

Figur 25: Estimerte sannsynlighetskurver for trafikk med tungbilandel mindre 5 % (rød), mellom 5 og 10 % (grønn), over 10 % (blå) og samlet (svart). Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 12,5 meter. ....	42
Figur 26: Skisse over energibruk til fremdrift med en konvensjonell drivlinje, dvs uten regenerativ bremsing og kun én motor. ....	45
Figur 27: Skisse over energibruk til fremdrift med en elektrisk drivlinje og regenerativ bremsing. ....	46
Figur 28: Skisse over energibruk til fremdrift med en hybrid drivlinje og regenerativ bremsing. ....	48
Figur 29: Framskrivning av kjøretøypark for personbiler. ....	53
Figur 30: Verdier for koeffisient for luftmotstand for ulike kjøretøytyper. Kilde: PART20 (2017). ....	54
Figur 31: Registrerte fartsprofil inn mot kryss. Hentet fra Hjelkrem og Foss (2016). Rød strek er gjennomsnittsfart. Blå tykke streker viser konstante retardasjoner på 1, 2 og 3 m/s <sup>2</sup> . ....	56
Figur 32: Eksempel på resultater fra en manuell kjøring av fartsmodulen (gjennom brukergrensesnittet). Helt øverst viser oppsummerende resultater. Deretter følger to grafer som viser farts- og energieresultatene, og veigeometrien. Nederst viser lenkene og lenkesegmentene som ruten ble delt opp i, og detaljerte resultater for hver av dem, samt en del teknisk informasjon om beregningen. ....	60
Figur 33: Eksempler på implementerte kapasitetskurver. Sammenlign spesielt plot nummer 4 og 6 i denne figuren hvor skaleringen opp til flere enn 2 felt i kjøreretningen illustreres. ....	64
Figur 34: VDF-kurver for 90 km/t med 2 felt i kjøreretningen for ulike valg av $\omega$ . Fra den øverste til nederste kurven er verdien på $\omega$ lik 0, 0.0005, 0.001, 0.002, 0.005 og 0.01. ....	65
Figur 35: Nye kurver plottet mot gamle kurver. ....	65



## 1 Bakgrunn

Fart er grunnlaget for mange beregninger i ulike faser av nytte-/kostnadsanalysen (NKA). Transportmodellene benytter fart som utgangspunkt for etterspørselsberegninger og nettutlegging. Trafikantnytte-beregninger gjennomføres på grunnlag av fart fra transportmodeller. I EFFEKT er fart sammen med trafikkmengde blant det som påvirker resultatet av nytte-beregningene mest. Kvaliteten i drivstoff- og utslippsberegningene er helt avhengig av nøyaktigheten i fartsberegningene de bygger på.

For å kunne beregne fart på en enhetlig måte uavhengig av hvilket ledd i NKA-verktøyrekken beregningen gjøres, ble det besluttet å videreføre arbeidet med fart som er utført i forbindelse med avrop på rammeavtalen for NTP Transportanalyser. Et hovedmål for arbeidet har vært å utvikle beregningsfunksjoner som kan brukes fra ulike verktøy og for ulike bruksområder, slik at det vil være mulig å utføre farts-, drivstoff-, utslipps- og ruteberegninger på en ensartet måte i Statens vegvesen.

SINTEF har jobbet med utvikling av fartsmodeller i flere prosjekt. De viktigste i senere tid er forskningsrådsprosjektet *"Fartsmodell for næringslivets transporter"* (Tørset m.fl. 2011) og prosjektet som ble utført for NTP Transportanalyser og beskrevet i SINTEF-rapporten *"Data og metoder for modellering av biltrafikkens fart i transportmodeller"* (Levin m.fl. 2015).

I *"Fartsmodell for næringslivets transporter"* (Tørset m.fl. 2011) ble det utviklet et beregningsmodell for farten til tunge kjøretøy. Den tar utgangspunkt i basisfarten til kjøretøyene på flat rett veg og gir redusert fart ved smale veger, svingete veger, stigninger og fall. Resultatet blir en forventet gjennomsnittsfart på vegelementene, som er påvirket av kurvatur og vegbredde, men ikke trafikkforhold, værforhold eller sjåførenes kjørestil.

Prosjektet *"Data og metoder for modellering av biltrafikkens fart i transportmodeller"* (Levin m.fl. 2015) videreutviklet metodikk med formål å lage en realistisk fartsmodell for lette kjøretøy. Deres beregningsmodell bestod av en sekvensiell, firedelt beregning av kjørefart. De fire stegene var beregning av fart basert på (1) geometrisk utforming, (2) trafikkvolum, (3) geometrisk utforming av kryss og (4) trafikkvolum i kryss. De fire delene er ikke uavhengige av hverandre, men kan ses som et hierarki av faktorer som påvirker farten. I prinsippet vil lavere trinn overstyre fartsreduksjoner fra trinnene over.

I forkant av arbeidet som er presentert i denne rapporten, ble det utviklet en konseptuell metodikk for en mer nøyaktig beregning av fart. Denne var mer avansert enn konvensjonelle fartsmodeller fordi den også tok hensyn til kjøretøyets egenskaper og ruten kjøretøyet planlegger å ta i tillegg til geometri på vegen. Dette gir også grunnlag for å beregne et realistisk drivstofforbruk og utslipp. I forbindelse med arbeidet ble det identifisert hvilke delkomponenter som måtte videreutvikles for å få en fullverdig beregningsmodell. Dette er beskrevet i SINTEF-notatet *"Kjøretøybaserte*

beregninger av fart, drivstofforbruk og utslipp" (Kroksæter m.fl. 2015). I notatet er følgende aktiviteter knyttet til faglig metodeutvikling foreslått:

- *Estimering av fartsmodell for lette kjøretøy.* Dagens teoretiske modell for fart for personbiler er basert på den såkalte "Fransk 2-felt"-modellen (Dimaiuta m.fl. 2011). For å få en modell best mulig tilpasset norske forhold er det anbefalt å estimere en modell basert på målinger fra norske veger.
- *Kjøretøyparametere.* Dersom kjøretøyets egenskaper skal inngå i beregning av realistisk fart må det bestemmes noen sentrale kjøretøyparametere for de kjøretøytypene en vil beregne fart for.
- *Korreksjon for trafikkbelastning.* Dagens korreksjon for trafikkbelastning baserer seg på VDF-kuver. På grunn av en økt tilgjengelighet av data fra tellepunkt er det anbefalt å undersøke muligheten for å estimere et formelverk for trafikkpåvirket fart. Det er også anbefalt å undersøke hvordan effekten av trafikks sammensetning (andel tunge og lette kjøretøy) påvirker farten.
- *Problemstillinger knyttet til energi- og miljøberegninger.* Energibruk og resulterende utslipp er svært avhengig av fartsprofilen, og da spesielt svingninger i fart. En realistisk estimering av fartsprofil vil derfor føre til en mer nøyaktig beregning av energiforbruk og utslipp. I tillegg må det kartlegges mer angående sammenhengen mellom energiforbruk og lokale/globale utslipp.
- *Håndtering av kryssforsinkelse.* Prosjektet beskrevet av Levin m.fl. (2015) utviklet en metodikk for å bestemme kryssforsinkelse i RTM, basert på registrerte data. Det må undersøkes hvordan grenseoppgangen mellom ulike verktøy som beregner kryssforsinkelse kan behandles.

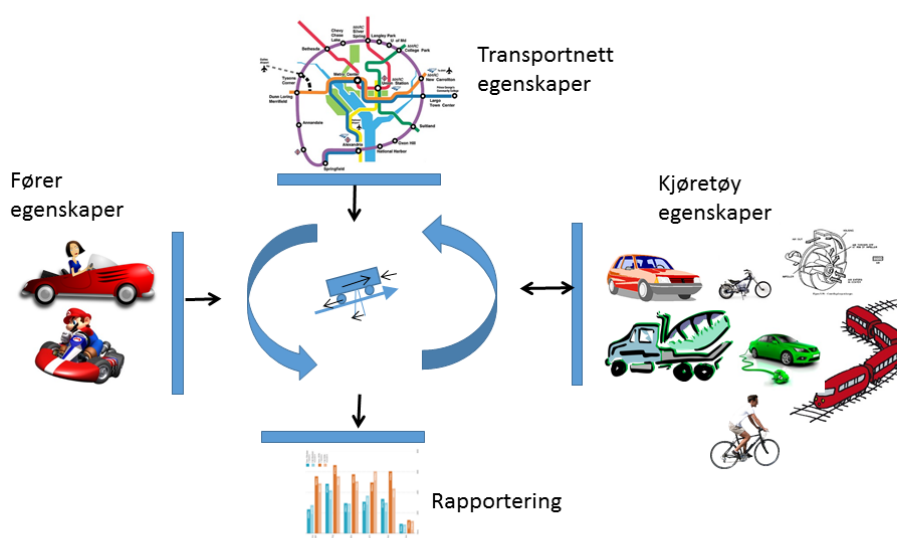
Diss aktivitetene er jobbet videre med i dette prosjektet. Rapporten beskriver arbeidet med hver aktivitet, og hvordan dette er inkorporert i fartsberegningene. I kapittel 2 er hovedstrukturen til beregningsmodellen beskrevet. Kapittel 3 beskriver arbeidet som er gjort med faglig metodeutvikling, mens kapittel 4 inneholder en oversikt over hvordan fartsberegningene er implementert i egen beregningsmodul.

Deler av prosjektet har vært av mer vitenskapelig art. Dette har ledet frem til to artikler skrevet av Arnesen og Hjelkrem (2017) og Hjelkrem og Arnesen (2017). Disse artiklene går i dybden på konkrete problemstillinger. Hovedresultatene er inkludert i denne rapporten. Det er referert til den aktuelle artikkel i teksten der det passer naturlig inn.

I løpet av prosjektet har SINTEF hatt et løpende samarbeid med NTNU, som har ledet frem til artikkelen skrevet av Marinelli m.fl. (2017). Artikkelen ser på de grunnleggende forskjellene mellom fartsmodellen som brukes i NKA-verktøyet EFFEKT pr. 2016, og fartsmodellen for lette som har blitt estimert i dette prosjektet.

## 2 Beskrivelse av modell

Modellstrukturen ble etablert i forkant av prosjektet, hovedsakelig basert på arbeidet gjort av Tørset m.fl. (2011) og Levin m.fl. (2015). Den er modulbasert, som i denne sammenheng har to betydninger. For det første er beregningsmodellen uavhengig av andre verktøy, og kan derfor være en selvstendig modul som beregner fart, energiforbruk og utslipp gitt et sett med inndata. For det andre er modellstrukturen delvis modulær, som innebærer at noen modellkomponenter kan kjøres uavhengig av andre. For å illustrere dette er det presentert en skisse i Figur 5.



Figur 5: Skisse av komponentene som inngår i beregningsmodellen.

### • Transportnettegenskaper

Vegegenskaper består av bredde, vertikalkurvatur, horisontalkurvatur, fartsgrense og noen tilleggsopplysninger. Dette blir brukt som inndata til beregningsrutinen, men det blir også brukt til å estimere ønsket friflytsfart. I prinsippet kan ønsket friflytsfart være fartsgrensen, men for best mulig resultat er det brukt to fartsmodeller, en for lette kjøretøy og en for tunge kjøretøy. Fartsmodellen gir ønsket friflytsfart som funksjon av vegegenskaper, og er basert på statistiske data innsamlet fra kjøretøy. Fartsmodell for tunge kjøretøy ble etablert før dette prosjektet, og er beskrevet av Tørset m.fl. (2011). En tilsvarende modell for lette kjøretøy basert på data fra lette kjøretøy på norske veier er derimot en del av den faglige utviklingen i denne rapporten, og er beskrevet i kapittel 3.1.

### • Kjøretøyeenskaper

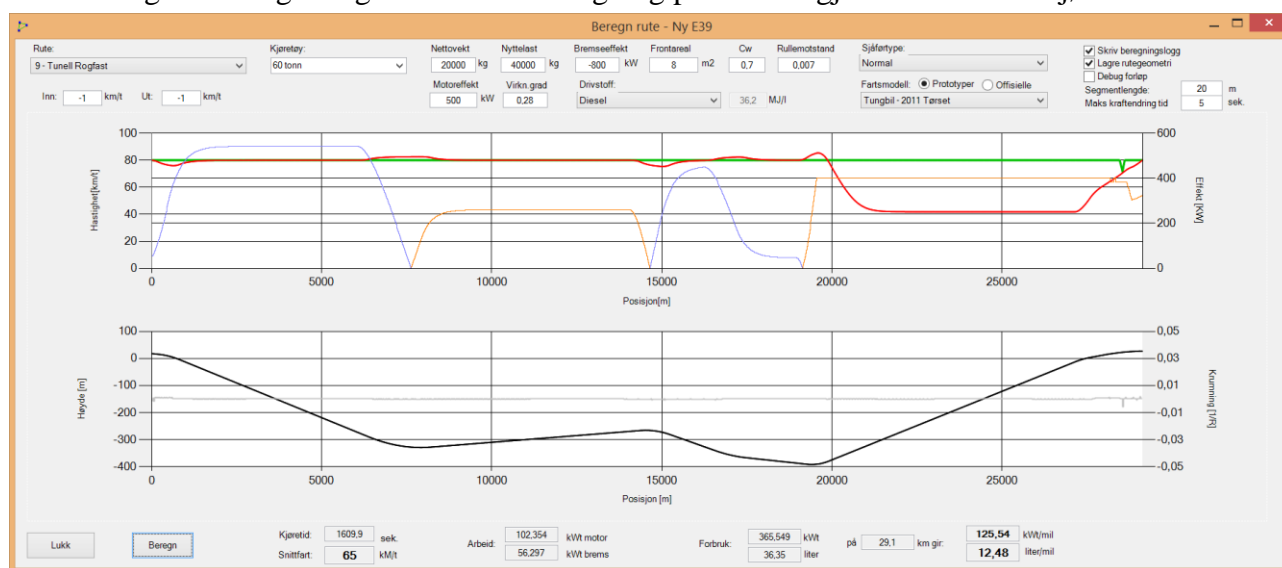
Kjøretøyeenskaper består av vekt, luftmotstand, rullemotstand, motoreffekt, bremseeffekt og drivstoff-virkningsgrad. I kapittel 3.4 er det beskrevet hva som er gjort av faglig utvikling med tanke på kjøretøyparametere. Det er også kartlagt verdier for virkningsgrad for ulike kjøretøy i kapittel 3.3.

## • Sjåføregenskaper

Sjåføregenskaper forteller hvordan sjåføren håndterer overgangene mellom ulike ønskede fartsnivåer, inkludert horisontlengde (planlegging ved å se framover), foretrukket akselerasjon og retardasjon, med en mulig justering i forhold til fartsmodellens friflytsfart. I kapittel 3.4.3 er det beskrevet en kartlegging av sjåføregenskaper.

## • Rapportering

I denne modulen blir det presentert resultater for beregningen. Et eksempel er vist i Figur 6, hvor det er beregnet fart og energiforbruk for et vogntog på 60 tonn gjennom en undersjøisk tunnel.



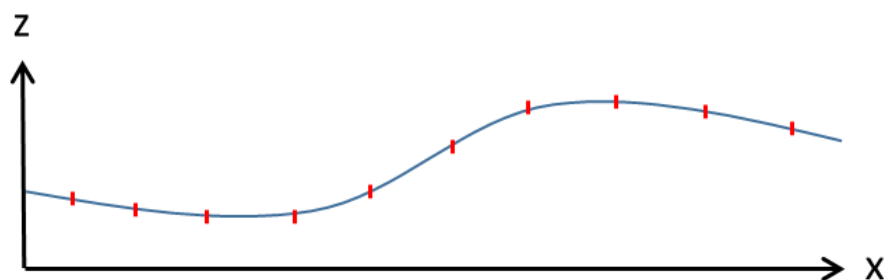
Figur 6: Eksempel på rapportering fra beregningsmodellen. Øverste graf: Den røde linjen er beregnet fart, den grønne linjen viser fart beregnet med fartsmodell, oransje linje viser motoreffekt, og blå linje viser bremseeffekt. Nederste graf viser høyde- og krumningsprofil på ruten.

## 2.1 Beregningsrutine

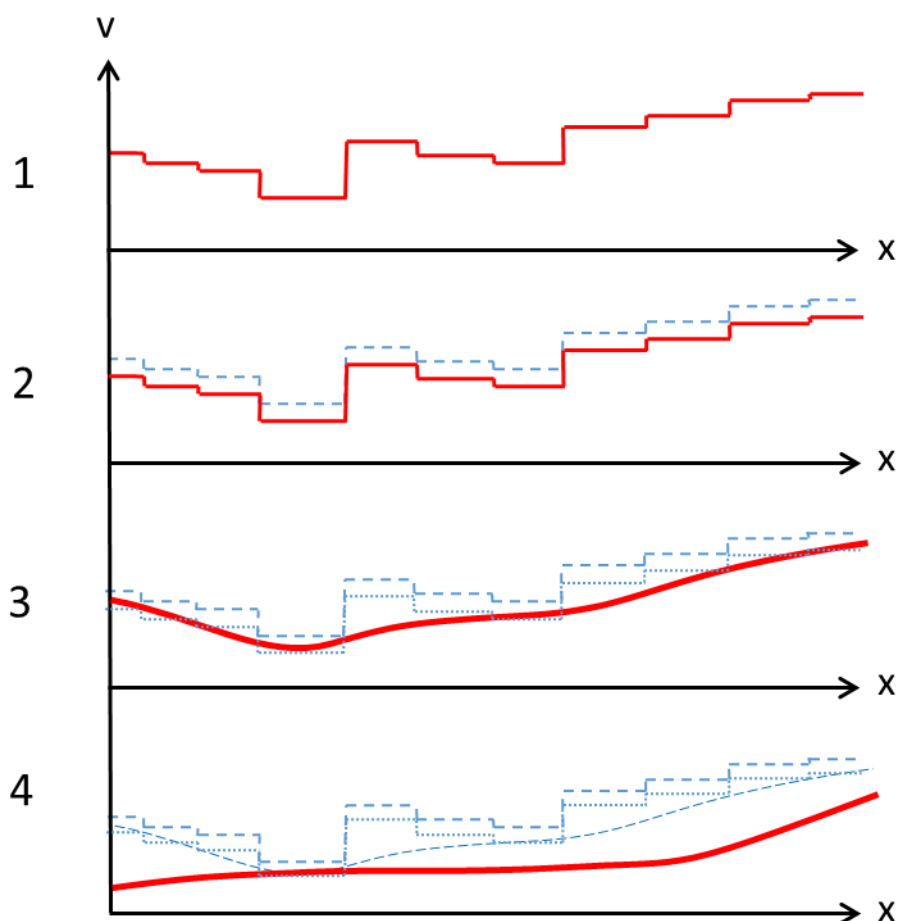
Beregningen utføres ved å simulere kjøring langs aktuell rute, kort eller lang. Simuleringen bruker tilgjengelig motorkraft og bremsekraft mens den prøver å følge vegen med forventet fartsprofil. Integralet av motorkraft og bremsekraft langs strekningen gir utført arbeid for fremdrift, og nødvendig bremsearbeid. Ved å regne bakover fra drivhjul til drivstofftank eller batteri, og derfra tilbake til fyllestasjonen, kan energiforbruket beregnes. I prosjektet er det kartlagt sammenhengen mellom energiforbruk og utslipp, som beskrevet i kapittel 3.3.

Fartsberegningen er delt opp i fire steg:

1. Beregning av teoretisk fart på hver enkeltlenke.
2. Beregning av trafikkavhengig fart (hvis trafikkbelastning er tilgjengelig).
3. Justering av den teoretiske farten så den blir en mer realistisk friflytsfart (demping av akselerasjon og retardasjon).
4. Gjennomgang av hele kjøreruten, med energibetraktninger, påvirkninger av føreradferd (planlegging ved å se fremover), og kryssforsinkelser.



Figur 7: Vertikalkurvaturen til en tenkt veglinje. De røde strekene viser hvordan linjen er oppdelt i homogene segmenter. På første segment fra venstre er det et vegkryss, og på femte segment fra venstre øker fartsgrensen.



Figur 8: Illustrasjon av delberegninger. 1: En fartsmodell benyttes for å beregne en fart for hvert segment basert på kurvatur, vegbredde og fartsgrense. 2: Det korrigeres for eventuell trafikkbelastning. 3: En dempingsrutine jevner ut fartsprofilen. 4: Begrensninger i motoreffekt, påvirkning av føreradfærd, og forhold i overgangen mellom segmenter (kryss) tas hensyn til.

### 3 Faglig metodeutvikling

Dette kapittelet beskriver det som har blitt gjort av faglig metodeutvikling i prosjektet innenfor de identifiserte aktivitetene:

- Estimering av fartsmodell for lette kjøretøy (Kapittel 3.1)
- Korreksjon for trafikkbelastning (Kapittel 3.2)
- Beregning av energiforbruk, drivstofforbruk og utslipp (Kapittel 3.3)
- Kjøretøy- og sjåførparametere (Kapittel 3.4)
- Håndtering av kryssforsinkelse (Kapittel 3.5)

#### 3.1 Estimering av fartsmodell for lette kjøretøy

Det er gjort flere tidligere arbeid med å estimere fartsmodeller for lette kjøretøy. Modellen som pr 2015 benyttes i transportmodellverktøyene er basert på arbeidet gjort av Levin m.fl. (2015). Arbeidspakken som omhandler estimering av friflytsfart for lette kjøretøyer i dette prosjektet søker å benytte tilgjengelige norske registreringer, samt inkludere vegbredde som en parameter.

Statens vegvesen utstyrte alle sine nye kjøretøy anskaffet i perioden fra april 2011 til april 2014 med informerende ISA. Automatisk fartstilpasning (*Intelligent Speed Adaptation – ISA*) er et førerstøttesystem utformet for å redusere fart og derved ulykkesrisiko. Systemet har logget kjøreturer både med og uten aktivering av førerstøtten. Data for turer uten ISA aktivert har blitt logget i 2011 og 2012, mens data for turer med aktivert ISA har blitt logget i 2012-2014. Data er logget i en periode på minst 1 måned uten at ISA-systemet har vært aktivert, deretter i opptil 33 måneder med systemet aktivert.

Datainnsamlingen foregikk ved at 2MA, leverandøren av ISA-systemet, logget data fra ISA-enheten. 2MA gjorde datafilene tilgjengelig på sine servere, og SINTEF fikk tilgang til regelmessig oppdaterte datafiler helt til årsskiftet 2014/2015 (Nordtømme m.fl., 2016).

Datafilene som ble hentet ned fra 2MA sine servere bestod av to filer for hver tidsperiode: én fil inneholdt logge-data fra ISA-enhetene med ett datapunkt for hvert sekund en bil med ISA-enhet hadde vært aktiv, mens den andre inneholdt aggregerte data med ett datapunkt for hver tur. Det var i hovedsak den første datafilen som ble benyttet som rådata, mens den andre ble brukt til å verifisere at innlesingen ble gjort korrekt.

I løpet av datainnsamlingsperioden ble det logget 670 millioner datapunkter, fordelt på 440 kjøretøy og 325 000 turer. Totalt utkjørt logget distanse var 6 140 000 km. Tabell 1 beskriver de ulike typer data som ble logget for hvert datapunkt. I datafilene SINTEF har lastet ned ligger ingen direkte personidentifiserbare opplysninger.

Tabell 1: Beskrivelse av et datapunkt fra en ISA-enhet.

Navn	Beskrivelse
<b>Tid</b>	Tidspunkt for loggføringen. Hver ISA-enhet produserte én loggføring per sekund.
<b>Latitude</b> <b>Longitude</b>	GPS-posisjonen til bilen på tidspunktet for loggføringen
<b>Fart</b>	Bilens fart på tidspunktet for loggføringen. Hentet fra ISA-enheten.
<b>Fartsgrense</b>	Fartsgrensen på vegstrekningen bilen befant seg på ved tidspunktet for loggføringen. Hentet fra en intern database i ISA-enheten, med data fra Elveg-databasen hentet fra NVDB.
<b>BlackSilentMode</b>	Tilstand der ISA-enheten var deaktivert (dersom BlackSilentMode er på fanges ikke kjørers oppmerksomhet, dvs ISA-enheten er "svart og stille", men logger fortsatt data).
<b>Lyd</b>	Om mute-knappen på ISA-enheten var aktivert eller ikke. Dersom mute-knappen er aktivert, vil ikke ISA-enheten signalisere en fartsoverskridelse ved hjelp av lyd.

### 3.1.1 Tilrettelegging for analyse

Data fra ISA-enheten inneholder potensielle feilkilder. Dette er for det første knyttet til kvaliteten på GPS-data. En GPS kan miste kontakt med satellitter i korte perioder, spesielt ved kjøring i tunnel, i "skyggen" av bergvegg eller høye bygninger. I slike tilfeller vil posisjoneringen bli feil. Dette kan gi store utslag på farten som registreres, etter som farten er beregnet som funksjon av tid og posisjonering i forhold til forrige loggepunkt.

Ved korte avstander mellom parallelle veger kan unøyaktighet i GPS-systemet føre til at posisjoneringen blir satt til en nærliggende veg med en annen fartsgrense enn den man faktisk kjører på. Dette kan føre til at data registreres som uriktig lav eller høy fart.

En annen potensiell feilkilde ligger i at fartsgrensen som er lagt inn i ISA-enheten kan avvike fra skiltet fartsgrense på vegen. 2MA har jevnlig oppdatert ISA-enhetene med data fra NVDB, men bruk av testkjøretøy har likevel vist at feil har forekommet. Dersom skiltet fartsgrense er høyere enn den som ligger i ISA-enheten, vil bilfører ofte forholde seg til det som er skiltet. Gjeldende strekning kan da feilaktig registreres med fartsovertredelse. Hvilke strekninger dette gjelder er ikke mulig å kontrollere i ettertid, fordi NVDB ikke inneholder historiske data, kun dato for når dagens fartsgrense ble gjeldende (altså når gjeldende skilting ble satt opp).



For å kontrollere for de nevnte feilkildene så godt som mulig, er det gjennomført en rekke deskriptive analyser av dataene, for å identifisere og behandle mistenkelige avvik:

1. Det endelige datagrunnlaget inkluderer kun data fra kjøring i fartsgrenser 50 km/t og over. Dette ble valgt i samråd med oppdragsgiver, fordi data fra strekninger med fartsgrense 30 og 40 km/t har vist seg å være beheftet med mye støy. Ved lave fartsgrenser er det større sannsynlighet for at en befinner seg i områder med gatestruktur med GPS-unøyaktighet, noe som kan føre til posisjonering på nærliggende veger i stedet for den man faktisk kjører på.
2. Det er ønskelig med kontinuitet og en viss mengde data fra hvert kjøretøy som tas med i analysen. Derfor ble alle kjøretøy med mindre enn 30 dager eller 100 km med eller uten ISA aktivert, fjernet fra datamaterialet.
3. Deretter ble alle turer med maksfart mindre enn 20 km/t, og alle turer der mute-knappen på ISA-enheten var blitt aktivert, fjernet. Begge disse tilfellene ble antatt å omfatte unormale turer.
4. Statens Vegvesen bidro med å identifisere de brukstypene blant sine kjøretøy som ofte kjører uvanlig sakte og/eller med mange stopp, og denne delen av datamaterialet ble filtrert bort. Brukstypene som ble beholdt for videre analyse ble gruppert som følger:
  - Plan og forvaltning
  - Utlånsbil
  - Tilsynsbil
  - Ulykkesberedskap
  - Utbygging
  - Grunnboring/Lab.bil/Landmåling
  - Kontrollbil (også kalt utekontrollbil)

Etter disse filtreringene var datamaterialet redusert til 245 millioner datapunkter, fordelt på 119 kjøretøy, og 130 000 turer. Totalt utkjørt logget distanse var 2 190 000 km.

### **3.1.2 Analysemetodikk**

Fra ISA-databasen ble tre regresjonsmodeller for fart tilpasset. En modell beskriver 2-feltsveger ved fartsgrense 70, 80 og 90 km/t, en beskriver 2-feltsveger ved fartsgrense 50 og 60 km/t, og en beskriver 4-feltsveger ved fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t. Analysen er begrenset til overnevnte fartsgrenser fordi vi her har nok data. For eksempel er ikke 4-feltsveg med 110 km/t betraktet da det ikke fantes slike veger i perioden ISA-dataene ble samlet inn. Vi samler analysen av 2-feltsveger med høye fartsgrenser (70, 80 og 90 km/t) i en modell, analysen med 2-feltsveger med lavere fartsgrense (50 og 60 km/t) i en modell, og analysen av 4-feltsveger i en modell for å øke datagrunnlaget i hvert tilfelle. For 4-feltsveger er allikevel datagrunnlaget noe tynt.



Vegnettet i NVDB inneholder veglenker av svært variabel lengde, alt fra noen få meter til flere kilometer. For analysen ønsker vi vegsegmenter som mest mulig homogene, det vil si vegsegmenter som har samme fartsgrense, dekkebredde, stigning, fall og krumning gjennom hele segmentet. Det ble valgt å splitte vegnettet opp i 25 meters vegsegmenter, med noen kortere eller lengre segmenter for helt å dekke alle veglenkene fra NVDB. I resten av kapittelet reserveres derfor begrepet vegsegment til å gjelde segmentene i denne oppdelingen av vegnettet. GPS-punktene i ISA-databasen kobles så til disse vegsegmentene.

Et datapunkt blir definert ved å ta gjennomsnittsfarten av alle registrerte fartsmålinger på hvert vegsegment i hver retning. Vegsegmenter uten registrert fart faller følgelig bort fra datagrunnlaget. I tillegg ser vi kun på registreringer utenfor tidsrommene 06:00-10:00 eller 14:00-18:00 for å unngå så mye som mulig av rushtrafikken. Omtrent 20 % av vegsegmenter med data blir filtrert bort gjennom denne prosessen. De avhengige variablene som ble undersøkt var dekkebredde, stigning, fall og krumning, og disse er nærmere definert under:

**Dekkebredde:** Denne variabelen blir brukt til å indikere bredden på vegen. Ingen dekkebreddeverdier filtreres ut av datasettet. Dette ble utprøvd, men gav ingen signifikante forskjeller i analysen.

**Fall og stigning:** Disse variablene blir brukt til å indikere helning henholdsvis med og mot kjøreretningen. Kun segmenter mellom 20 og 30 meter og segmenter som inneholder kun fall eller kun stigning tas med i datagrunnlaget. For å finne helningen  $\tilde{h}$  til et segment på  $l$  meter relativ til en lengde på 25 meter regnes den relative helningen  $h$  ut som  $h = 25\tilde{h} / l$ .

**Krumning:** Denne variabelen indikerer hvor mye krumning vi har i vegsegmentet, der krumning lik null representerer en rett strekning. Ingen krumningsverdier filtreres ut av datasettet.

Selv etter at dataene er aggregert opp på segmentnivå er feilkildene og usikkerhetene i datasettet store. For eksempel kan det forekomme at to segmenter med forskjellig fartsgrense ligger svært nær hverandre slik at det blir mer eller mindre tilfeldig hvilken av de to segmentene et nærliggende GPS punkt fra ISA-enheten bli knyttet til. I tillegg inneholder datamaterialet ikke noe om trafikkmengde, tilstedeværelse av saktegående kjøretøy som traktor og så videre. En generisk, Bayesiansk og simuleringsbasert versjon av "the Variance-Inflation model" (Lee & Chung, 2001) ble implementert for å dempe effekten av feil, støy og usikkerhet. I korthet går metoden ut på at det tilpasses en regresjonslinje hvor datapunktene enten klassifiseres til å være data med lite støy eller data med mye støy. Data med lite støy bidrar følgelig mest til tilpasningen. Det er kjent at ekstremverdier har potensiale til å påvirke estimeringen av regresjonskurver i stor grad (Walpole m fl, 2007), og man ønsker i størst mulig grad å unngå "harde" filtreringer som for eksempel å fjerne alle datapunkter med fart under 40 km/t, da en ikke kan vite om en slik lav fart skyldes egenskaper ved segmentet eller feilkilder. Det er viktig å poengtere at datapunkter som klassifiseres som data med mye støy

fortsatt bidrar til estimeringen, men de vektas mindre enn data som klassifiseres som data med lite støy.

Følgende regresjonsmodell blir 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 allikevel 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. Dataområdet vil illustreres i hvert enkelt tilfelle sammen med den resulterende modellen.

### 3.1.3 2-felt 70, 80, 90 km/t

Dette er datakategorien med mest data. I alt 118365 datapunkter sendes inn i regresjonsalgoritmen der  $U(\cdot)$  er gitt ved

$$\begin{aligned} U(x_d, x_s, x_f, x_k) = & \beta_d(x_d - 8.0) + \beta_s x_s + \beta_f x_f + \beta_k x_k + \beta_{ds}(x_d - 8.0)x_s \\ & + \beta_{df}(x_d - 8.0)x_f + \beta_{dk}(x_d - 8.0)x_k + \beta_{sk}x_s x_k + \beta_{fk}x_f x_k \\ & + \beta_{dsk}(x_d - 8.0)x_s x_k + \beta_{dfk}(x_d - 8.0)x_f x_k + \beta_{kk}x_k^2. \end{aligned}$$

Det vil si en full regresjonsmodell (men uten interaksjoner mellom fall og stigning da man per definisjon ikke kan ha fall og stigning på samme vegsegment). I tillegg tar vi med et regresjonsledd for krumningen opphøyd i andre potens, da det ut fra dataplott ser ut til å være mer en enn lineær sammenheng for denne variabelen.

Legg merke til at dekkebredden  $x_b$  inngår som  $(x_d - 8.0)$ , det vil si alle ledd hvor dekkebredde inngår vil være null når dekkebredden er 8.0 meter. Dette valget er gjort for å kunne korrigere referansefarten  $C(x_g)$  for trafikkbelastningen man vet er til stede (men som man ikke kjenner størrelsen til). Dette gjøres ved bruk av data fra tellepunkter hvor gjennomsnittlig dekkebredde på de tilgjengelige tellepunktene for 2-feltsveg og fartsgrenser 70, 80 og 90 km/t er nettopp 8.0 meter. Ved å beregne gjennomsnittsfarten til enslige biler som passerer et slikt tellepunkt kan nye

(trafikkorrigererte) referansefarter  $C_k(x_g)$  estimeres, og disse kan erstatte (de trafikkbelastede) referansefartene  $C(x_g)$  i den estimerte modellen.

I snitt blir 5 % av datapunktene kategorisert som ekstremverdier i estimeringen av denne modellen, og etter at ikke-signifikante parametere er fjernet og modellen re-estimert fås følgende uttrykk for  $U(\cdot)$

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

Det vil si at alle første ordens ledd, andregradsleddet med krumning og interaksjonsledd mellom stigning og krumning, og mellom fall og krumning tas med i modellen. De tilpassede estimatene finnes Tabell 2.

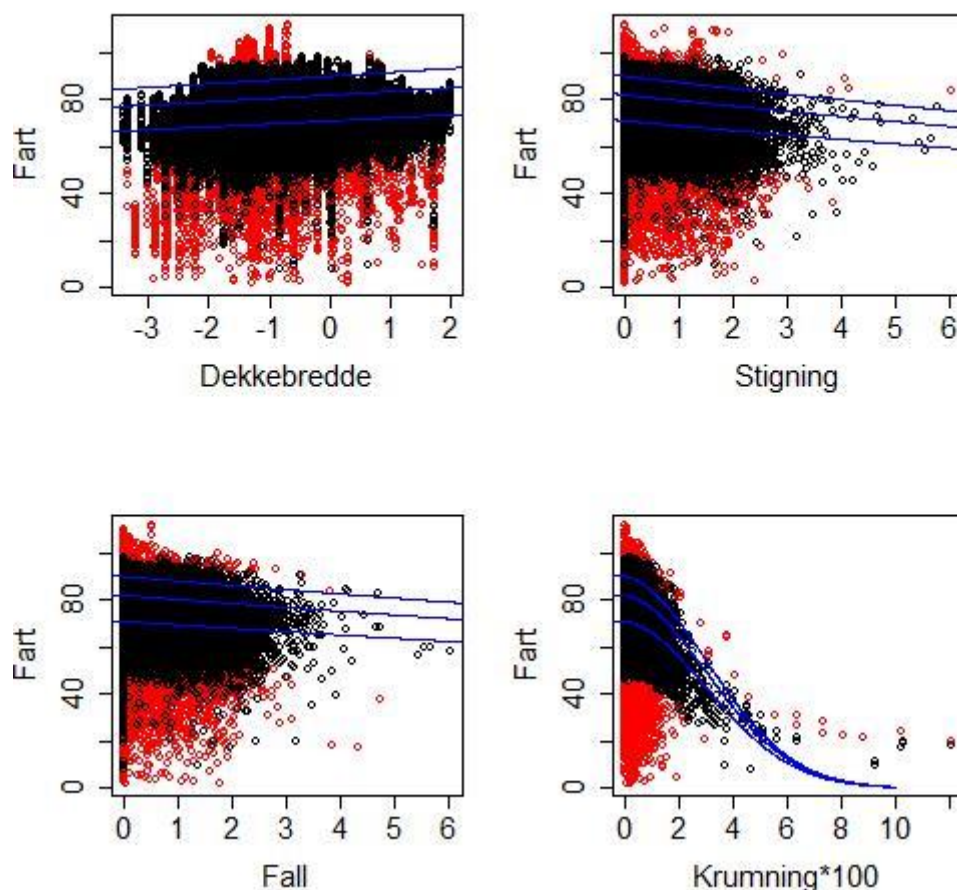
Tabell 2: Estimerte parametere i fartsmodellen for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 70, 80 og 90 km/t. Legg merke til at den korrigerte referansefarten for 90 km/t er satt til fartsgrensen (merket \*) da ingen tellepunkter med tilsvarende feltkode og fartsgrense finnes i datagrunnlaget.

Parameter	$\hat{C}(70)$	$\hat{C}(80)$	$\hat{C}(90)$	$\hat{C}_k(70)$	$\hat{C}_k(80)$	$\hat{C}_k(90)$
<b>Estimat</b>	69.3	77	85.8	71	82	90*
Parameter	$\hat{\beta}_d$	$\hat{\beta}_s$	$\hat{\beta}_f$	$\hat{\beta}_k$	$\hat{\beta}_{kk}$	
<b>Estimat</b>	0.0182	-0.0296	-0.0214	-2.383	-485.3	
Parameter	$\hat{\beta}_{sk}$	$\hat{\beta}_{fk}$				
<b>Estimat</b>	-3.825	-3.517				

Ut fra estimatene i denne tabellen ser man at en økning i dekkebredden fører til en økning i fart ( $\hat{\beta}_d > 0$ ), mens en økning i stigning, fall og krumning fører til en reduksjon i fart ( $\hat{\beta}_s, \hat{\beta}_f, \hat{\beta}_k < 0$ ). I tillegg fås en kraftigere reduksjon i farten dersom både krumning og stigning eller krumning og fall inntreffer samtidig ( $\hat{\beta}_{sk}, \hat{\beta}_{fk} < 0$ ).

I Figur 9 er alle datapunktene med eksempler på estimerte regresjonskurver illustrert, og fra x-aksene i denne figuren ser man også hvilket dataområde denne modellen er estimert fra og bør brukes på.

Svarte punkter Figur 9 er punkter som med høy sannsynlighet blir klassifisert som data med lite støy, mens røde punkter representerer punkter som med høy sannsynlighet blir klassifisert som data med mye støy. Blå kurver viser sammenhengen mellom fart og variabelen definert på x-aksen. For de blå kurvene er variablene som ikke vises i plottet satt til sin referanseverdi (0 for stigning, fall og krumning, og 8 for dekkebredde).



Figur 9: Datapunktene (røde og svarte) som blir brukt til å estimere fartsmodell for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 70, 80 og 90 km/t.

### 3.1.4 2-felt 50, 60 km/t

Dette datasettet har mindre data enn det forrige kapittel, totalt 12332 datapunkter. Dekkebredden er i dette tilfellet tatt ut av analysen av to årsaker. For det første kan man tenke seg at denne variabelen ikke vil ha stor påvirkning ved så lav fart. Dessuten er datagrunnlaget usikkert her, det vil si at ved slike fartsnivå er det sannsynlig at en har en veg- eller gatetype der dekkebredden varierer med høyt innslag av busstopp, trafikkøyer, gang- og sykkel felt osv. som gjør det vanskelig å bruke denne variabelen. Regresjonsmodellen som blir tilpasset har derfor følgende form for  $U(\cdot)$ :

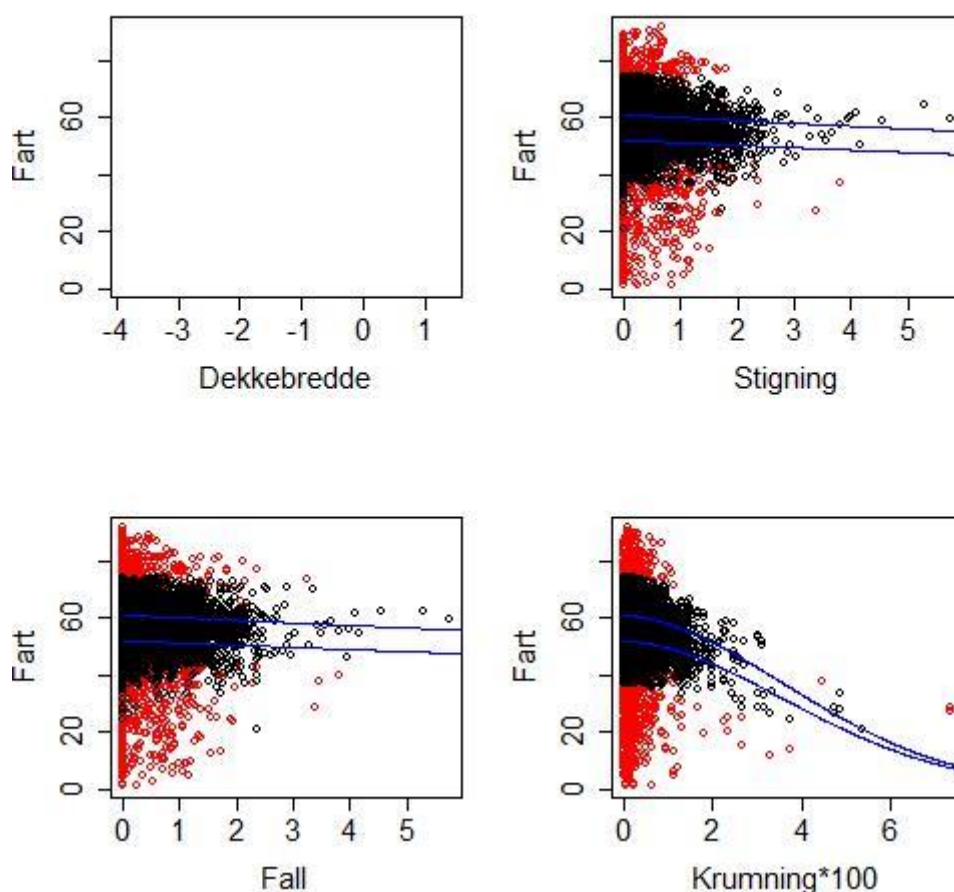
$$U(x_d, x_s, x_f, x_k) = \beta_s x_s + \beta_f x_f + \beta_k x_k + \beta_{sk} x_s x_k + \beta_{fk} x_f x_k + \beta_{kk} x_k^2.$$

I snitt blir omtrent 10 % av datapunktene kategorisert som ekstremverdier, og alle inkluderte parametre bortsett fra kryssleddene  $\beta_{sk}$  og  $\beta_{fk}$  blir i dette tilfellet signifikante. De tilpassede estimatene finnes i Tabell 3.

Tabell 3: Estimerte parametere i fartsmodellen for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 50 og 60 km/t.

Parameter	$\hat{c}(50)$	$\hat{c}(60)$	$\hat{c}_k(50)$	$\hat{c}_k(60)$
Estimat	51.8	60.6	52	61
Parameter	$\hat{\beta}_s$	$\hat{\beta}_f$	$\hat{\beta}_k$	$\hat{\beta}_{kk}$
Estimat	-0.0171	-0.0153	-1.983	-334.9

Sett bort fra dekkebredden har parameterne samme effekten på farten som i modellen for 2-feltsveg 70, 80 og 90 km/t. Det vil si en økning i stigning, fall eller krumning fører til en reduksjon i farten. I **Error! Reference source not found.** er datapunktene plottet, samt eksempler på regresjonslinjer. Igjen kan dataområdet modellen er estimert fra leses av på x-aksen.



Figur 10: Datapunktene (røde og svarte) som blir brukt til å estimere fartsmodell for lette biler på 2-feltsveg med fartsgrenser 50 og 60 km/t.

Svarte punkter i **Error! Reference source not found.** er punkter med høy sannsynlighet klassifisert som data med lite støy, mens røde punkter representerer punkter som med høy sannsynlighet blir klassifisert som data med mye støy.

### 3.1.5 4-felt 70, 80, 90, 100 km/t

Dette datasettet er det minste av de tre og består kun av 782 datapunkter (det kan senere være aktuelt å vurdere en mindre streng filtrering av dataene, slik at en her kan bygge på et større datasett, for å se hvordan dette slår ut). På grunn av størrelsen på datagrunnlaget begrenser vi modellen til kun å inneholde første ordens effekter, det vil si

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

der altså referansedekkebredden er satt til 19 meter. Igjen finnes denne ved å beregne gjennomsnittsdekkebredden til tellepunkter med tilsvarende felt og fartsgrenser. I snitt blir 10 % av datapunktene markert som ekstremverdier i estimeringsalgoritmen. Med dette datagrunnlaget finnes ingen signifikant avhengighet av krumning, slik at denne tas ut av modellen, det vil si vi setter

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

før modellen re-estimeres med det nye parametersettet. Estimat for denne modellen er vist i Tabell 4.

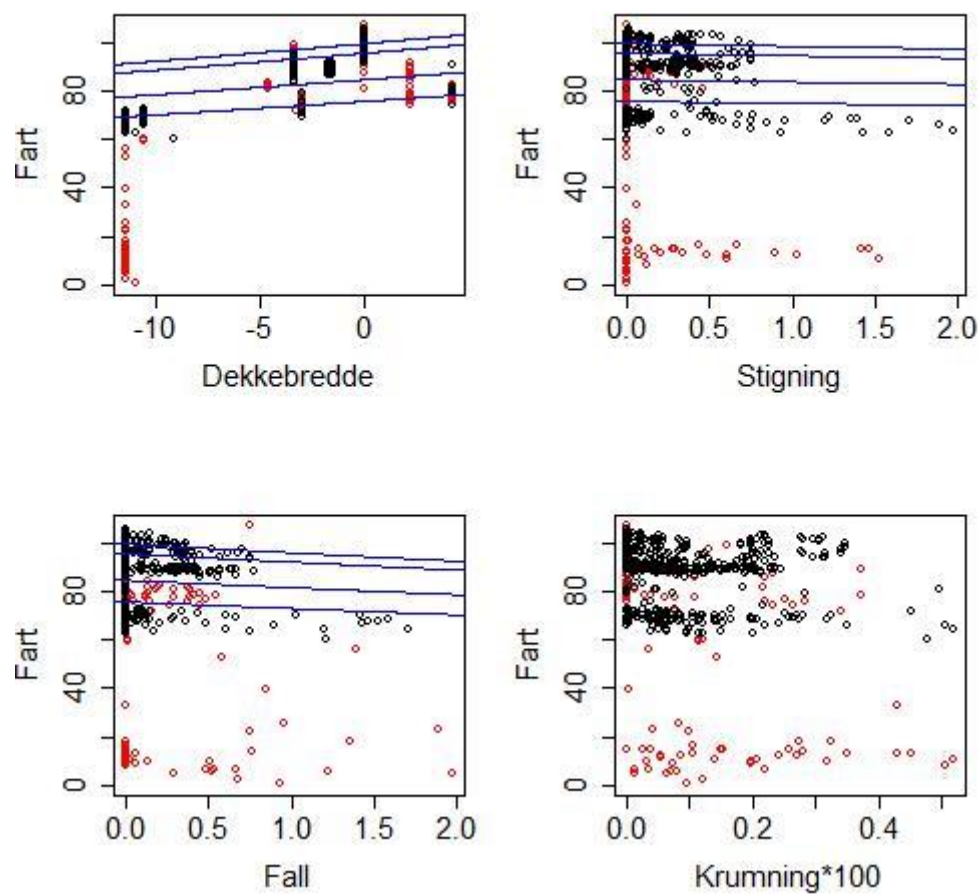
Tabell 4: Estimerte parametere i fartsmodellen for lette biler på 4-feltsveg med fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t.

Parameter	$\hat{C}(70)$	$\hat{C}(80)$	$\hat{C}(90)$	$\hat{C}(100)$	$\hat{C}_k(70)$	$\hat{C}_k(80)$	$\hat{C}_k(90)$	$\hat{C}_k(100)$
<b>Estimat</b>	74.8	76.5	92	99.6	76	85	96	103
Parameter	$\hat{\beta}_d$	$\hat{\beta}_s$	$\hat{\beta}_f$					
<b>Estimat</b>	0.0076	-0.0111	-0.0368					

Igjen ser vi en positiv effekt av økt dekkebredde på farten og en negativ effekt på farten som funksjon av stigning eller fall.

I Figur 11 vises datapunktene som er brukt til estimering i dette tilfellet, igjen med illustrerte regresjonslinjer for ulike fartsgrenser. Svarte punkter blir med høy sannsynlighet klassifisert som data med lite støy, mens røde punkter representerer punkter som med høy sannsynlighet blir klassifisert som data med mye støy. Vi ser også fra denne figuren at det er svært liten krumning som er registrert på slike veier, så det er å forvente at denne parameteren ikke er signifikant.





Figur 11: Datapunktene (røde og svarte) som blir brukt til å estimere fartsmodell for lette biler på 4-feltsveg med fartsgrenser 70, 80, 90 og 100 km/t.

### 3.2 Korreksjon for trafikkbelastning

Dagens korreksjon for trafikkbelastning i transportmodellene baserer seg på VDF-kurver. Det har vært ønskelig å utvikle et nytt formelverk for det som betegnes som 'volume/delay'-korreksjon, basert på data fra trafikktelepunkt, som nå er tilgjengelig og som med stor sannsynlighet vil bli enda mer tilgjengelig i fremtiden (større datagrunnlag).

Som del av dette prosjektet er det gjennomført en estimering av ny modell for trafikkbelastningskorreksjoner basert på det nevnte datamaterialet. Pga. transportmodellenes virkemåte med mange iterasjoner med ulik trafikkbelastning er det nødvendig at disse korreksjonene kan gjøres direkte i transportmodell-verktøyet. Det er samtidig viktig at korreksjoner for trafikkbelastning fremstår ensartet i transportmodellene og i øvrige NKA-verktøy. Korreksjonene måtte derfor også implementeres i den nye fartsberegningsmodulen.

Ifølge tradisjonell trafikkavviklingsteori er det en sammenheng mellom atferden til hvert enkelt kjøretøy og egenskapene til en trafikkstrøm. Teoretisk sett kan en trafikkstrøm beskrives av følgende størrelser:

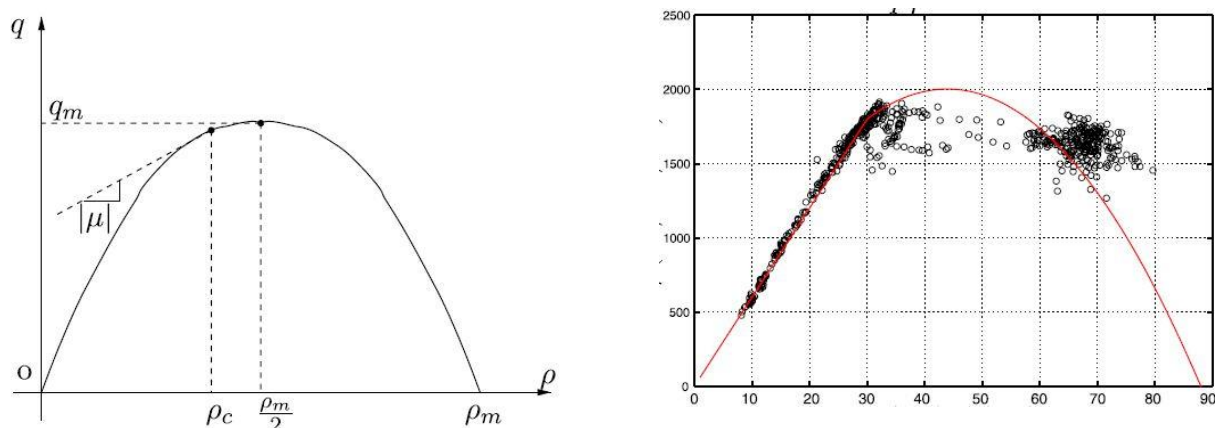
- *Volum* – Definert som kjøretøy per time
- *Tetthet* – Definert som kjøretøy per kilometer
- *Fart* – Definert som kilometer per time, gjennomsnittsfart

Sammenhengen mellom størrelsene er gitt ved følgende sammenheng (May 1990):

$$\text{Volum} = \text{Tetthet} * \text{Fart}$$

Trafikkvolumet sier noe om hvor mange kjøretøy som passerer et punkt i løpet av en tidsperiode. For å kunne evaluere trafikkavviklingen, må trafikkvolumet relateres til fart og tettheten. For en sjåfør vil en god avvikling innebære minst mulig forsinkelse. På et overordnet nivå vil en god trafikkavvikling innebære at en trafikkstrøm så lenge som mulig unngår å komme i et sammenbrudd. Et sammenbrudd inntreffer når farten på trafikkstrømmen er så lav at det oppstår køer. Empiriske data viser at sammenhengen mellom volum og tetthet er som i figur 1, også kalt fundamentaldiagrammet. Av figuren ser en at en økning i volum vil føre til at trafikken blir tettere. Det betyr også at farten vil avta. Ved en bestemt tetthet vil trafikkvolumet nå et maksimumspunkt, også kjent som kapasiteten. Ved en videre økning i tetthet fra dette punktet vil trafikkvolumet begynne å avta. I denne situasjonen har det oppstått et sammenbrudd i trafikken.





Figur 12: Fundamentaldiagrammet for trafikflyt. Figuren til venstre viser den teoretiske sammenhengen, figuren til høyre viser en kurvetilpasning til trafikkdata (volum på y-aksen og tetthet på x-aksen). Kilde: Yi (2006).

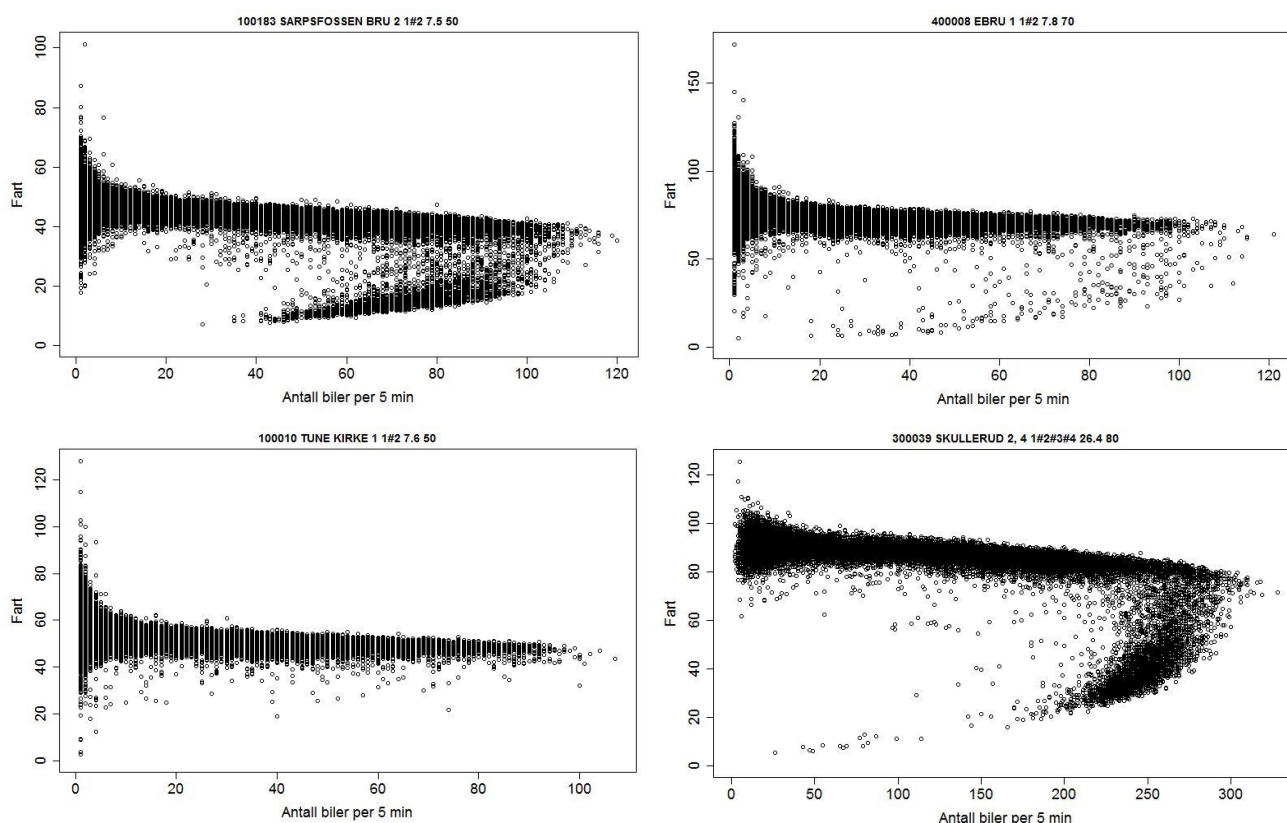
### 3.2.1 Estimering av VDF - formelverk

Tilgjengelig datagrunnlag er hentet fra 286 tellepunkter spredt utover hele Norge, med hovedvekt på tellepunkter inn mot og i byer. I et tellepunkt registreres alle kjøretøypasseringer, og for hver slik passering registreres tidspunkt for passering, kjøretøyets fart og lengde. Totalt består datasettet av 0,5 milliarder kjøretøypasseringer. Disse ble lagt inn i en PostgreSQL – database for videre analyse. Målet for analysen var å komme frem til et formelverk for "volume/delay"-funksjoner (VDF). Utbygging av trafikkellepunkter er i full gang og tilgangen på slike data vil sannsynligvis bli enda bedre i tiden fremover. En oversikt over de 286 tellepunktene er vist i Figur 13.



Figur 13: Datagrunnlag fra 286 av Statens vegvesens tellepunkt spredt utover hele Norge. Rød prikk - observert sammenbrudd. Kart -Topografisk norgeskart.

For å konstruere nytt formelverk ble dataene aggregert opp på 5 minutters nivå, det vil si for hvert 5. minutt ble antall bilpasseringer og gjennomsnittlig fart for passerte kjøretøy registrert. Eksempler på aggregering for 4 tellepunkter (i en retning) er vist i Figur 14. I de to første og det siste av tellepunktene vist i denne figuren kan man tydelig observere et sammenbrudd. Sammenbrudd er observert og analysert for 34 av tellepunktene, og i disse kan man for omtrent alle, observere sammenbrudd i hver kjøreretning.



Figur 14: Gjennomsnittsfarten til de bilene som passere et tellepunkt på 5 minutter plottet som funksjon av antall biler som passere.

Metoden som er brukt for å estimere VDF – kurver går ut på å først se på situasjonene før og etter sammenbrudd uavhengig av hverandre, og deretter knytte disse tilstandene sammen ved å beregne sannsynligheten for sammenbrudd gitt trafikkmengde.

### 3.2.1.1 Estimering av VDF-kurver

En rutine bygget på statistikk og kurvetilpasning ble utviklet for å modellere en VDF i hver kjøreretning for hvert tellepunkt. Rutinen ble implementert i det statistiske programmeringsspråket R. Denne rutinen er bygget opp med 3 delrutiner for tellepunkt med sammenbrudd:

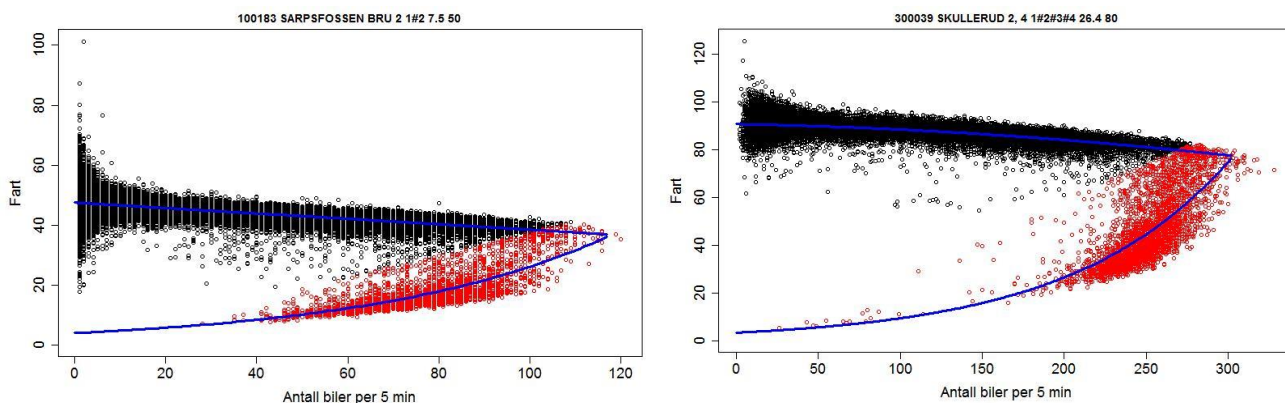
1. Klassifisere alle datapunkter til å ligge før eller etter sammenbrudd.
2. Tilpasse regresjonslinje ved et andre ordens polynom til punkter før sammenbrudd.
3. Tilpasse eksponentiell regresjonslinje til punkter etter sammenbrudd.

For punkter uten sammenbrudd trengs bare punkt 2. fra listen over å gjennomføres. Klassifiseringen i punkt 1 i beskrives i detalj under.

For å klassifisere observasjoner til enten sammenbrudd eller ikke gjennomføres først en grov klassifisering ved hjelp av pakken "changepoint" i R. Denne pakken inneholder funksjoner for å detektere endringer i gjennomsnittsverdien og variansen i tidsrekker. For å kunne bruke denne funksjonen studeres gjennomsnittsfarten og gjennomsnittsforsinkelsen som funksjon av tettheten av biler per 5 minutt. Tetthet er definert som

$$d = x/\bar{f},$$

der  $x$  er antall biler som passerer på fem minutter og  $\bar{f}$  gjennomsnittsfarten til disse bilene. Før- og etter-punkter defineres derfor som henholdsvis punkter før og etter algoritmen detekterer en endring i både fart og forsinkelse som funksjon av økende tetthet. Denne klassifiseringen er gjerne for grov, se Figur 15 der for mange observasjoner blir klassifisert som etter sammenbrudd nær punktet der kurvetilpasningene møtes.



Figur 15: Svarte og røde punkter representerer henholdsvis punkter før og etter sammenbrudd med grov klassifisering. Estimerte VDF for røde og svarte punkter er vist med blå linjer.

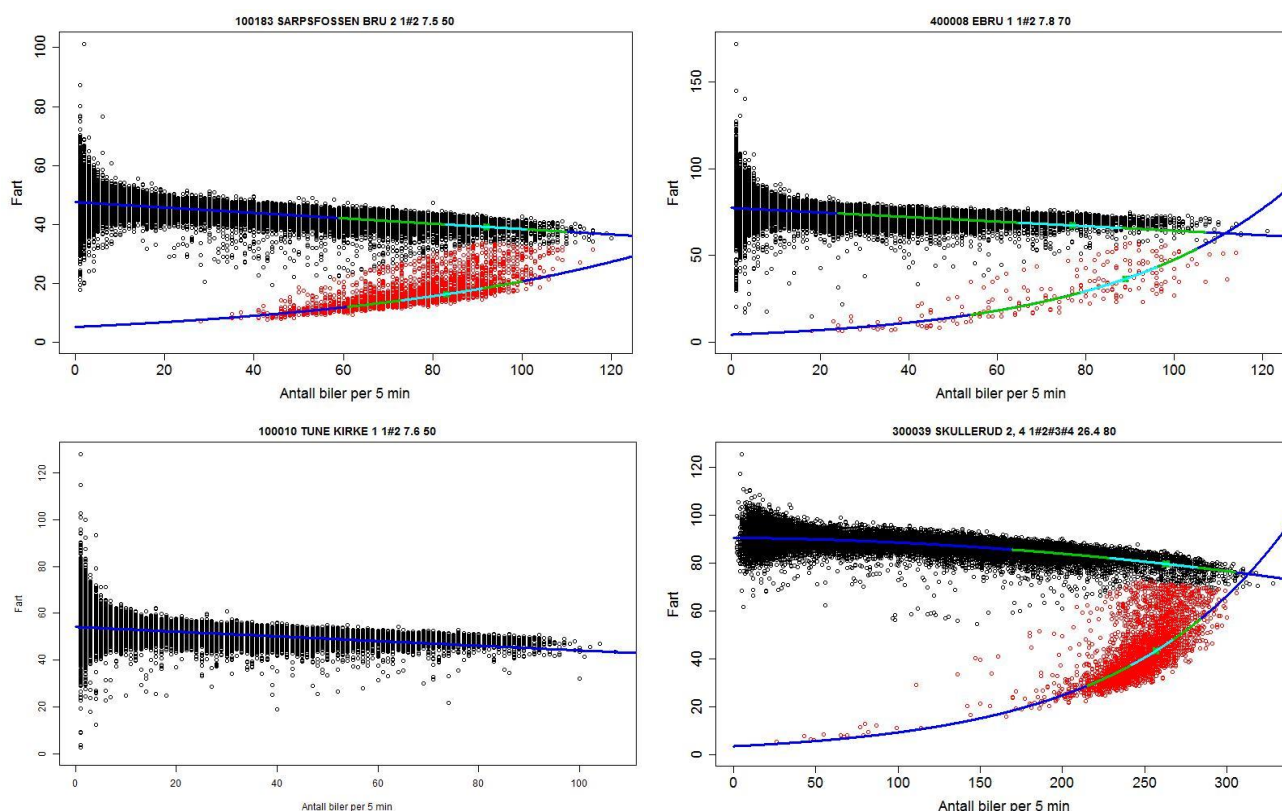
Kurvetilpasningen for de svarte punktene vist i Figur 15 antas å være et andregradspolynom, det vil si

$$fart = a + bx + cx^2$$

der  $x$  igjen er antall biler som passerer tellepunktet per 5 minutt, og  $a$ ,  $b$  og  $c$  er koeffisientene som skal estimeres. Regresjonslinjen etter sammenbrudd antas å være på formen

$$fart = Ce^{ax}$$

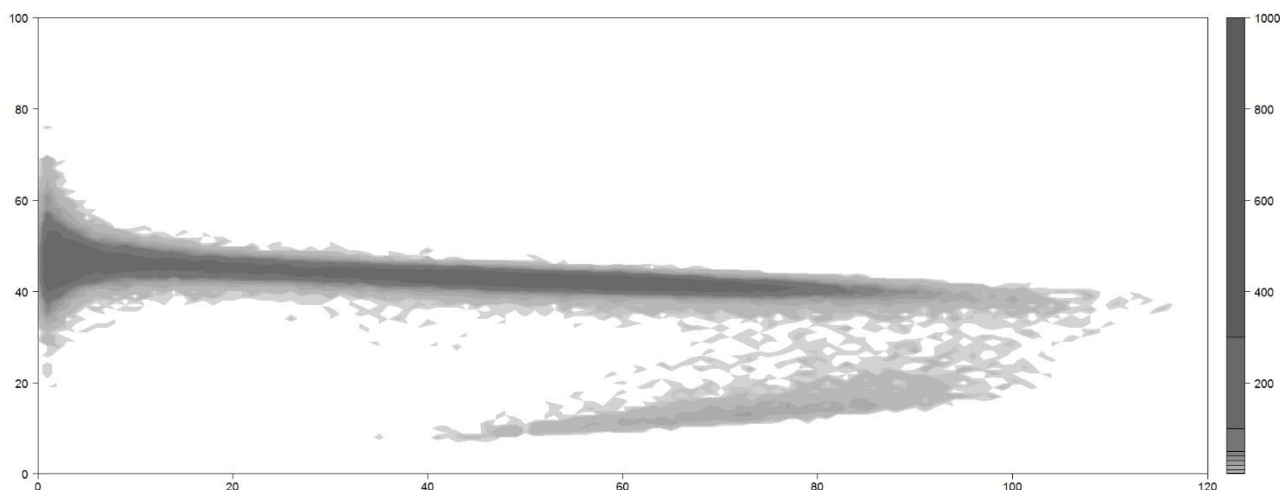
der  $C$  og  $a$  er koeffisientene som må estimeres i dette tilfellet. For å få til en finere klassifisering av punkter før og etter sammenbrudd, gjennomføres følgende iterative algoritme. Røde punkter som ligger  $\pm 3.0$  standardavvik fra regresjonslinjen for de svarte punktene omdefineres til svarte punkter. Deretter estimeres nye regresjonskurver på bakgrunn av denne nye klassifiseringen, og denne prosessen gjentas helt til ingen røde punkter omdefineres. En slik finere klassifisering vises i Figur 16, med tilhørende endelig estimerte regresjonskurver.



Figur 16: Estimering av VDF (blå linjer) samt fordeling til sammenbrudds- og oppbrudds-punkter.

Et argument for å estimere disse kurvene uavhengig av hverandre er illustrert i tetthetsplottet i Figur 17, der det observeres at dataene gjør et sprang i farten mellom før og etter sammenbrudd. Dette mønsteret finner vi igjen i flere tellepunkt. Videre er det interessant å se nærmere på posisjonen til sammenbruddspunktet, det vil si trafikkvolumet der vi går over fra en før til en etter sammenbrudds tilstand. På samme måte som man tydelig kan se en betydelig variasjonen i farten for en gitt

trafikkmengde både før og etter sammenbrudd, se igjen Figur 17, kan man også se en variasjon i posisjonen til sammenbrudds-punktet, altså hvor mye trafikkvolum som resulterer i sammenbrudd.



Figur 17: Tetthetsplott av datapunktene ved Sarpsfossen bru.

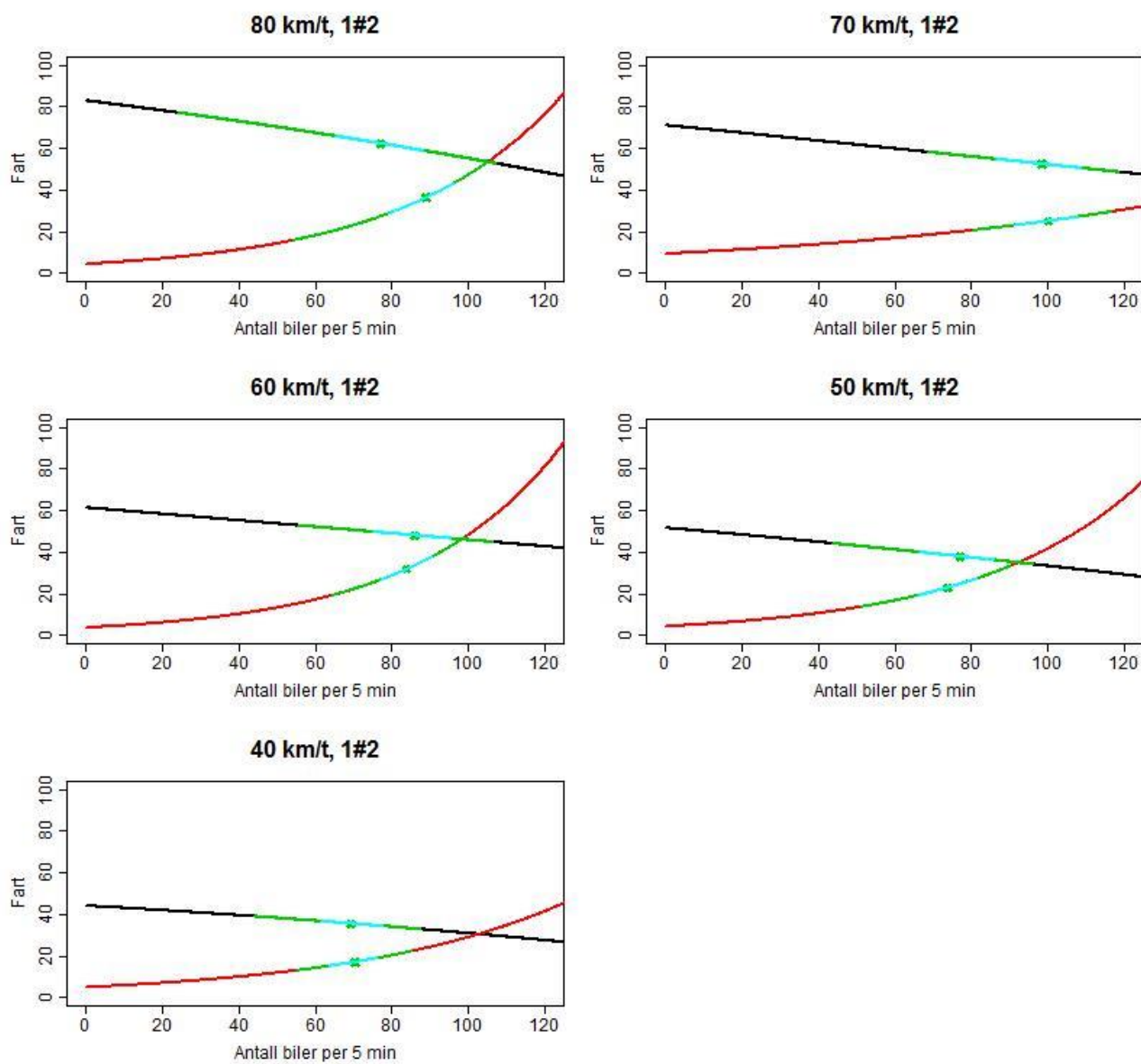
Etter at punkter er klassifisert til før eller etter sammenbrudd utføres fire rutiner:

1. Identifisere sammenbrudds-punkter definert ved at et punkt før sammenbrudd (svart) har et påfølgende punkt (neste oppsamling av kjøretøyer i 5 min intervall) etter sammenbrudd (rødt). Median og persentiler for sammenbrudds-punktet beregnes.
2. Identifisere oppbrudds-punkter, definert ved at et punkt etter sammenbrudd (rødt) har et påfølgende punkt før sammenbrudd (svart). Median og persentiler for oppbrudds-punktet beregnes.
3. Tilpasse andre ordens polynom til punkter (svart) før sammenbrudd.
4. Tilpasse eksponentiell kurve til punkter (rødt) etter sammenbrudd, der punkter over 2 standardavvik iterativt fjernes til konvergens av kurve.

Punkt 4 i listen over gjennomføres for å dempe effekten av punkter hvor noe av 5 minutters-intervallet er uten sammenbrudd og noe av 5 minutters-intervallet er med sammenbrudd. Resultatet gir et sett med kurver og fordeling for sammenbrudds- og oppbrudds-punkter. Et eksempel er vist i Figur 16, der mørke blå kurver viser sammenhenger før og etter sammenbrudd, mens grønt kyss viser medianen av sammenbrudds-/oppbruddspunktene med tilhørende 90 % persentilintervaller (grønn linje) og 50 % persentilintervaller (lyseblå linje). Legg merke til at det ikke er observert sammenbrudd ved Thune kirke i Figur 16, så her er kun situasjonen før sammenbrudd estimert.

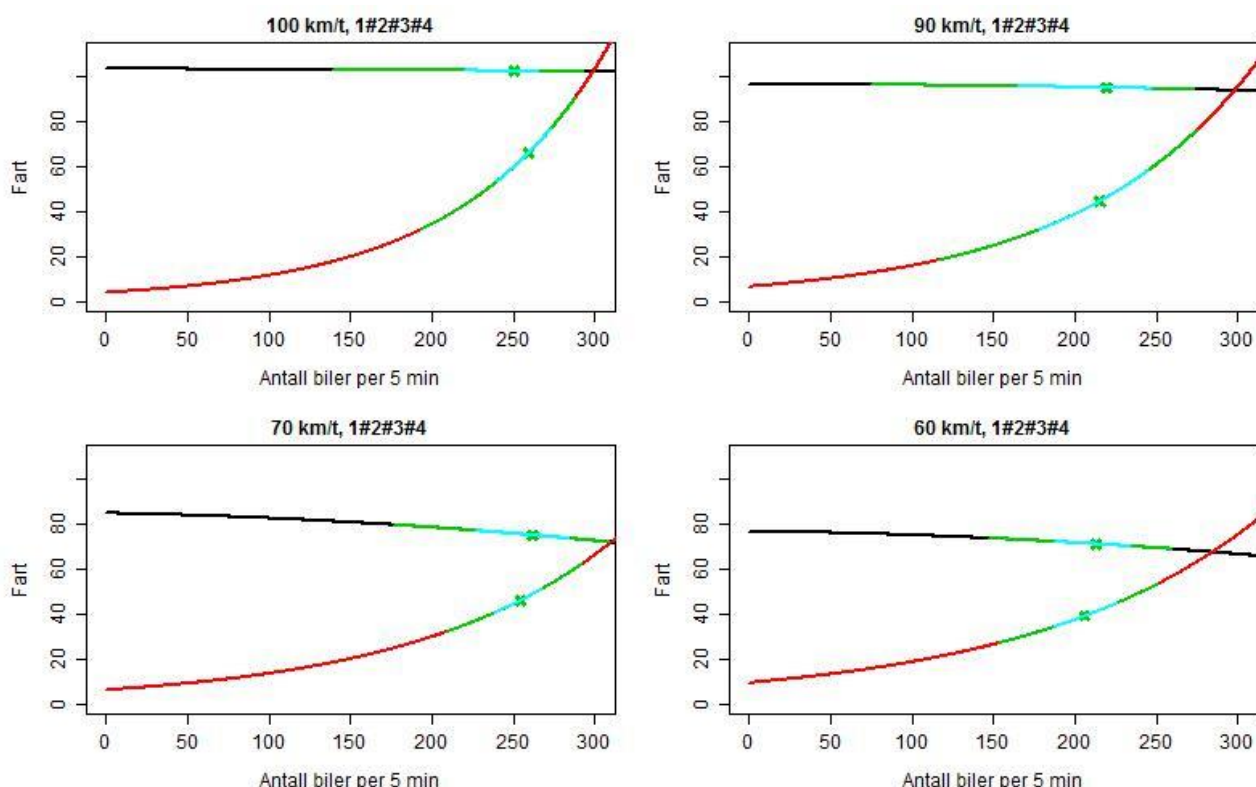
Etter at VDF er estimert for begge kjøreretninger i tellepunktet estimeres gjennomsnittlige VDF-kurver for ulike fartsgrenser og ulike feltkoder. Dette gjøre ved å approksimere nye regresjonskurver som samsvarer best mulig med alle kurver med lik fartsgrense og feltkode. Disse gjennomsnittlige VDF-kurvene er vist i

Figur 18 og Figur 19.



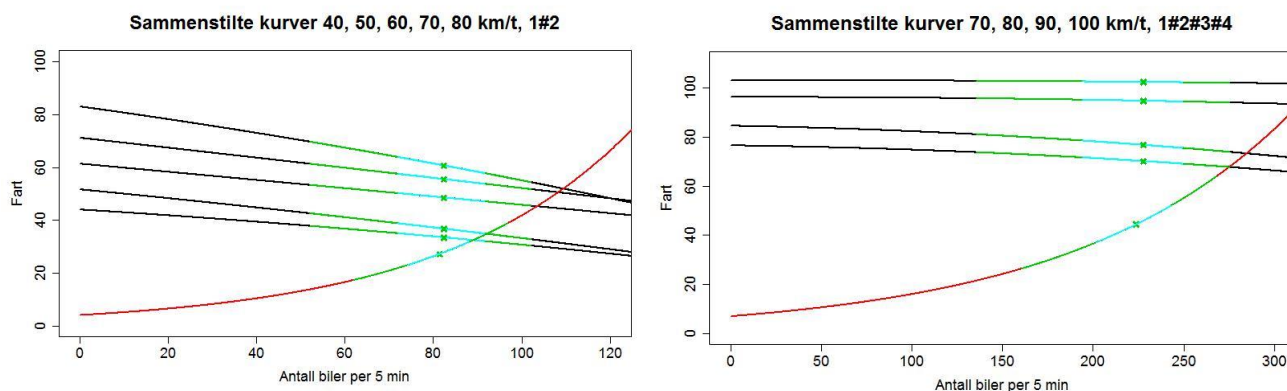
Figur 18: Estimerte gjennomsnittlige VDF kurver for tofeltsveger.





Figur 19: Estimerte gjennomsnittlige VDF kurver for 4-feltsveger.

De fleste av kurvene etter sammenbrudd er basert på få tellepunkter. For eksempel er kurven for 70 km/t på 2-feltsveg etter sammenbrudd estimert på kun ett tellepunkt. Derimot er det før sammenbrudd alltid flere tellepunkt med i estimeringen. For å styrke estimatet også for situasjonen etter sammenbrudd foreslåes følgende sammenstilling av kurvene for 2-feltsveg og for 4-feltsveg. Vi antar at situasjonen etter sammenbrudd er lik for alle fartsgrenser, men beholder kurvene for situasjonen før sammenbrudd. Resultatet er vist i Figur 20 med estimerer gitt i Tabell 5.



Figur 20: Resulterende VDF etter sammenstilling.

Tabell 5: Resulterende estimater for VDF etter sammenstilling.

Farts- grense	Antall felt i kjøre- retning	$a$	$b$	$c$	$C$	$\alpha$	$x_s$	$x_s$ 90% min	$x_s$ 90% max	$x_b$	$x_b$ 90% min	$x_b$ 90% max
40	1	44.0	-0.103310	-0.000295	4.2	0.023	82	52	102	81	61	95
50	1	51.6	-0.162246	-0.000216	4.2	0.023	82	52	102	81	61	95
60	1	61.3	-0.153406	-0.000020	4.2	0.023	82	52	102	81	61	95
70	1	71.1	-0.186902	-0.000030	4.2	0.023	82	52	102	81	61	95
80	1	82.9	-0.230052	-0.000487	4.2	0.023	82	52	102	81	61	95
70	2	76.4	-0.009279	-0.000082	7.1	0.008	228	136	275	272	159	270
80	2	84.4	-0.013259	-0.000092	7.1	0.008	228	136	275	272	159	270
90	2	96.1	-0.000000	-0.000030	7.1	0.008	228	136	275	272	159	270
100	2	102.9	-0.000000	-0.000014	7.1	0.008	228	136	275	272	159	270

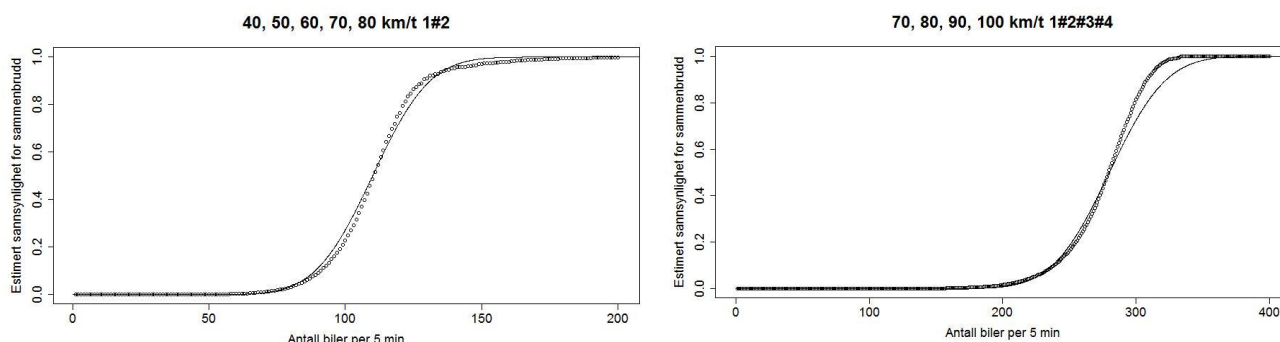
### 3.2.2 Beregning av sannsynlighet for sammenbrudd i trafikken

Gjennom punkt 1. i rutine-listen over er det estimert en sett med punkter som er definert som sammenbrudds-punkter, dvs. punkter før sammenbrudd med et påfølgende punkt etter sammenbrudd. En nyttig egenskap (for eksempel i en trafikkmodelleringssituasjon) er sannsynligheten for å få et sammenbrudd gitt en *etterspurt* trafikk. Med noen antagelser kan dette estimeres fra de definerte sammenbrudds-punktene. For alle sammenbrudds-punktene ved en 2- eller 4-feltsveg estimeres sannsynligheten  $p(x)$  for sammenbrudd gitt en etterspurt trafikk  $x$  ved

$$\hat{p}(x) = \frac{(\# \text{sammenbruddpunkter} \leq x)}{(\# \text{sammenbruddpunkter} \leq x) + (\# \text{punkter som ikke er sammenbruddpunkter} \geq x)}.$$

Denne estimatoren teller opp antall sammenbrudds-punkter observert med en trafikk mindre eller lik den etterspurte trafikken  $x$  (over brøkstreken). Den samme tellingen pluss alle observasjonene større eller lik den etterspurte trafikken som ikke gav sammenbrudd utgjør antall observasjoner (under brøkstreken). Denne estimatoren har flere tiltalende egenskaper. For det første vil den gå mot sannsynlighet 1 for sammenbrudd når etterspurt trafikk blir stor. For det andre er den ikke bare et marginalestimat basert på antall observasjoner med og uten sammenbrudd for observert trafikk  $x$ , men bruker informasjon om observerte sammenbrudd også før  $x$  (det er naturlig at dersom man observerer et sammenbrudd for en etterspurt trafikk  $x$  ville man også ha observert sammenbrudd for en større etterspurt trafikk), samt informasjon om alle observasjoner med en trafikk større enn  $x$  som ikke gir sammenbrudd. Resultatet fra denne beregningen er vist med punktene i Figur 21.





Figur 21: Estimert sannsynlighet for sammenbrudd gitt en etterspurt trafikk, samt tilpasset sannsynlighetskurve.

Kurvene i Figur 21 er estimert ved den kumulative normalfordelingsfunksjonen  $p(x) = \Phi(x; \mu, \sigma)$ , der estimerer for  $\mu$  og  $\sigma$  er gitt i Tabell 6. Merk at selv om den kumulative normalfordelingsfunksjonen er brukt som funksjonsform for  $p(x)$  er **ikke**  $p(x)$  en kumulativ sannsynlighetsfunksjon, men er funksjon som gir ut sannsynligheten for sammenbrudd ved en gitt etterspurt trafikk. Arbeidet med beregning av sannsynlighet av sammenbrudd er mer utfyllende beskrevet av Arnesen og Hjelkrem (2017).

Tabell 6: Estimerte parametre for kurvene som definerer sannsynligheten for sammenbrudd i Figur 21.

40, 50, 60, 70, 80 km/t 1#2			70, 80, 90, 100 km/t 1#2#3#4		
Parameter	$\mu$	$\sigma$	Parameter	$\mu$	$\sigma$
Estimat	110	16.5	Estimat	280	33.5

### 3.2.3 Samvirkende effekter mellom kjøretøy

Tilstedeværelsen av tunge kjøretøy kan påvirke en trafikkstrøm. Hovedgrunnen til dette er at tunge kjøretøy skiller seg relativt mye fra lette kjøretøy når det gjelder fysiske egenskaper. Lette kjøretøy er en gruppe med relativt homogene egenskaper, som lengde, bredde, høyde og tyngde. Tunge kjøretøy kan bli over 10 ganger så tunge, 3 ganger så høye, og 5 ganger så lange som en personbil. Dette fører videre til at tunge kjøretøy har en annen atferd dynamisk sett. Noen typiske eksempler på dette er:

- Redusert fart i motbakker. Motoreffekt per kg er vanligvis lavere hos tunge kjøretøy enn for personbiler. Derfor vil et saktegående kjøretøy i motbakke føre til en redusert fart for alle som blir liggende bak.
- Økt avstand til kjøretøyet foran. I førerkortopplæringen for tunge kjøretøy blir elevene instruert til å holde en avstand på 5 sekunder til kjøretøyet foran, i motsetning til 3-

sekundsregelen praktisert for lette kjøretøy. Denne regelen blir sjelden fulgt i praksis, men tunge kjøretøy holder allikevel lengre avstand til kjøretøyet foran (Hjelkrem, 2015)

- Redusert toppfart på motorveger. Tunge kjøretøy er som regel utstyrt med fartssperre som deaktiverer gasspedalen dersom kjøretøyet når en viss grense, som oftest 85 km/t. Dette gjør at tunge kjøretøy ikke har mulighet til å holde fartsgrensen der den er høyere enn fartssperren.

På grunn av dette kan en økt tungebilandel føre til endring i trafikkstrømmen. Derfor er det undersøkt om tungebilandelen påvirker noen av de resultatene som allerede er presentert i rapporten. I tillegg er det gjort noen betraktninger angående hvordan tungebilandelen påvirker farten i situasjoner vi ikke har data for, og hva en kan gjøre med dette.

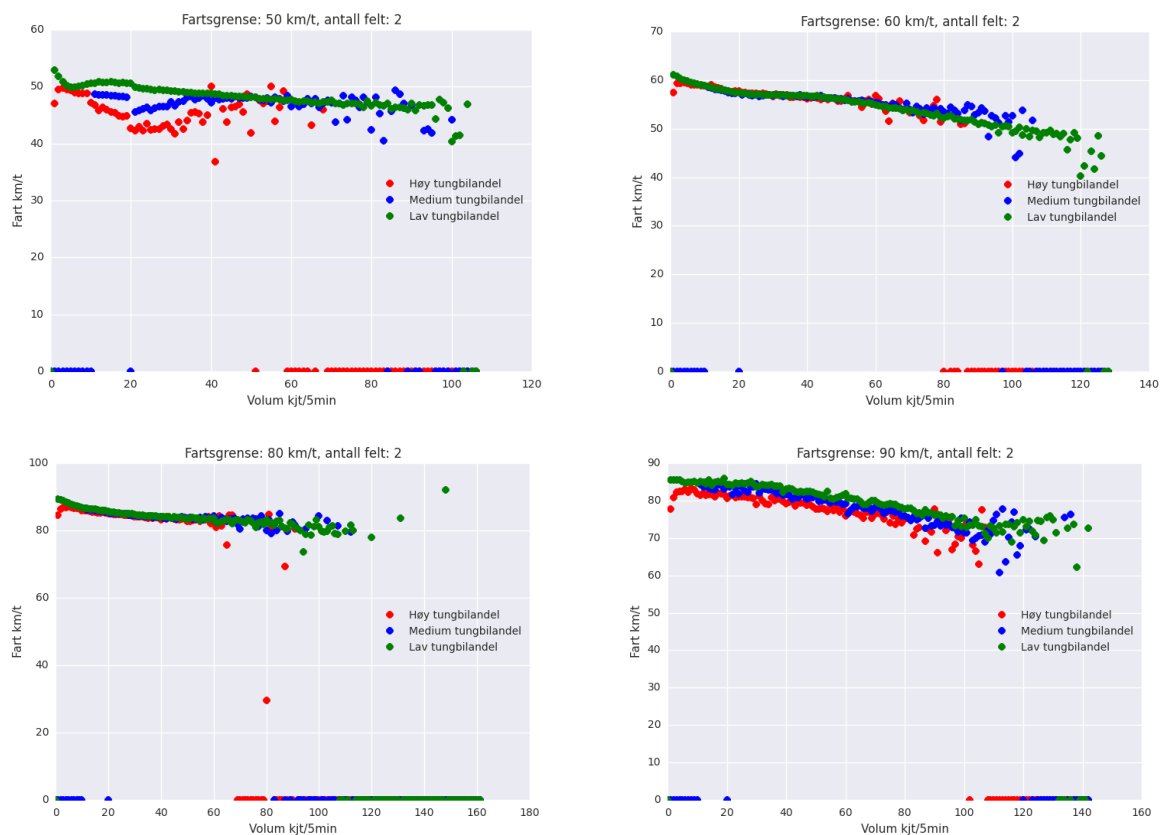
### **3.2.3.1 Effekt av tungebilandel på friflytsfart**

Med utgangspunkt i trafikkdata som ble benyttet til å estimere VDF-kurver, ble det undersøkt om tungebilandel har en effekt på friflytsfart. For hvert 5-minuttsintervall med data ble det beregnet trafikkvolum, gjennomsnittsfart og tungebilandel, hvor tunge biler ble definert som kjøretøy over 5,6 meter. Sammenhengen mellom fart og trafikkvolum ble plottet for 2-feltsveger og 4-feltsveger med varierende fartsgrense og tungebilandel, se Figur 22 og Figur 23. For å unngå å få med data om sammenbrudd, ble det kun inkludert data fra tellepunkter hvor sammenbrudd ikke ble observert. Friflytsfart er i denne sammenhengen den farten som er observert ved lave trafikkvolum, helt til venstre i hvert plott. Tungebilandel er delt inn i tre kategorier:

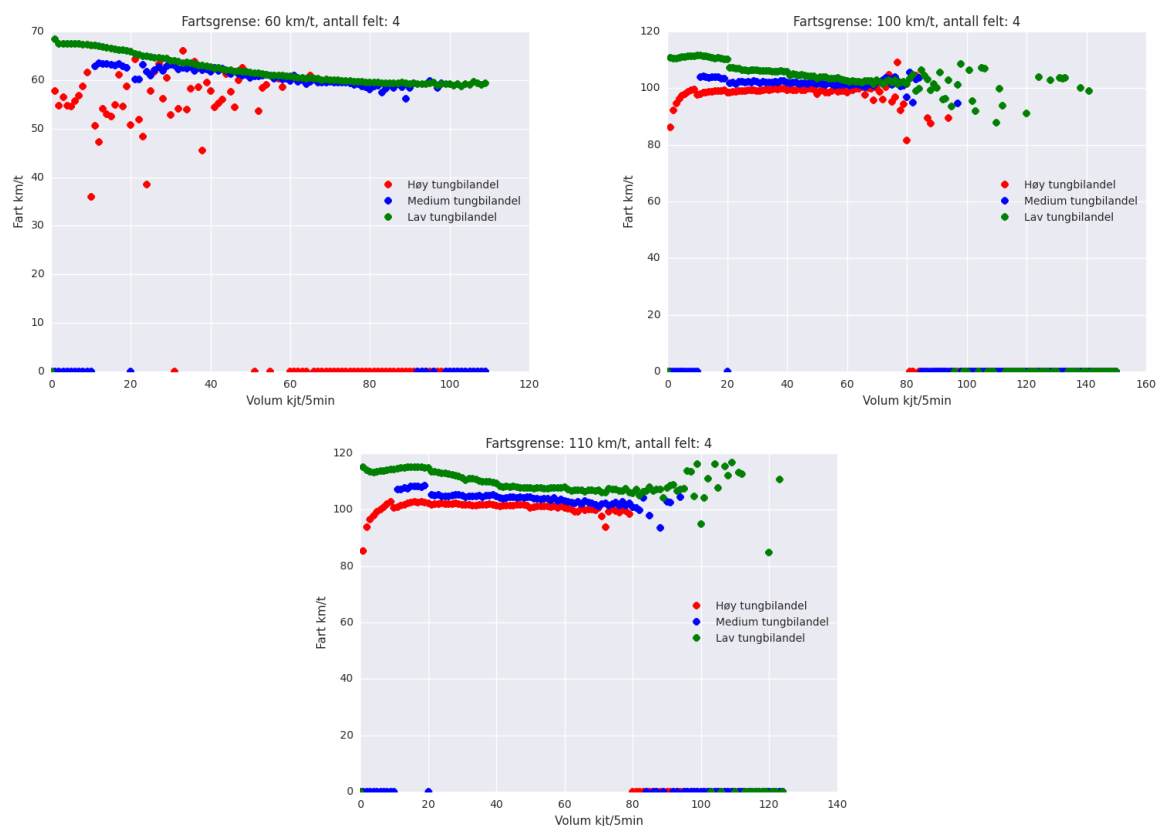
- Lav: Under 5% tunge kjøretøy
- Medium: 5-10 % tunge kjøretøy
- Høy: Over 10 % tunge kjøretøy

For tofeltsveger ser en at tungebilandel har svært lite utslag på friflytsfart på veger med fartsgrense 60 og 80 km/t. Ved fartsgrense 50 km/t er det liten forskjell ved lave trafikkvolum, men ved middels trafikkvolum er det store utslag. Det kan forklares med at veger med fartsgrense 50 km/t som regel befinner seg i tettbygd strøk, slik at det er andre faktorer som kan spille inn, for eksempel nærliggende kryss. For fartsgrense 90 km/t er det en tendens til at økende tungebilandel medfører en fartsreduksjon, både for friflytsfart og fart ved høyere trafikkvolum. Dette kan forklares med at tunge kjøretøy er utstyrt med fartssperre, slik at tunge kjøretøy generelt trekker ned gjennomsnittsfarten.

For 4-feltsveger er det en markant forskjell i friflytsfart ved økende tungebilandel ved fartsgrense 100 og 110 km/t. Antageligvis er dette også på grunn av fartssperrene i tunge kjøretøy. For 60 km/t er det svært få observasjoner med medium og høy tungebilandel ved friflytsfart. Dette forårsaker den store spredningen av røde datapunkter, og de manglende blå datapunktene. Det medfører at det er vanskelig å trekke noen konklusjoner om friflytsfart i denne situasjonen.



*Figur 22: Sammenheng mellom gjennomsnittsfart og trafikkvolum i 5-minutts intervaller for 2-feltsveger med fartsgrense 50 km/t (øverst til venstre), 60 km/t (øverst til høyre), 80 km/t (nederst til venstre) og 90 km/t (nederst til høyre). Røde punkter har høy tungbilandel, blå punkter har medium tungbilandel, grønne punkter har lav tungbilandel.*



*Figur 23: Sammenheng mellom gjennomsnittsfart og trafikkvolum i 5-minutts intervaller for 4-feltsveger med fartsgrense 60 km/t (øverst til venstre), 100 km/t (øverst til høyre) og 110 km/t (nederst). Røde punkter har høy tungbilandel, blå punkter har medium tungbilandel, grønne punkter har lav tungbilandel.*

### 3.2.3.2 Effekt av tungbilandel på sammenbrudd i trafikkstrømmen

Metodikken som ble presentert i kapittel 3.2.2 ble også anvendt på datasettet med beregnede tungbilandeler. Fordi tunge kjøretøy er et begrep som favner over et svært variert sett med kjøretøytyper, ble metoden gjennomført med to ulike definisjoner på tunge kjøretøy: over 5,6 meter og over 12,5 meter lengde. Det ble antatt at det kunne være mange kjøretøy i gruppen tunge kjøretøy som i realiteten var så vidt over 5,6 meter, og som dermed hadde tilnærmet samme atferd som kjøretøy under 5,6 meter. Jo større mengde slike biler som er registrert, jo mer vil de overdøve effekten av de virkelige tunge kjøretøyene, som store lastebiler og vogntog. Derfor ble analysen også gjennomført hvor tunge kjøretøy ble definert som kjøretøy over 12,5 meter.

Tabell 7 og Tabell 8 viser en oversikt over mengden datapunkter og sammenbrudds-punkter som ble brukt til å estimere sannsynlighetskurver ved ulike tungbilandeler, med tungbildefinisjon på henholdsvis 5,6 og 12,5 meter.

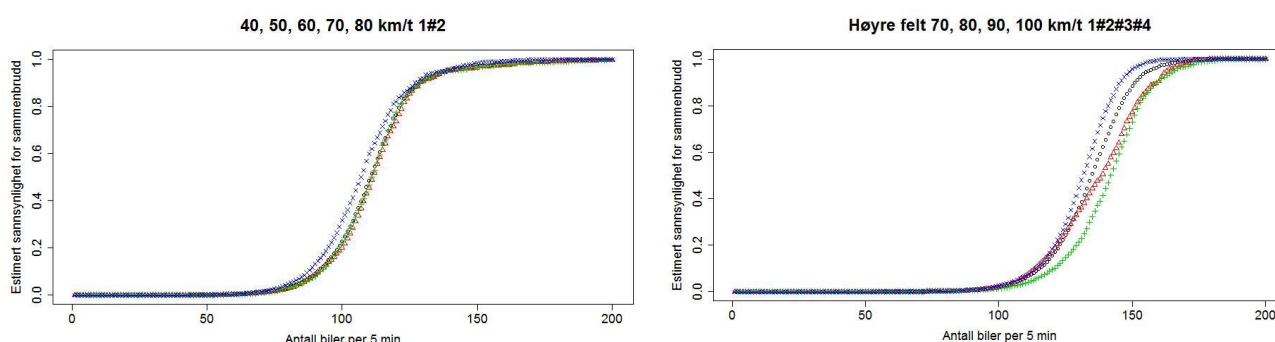
*Tabell 7: Antall datapunkter og sammenbrudds-punkter registrert som funksjon av valgt tungbilandel. Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 5,6 meter.*

40, 50, 60, 70, 80 km/t 1#2			70, 80, 90, 100 km/t 1#2#3#4		
	#datapunkter	#sammenbrudd		#datapunkter	#sammenbrudd
< 5 %	2583591	1521	< 5 %	280411	199
5 %-10 %	861130	1674	5 %-10 %	214317	503
>10 %	1743179	807	>10 %	928067	1667
Alle	5187900	4002	Alle	1422795	2369

*Tabell 8: Antall datapunkter og sammenbrudds-punkter registrert som funksjon av valgt tungbilandel. Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 12,5 meter.*

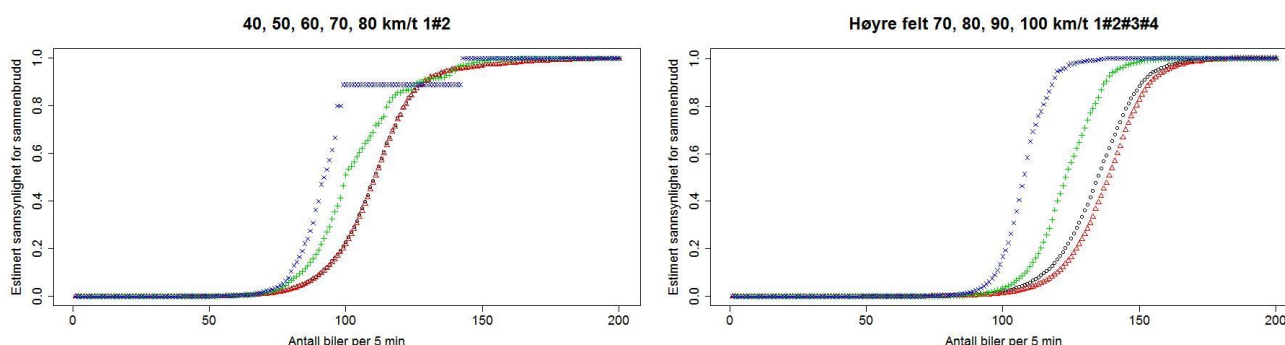
40, 50, 60, 70, 80 km/t 1#2			70, 80, 90, 100 km/t 1#2#3#4		
	#datapunkter	#sammenbrudd		#datapunkter	#sammenbrudd
< 5 %	4338088	3811	< 5 %	714445	1469
5 %-10 %	398376	177	5 %-10 %	255113	548
>10 %	451436	14	>10 %	453237	352
Alle	5187900	4002	Alle	1422795	2369

Figur 24 viser sannsynligheten for sammenbrudd på 2-feltsveger og 4-feltsveger ved ulike tungbilandeler. Den viser at kurvene er tilnærmet overlappende for 2-feltsveger, og med noe større forskjeller for 4-feltsveger.



*Figur 24: Estimerte sannsynlighetskurver for trafikk med tungbilandel mindre 5 % (rød), mellom 5 og 10 % (grønn), over 10 % (blå) og samlet (svart). Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 5,6 meter.*

Dersom en derimot benytter en grense for tungbildefinisjon på 12,5 meter, blir det store utslag i den estimerte sannsynligheten for sammenbrudd. Dette er vist i Figur 25, og demonstrerer tydelig hvilket utslag tunge kjøretøy har på trafikkflyten når trafikkvolumet nærmer seg sammenbrudd. Blant annet ser en at på 4-feltsveger er det ca 90 % sannsynlighet for sammenbrudd dersom mer enn 1 av 10 kjøretøy er over 12,5 meter ved et trafikkvolum på ca 110 kjt/5min (tilsvarer 1320 kjt/t). Dersom mindre enn 1 av 20 kjøretøy er over 12,5 meter, finner man derimot at trafikkvolumet må være ca 160 kjt/5min (tilsvarer 1920 kjt/t) for å få en sammenbrudds-sannsynlighet på 90 %. Dette arbeidet er mer utfyllende beskrevet av Hjelkrem og Arnesen (2017).



Figur 25: Estimerte sannsynlighetskurver for trafikk med tungbilandel mindre 5 % (rød), mellom 5 og 10 % (grønn), over 10 % (blå) og samlet (svart). Tung bil er her definert som alle kjøretøy lengre enn 12,5 meter.

### 3.2.3.3 Betraktninger rundt effekt av tungbilandel i andre situasjoner

En stor utfordring med det datasettet som har vært tilgjengelig er at Statens vegvesen sine tellepunkt er plassert på veger med relativt god geometri. Det betyr at det ikke kan brukes til å si noe om samvirkende effekter på veger med utfordrende geometri. Spesielt er det følgende vegtyper som ville vært interessant å samle inn mer data fra for videre arbeid:

- 3-feltsveger (2+1)
- Veger med ulik grad av stigning
- Smale veger/1-feltsveger
- Veger med krapp kurvatur

### 3.3 Beregning av energiforbruk, drivstofforbruk og utslipp

I beregningsmodellen blir det i tillegg til fartsprofil estimert den energimengden som må leveres av motor og bremses på kjøretøyet for at det skal klare å følge fartsprofilen. Det gjøres ved å beregne de motstandene som virker på kjøretøyet, mer spesifikt gravitasjonsmotstand, rullemotstand, luftmotstand og akselerasjonsmotstand. Effekten  $P_f$  som kreves for fremdrift kan uttrykkes som følgende:

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

, hvor:

$v$  er fart,

$m$  er masse,

$m_e$  er ekvivalent masse, som kompenserer for effekten av rotasjonstregghet under akselerasjon,

$g$  er tyngdeakselerasjon ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),

$\alpha$  er helning,

$C_r$  er koeffisient for rullemotstand,

$\rho$  er lufttetthet ( $1,25 \text{ kg/m}^3$  ved  $7^\circ\text{C}$  på havnivå),

$A$  er kjøretøyets frontareal,

$C_d$  er koeffisient for luftmotstand,

$a$  er akselerasjon.

Det kreves mange detaljopplysninger om et kjøretøy for å beregne ekvivalent masse  $m_e$ , og det vil vanskeliggjøre bruken av denne kalkuleringsmetoden. Vi forenkler derfor det hele ved å bruke en konstant representativ verdi for  $m_e$ . For bil med forbrenningsmotor brukes verdien  $1,1 \cdot m_{\text{egen}} + \text{nyttelast}$ , og  $1,05 \cdot m_{\text{egen}} + \text{nyttelast}$  for elbil. Vekttillegget for roterende masser under akselerasjon settes altså til en fast andel av kjøretøyets egenvekt, pluss nyttelast.

Arbeidet  $W_f$  som kreves for fremdrift av kjøretøyet over en strekning er integralet av positive verdier av  $P_f$ . I noen tilfeller kan det hende at fremdriften må bremses for å følge fartsprofilen. Bremsarbeidet  $W_b$  kan finnes ved å integrere over  $P_b$ , som er effekten på drivhjulene *mot* kjøreretningen.

Energien som må til for å utføre  $W_f$  må produseres av motoren som er i kjøretøyet. Det er viktig å understreke at den energien som leveres til hjulene som sørger for fremdrift, ikke nødvendigvis er den samme mengden som leveres til motoren fra energibæreren<sup>1</sup>. Dette på grunn av tap ved konvertering av energi, som uttrykkes av motorens virkningsgrad. Neste del belyser dette temaet videre.

---

<sup>1</sup>Forbruk og utslipp i forbindelse med produksjon og fremføring av energibærer til kjøretøy er ikke tatt med her.

### 3.3.1 Virkningsgrader

Virkningsgrad  $\eta$  defineres generelt som forholdet mellom utført arbeid og tilført energi:

$$\eta = \frac{W_{ut}}{E_{inn}}$$

For fremdriften i et kjøretøy vil virkningsgraden bestemmes av forholdet mellom arbeidet utført for å drive kjøretøyet fremover og forbrukt mengde av energibærer, for eksempel diesel eller strøm. Uttrykket for denne virkningsgraden blir:

$$\eta_f = \frac{W_f}{E_f}$$

hvor  $W_f$  er sum arbeid utført av drivhjulene når drivkraften virker med kjøreretningen og  $E_f$  er energi tatt fra tank og/eller batteri for å utføre  $W_f$ . (Behandling av bremsearbeidet kommer senere.) Virkningsgraden  $\eta_f$  er dermed en faktor som inkluderer alle tap knyttet til fremdrift, både motor, klimaanlegg, vifte, girkasse o.l. Forbruket av energibæreren kan uttrykkes på følgende måte:

$$E_f = \frac{W_f}{\eta_f}$$

Virkningsgraden er et resultat av mange forhold, men vi må i denne sammenhengen anta at den er konstant, og heller basere denne konstanten på faktiske målinger.

Vi behandler bremsearbeidet for seg, separert fra fremdriftsarbeidet. Størrelsen på bremsearbeidet er i stor grad avhengig av vekt, veigeometri og kjørestil. Ved å behandle fremdrift og oppbremsing for seg, blir det lettere å håndtere ulike drivlinjer. For en drivlinje med regenerative bremseser, kan gjenvunnet energi uttrykkes som

$$E_b = W_b * \eta_b$$

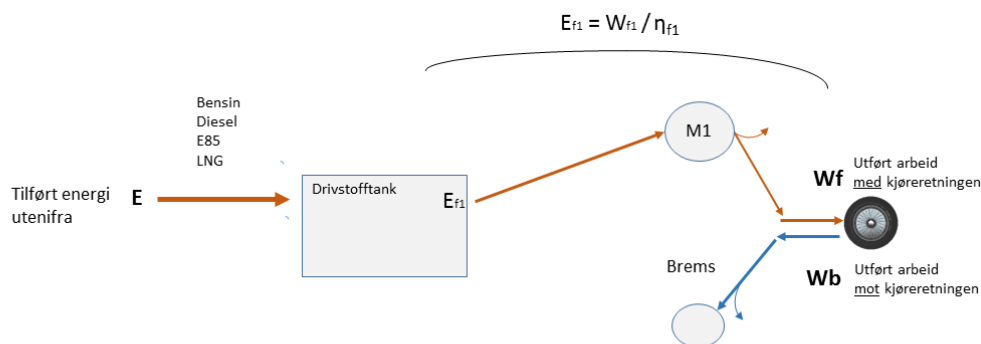
Her er  $\eta_b$  et antatt konstant forhold mellom gjenvunnet energi, og bremsearbeid utført på hjulene. Dette forutsetter at mottagende batteri ikke er fulladet, og kan håndtere den aktuelle bremseeffekten. De fleste elbilførere kjører slik at dette gjelder.

#### 3.3.1.1 Konvensjonell drivlinje

For en tradisjonell drivlinje uten regenerativ bremsing, det vil si en tradisjonell bensin- eller dieselbil, er prosessen som foregår i drivlinjen skissert i Figur 26. Her er det ingen tapsledd ved fylling av drivstoff på tank (i motsetning til ved lading av elbil). Dermed blir det totale energibehovet  $E$  lik fremdriftsenergien  $E_f$ :

$$E = E_f = \frac{W_f}{\eta_f}$$





Figur 26: Skisse over energibruk til fremdrift med en konvensjonell drivlinje, dvs uten regenerativ bremsing og kun én motor.

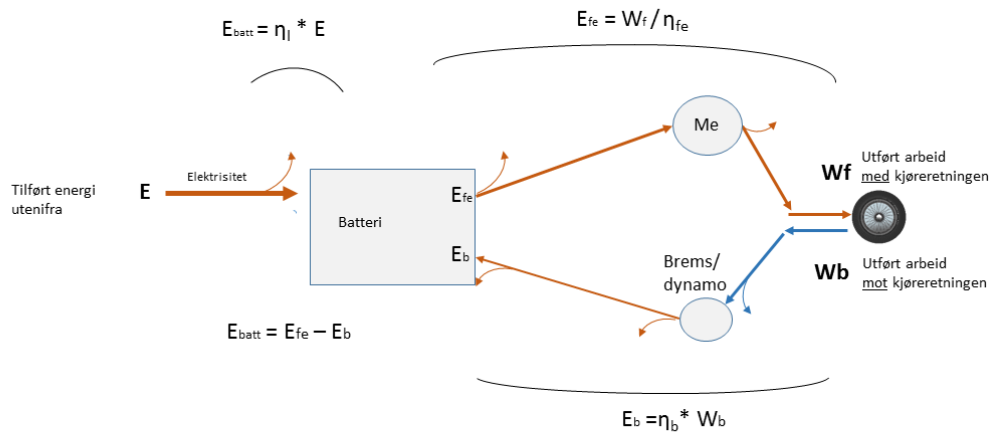
### 3.3.1.2 Drivlinje med elektrisk motor og regenerative bremseser

Med introduksjon av hybrid-kjøretøy og el-kjøretøy har regenerative bremseser blitt tatt i bruk. Da kan behovet for tilført energi utenifra,  $E$ , blir mindre enn energibehovet for fremdrift  $E_f$ .

På elbiler er fylle- eller lade-prosessen forbundet med såpass store tap at den også må regnes med. Dermed blir uttrykket for  $E$  følgende:

$$E = \frac{\left( \frac{W_f}{\eta_{fe}} \right) - (W_b \cdot \eta_b)}{\eta_l}$$

Her er  $W_b$  utført bremsearbeid,  $\eta_b$  er virkningsgraden til de regenerative bremsene, og  $\eta_l$  er virkningsgraden for lading av batteriet. Som sagt forutsettes det at batteriet kan ta imot det som gjenvinnes, og at all bremsing skjer på denne måten. Denne prosessen er skissert i Figur 27.



Figur 27: Skisse over energibruk til fremdrift med en elektrisk drivlinje og regenerativ bremsing.

Virkningsgraden for lading,  $\eta_l$ , antas å være konstant, dvs. at tap i forbindelse med lading kan settes til en fast verdi. Slik som  $\eta_f$  og  $\eta_b$  er definert, er de et uttrykk for tap i elmotor, styreelektronikk og batteri. Selv om en elmotors virkningsgrad er ganske høy og nesten konstant innenfor normalt turtall og belastning, vil særlig batteriets indre motstand ved utlading gjøre at drivlinjens virkningsgrad synker med økende effektbehov.

Det er vanlig å modellere batteriet som en ideell strømkilde i serie med en variabel indre motstand  $R_i$ . Mens motorens effekt er proporsjonal med strømmen:

$$P_{motor} \sim U_{motor} \cdot I$$

, øker tapet i batteriet kvadratisk med strømstyrken:

$$P_{tap} \sim R_i \cdot I^2$$

Her er  $U$  spenning,  $I$  er strøm, og  $R_i$  er indre motstand i batteriet. Den samlede virkningsgraden er altså avhengig av motoreffekten i øyeblikket. I tillegg kommer at  $R_i$  varierer med batteritype, temperatur og ladestatus. Det å erstatte alt dette med en fast gjennomsnittlig virkningsgrad gjør det enkelt å regne, men som elbil-førere erfarer, vil forbruksanslag fra enkle planleggere ofte være feil når forholdene varierer langs en rute.

Det er lite tapsvarme å hente i en elbil, så om vinteren blir det et ekstra energitap for å holde kupeen varm. Ideelt sett bør alle disse faktorene inngå i beregningen, men for å gjøre dette til et praktisk verktøy, bruker vi også her måledata til å estimere en gjennomsnittlig virkningsgrad for hele drivlinjen.

Virkningsgraden for regenerativ bremsing er også situasjonsavhengig, men effektene er mindre enn de som brukes til fremdrift, og batteriets indre motstand spiller da en mindre rolle. En praktisk tilnærming vil derfor være å anta at  $\eta_f$  og  $\eta_b$  er konstante verdier, som presentert i Tabell 9.

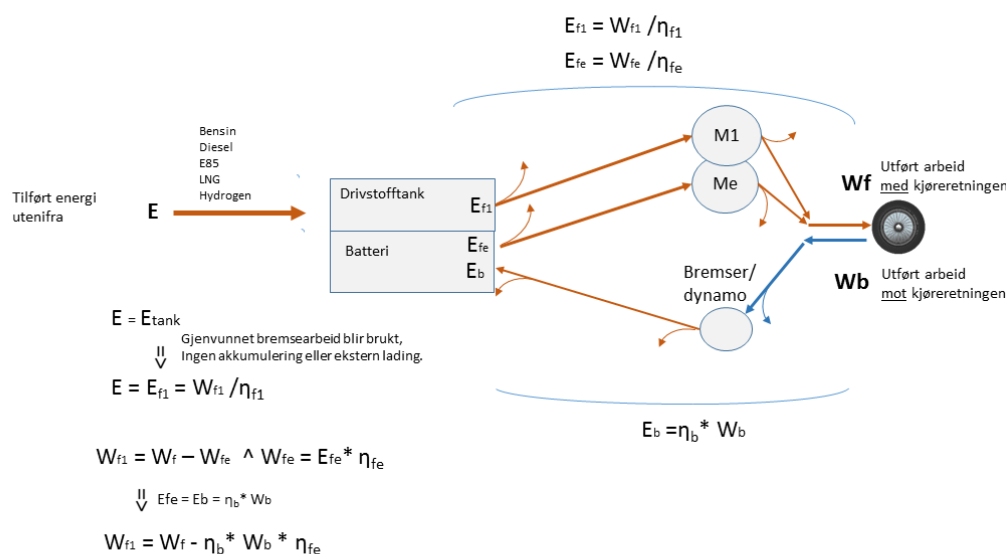
*Tabell 9: Anbefalte verdier for virkningsgrader ved elektrisk drivlinje og regenerativ bremsing.*

Virkningsgrader	Symbol	Verdi
<b>Fremdrift</b> , batteri til hjul	$\eta_{fe}$	0,8
<b>Bremsing</b> , hjul til batteri	$\eta_b$	0,8
<b>Lading</b> av batteri fra nett	$\eta_l$	0,85

En elbil produserer lite tapsvarme, og omtrent all kupevarme kommer fra å tappe batteriet. Derfor kan det kan være en god tilnærming å legge til f.eks. 1500 watt til den beregnede effekten.

### 3.3.1.3 Hybrid drivlinje

Hybridkjøretøy opererer med 2 kraftkilder, med varierende konfigurasjon. Et batteri og en elmotor som driver hjulene inngår alltid, men det varierer om forbrenningsmotoren også kan drive hjulene direkte (parallell hybrid) eller bare driver en strømgenerator (seriehybrid). Til slutt finnes det kombinasjoner av disse. For enkelhets skyld ser vi her på en parallellhybrid, Figur 28, som teoretisk gir det beste resultatet.



Figur 28: Skisse over energibruk til fremdrift med en hybrid drivlinje og regenerativ bremsing

Energibehovet kan dermed uttrykkes på følgende måte:

$$E = \frac{W_f}{\eta_{f1}} - \frac{\eta_{fe}}{\eta_{f1}} \cdot W_b \cdot \eta_b$$

, hvor  $\eta_{f1}$  er virkningsgrad tank til hjul for  $M1$ , og  $\eta_{fe}$  er virkningsgrad batteri til hjul for  $Me$ . Verdier på  $\eta_{f1}$ ,  $\eta_{fe}$ ,  $\eta_b$  og  $\eta_l$  er normalt ikke oppgitt av produsentene, og må estimeres fra forsøk. De vil variere med bilmodell og bruksmønster. Typisk vil  $\eta_{f1}$  variere med temperatur og belastning, og for elbiler vil  $\eta_{fe}$  i tillegg variere med ladestatus. Dette betyr at virkningsgraden for en og samme bil endrer seg langs kjøreturen. For å få et praktisk regneverktøy som regner på større trafikkstrømmer, må en benytte seg av gjennomsnittsverdier.

### 3.3.1.4 Drivlinje med brenselceller (hydrogendrift)

I hydrogenbiler blir det produsert strøm i en brenselcelle, som igjen driver en elmotor. I Figur 28: Skisse over energibruk til fremdrift med en hybrid drivlinje og regenerativ bremsing representerer  $M1$  en brenselcelle i serie med en elmotor. Virkningsgraden  $\eta_{f1}$  blir dermed produktet av virkningsgraden for brenselcellene og virkningsgraden for elmotoren. Brenselcelleteknologien er under stadig utvikling, og detaljene rundt deres effektivitet er uklare. Ifølge US Department of Energy (2016a) vil hydrogen brenselceller for transportbruk ha virkningsgrader i området 50% - 60%. Hvis vi regner med omkringliggende hjelpesystemer som vifte/kompressor og effektutjevning mot batteri, antar vi at brenselcellen som strømlieferandør til elmotoren har virkningsgrad på ca. 50%. Selve

elmotoren har en antatt virkningsgrad på omtrent 90%, og da blir forventet virkningsgrad for brenselcelle + elmotor,  $\eta_{f1}$  på  $0,5 * 0,9 = 0,45$ .

Som for el-drift, vil også brenselcellens effektivitet variere med belastningen, men vi har ikke grunnlagsdata i øyeblikket til å formulere noen modell for det. Vi har heller ikke konkrete målinger som kan gi oss en realistisk gjennomsnittsverdi, så vi bruker ganske enkelt den antatte virkningsgraden inntil videre. Regenerativ bremsing skjer på samme måte som for elbiler, så vi antar samme virkningsgrad som for dem, og at all gjenvunnet bremseenergi går via batteriet til elmotoren. Med unntak av den kombinerte virkningsgraden for brenselcelle + elmotor  $\eta_{f1}$ , betraktes denne som en vanlig hybrid.

Uttrykket for energibehov blir dermed som før:

$$E = \frac{W_f}{\eta_{f1}} - \frac{\eta_{fe}}{\eta_{f1}} \cdot W_b \cdot \eta_b$$

Brennverdien for hydrogen er 120 til 140 MJ/kg (US Department of Energy, 2016b), avhengig om man antar at vandampens kondensasjonsvarme kan nyttiggjøres eller ikke. I bilsammenheng antar vi at denne varmen ikke nyttiggjøres, og at det minste tallet gjelder, 120 MJ/kg.

### 3.3.2 Beregning av utslipp

I denne rapporten er det for utslipp kun fokusert på komponentene CO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub>. Det er kun kjøretøy med bensin-, diesel- eller gassmotor som får beregnet utslipp, fordi energisyklusen i beregningene er begrenset til det som skjer etter fylling av tank. Det vil si at eventuelle utslipp som følge av produksjon, etterbehandling og transport av energibærer ikke er tatt inn i beregningene.

I beregningsmodellen blir det estimert nødvendig fremdriftsarbeid ut fra kjøretøyegenskaper, vegnett og antatt fartsprofil. Deretter brukes drivlinjens antatte virkningsgrad til å beregne energiforbruk E. Beregning av utslipp tar utgangspunkt i drivstofforbruk målt i kg. Med utgangspunkt i energiforbruket kan drivstofforbruket uttrykkes slik:

$$\text{Forbruk}[kg] = \frac{E[MJ]}{\text{Brennverdi}[\frac{MJ}{kg}]}$$

#### 3.3.2.1 Forbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp

I en forbrenningsmotor er det rimelig å anta at produsert CO<sub>2</sub> per liter drivstoff er konstant. Basert på tilgjengelige kilder (Miljødirektoratet, 2015 og "Emission inventory guidebook") er vi kommet fram til gjennomsnittsverdier som brukes i beregningsmodellen, som vist i Tabell 10.

Da kan utslipp av CO<sub>2</sub> beregnes på følgende måte:

$$\text{Utslipp}_{CO_2}[gram] = \text{Forbruk}[kg] * \text{Prod}_{CO_2}[\frac{gram}{kg}]$$

I samme tabell har vi også lagt inn noen typiske virkningsgrader. Virkningsgraden kan variere med dreiemoment og belastning på motoren. Oppgitte verdier har fremkommet ved å sammenligne beregninger med erfaringstall for forbruk, samt noen målinger. Derfor er dette verdier som det er aktuelt å endre i takt med mer kunnskap og tilgjengelig materiale.

*Tabell 10: Verdier for beregning av forbruk og lokalt CO<sub>2</sub>-utslipp*

	Bensin	Diesel	LNG/ Metan	Hydrogen	E85	HVO100
Drivstoff tetthet[kg/l]	0,74	0,84	0,45	-	0,78	0,78
Drivstoff brennverdi [MJ/kg]	43,9	43,1	46	120	29,7	44,1
CO <sub>2</sub> -produksjon [gram/kg]	3180	3140	2750	0	2104	2980
Typiske verdier for $\eta_{FI}$ (Fra tank til drivhjul)	0,20	0,24 (Personbil) 0,35 (Tung bil)		0,45	0,20	Som diesel

### 3.3.2.2 NO<sub>x</sub>-utslipp

Vegtrafikken stod i 2012 for 22 % av det norske NO<sub>x</sub> -utslippet. NO<sub>x</sub> består i all hovedsak av NO og NO<sub>2</sub>. Begge gasser er helseskadelige, men NO<sub>2</sub> regnes som hovedproblemet i trafikksamheng. NO<sub>2</sub> akkumuleres i byluften når det er vindstille og inversjonsforhold over flere dager. Ved bruk av luftkvalitetskriterier/grenseverdier for NO<sub>2</sub> regner en samtidig å beskytte mot NO, og NO<sub>x</sub> brukes derfor som en fellesbetegnelse. Det er viktig å huske at effekten av NO<sub>x</sub>-utslipp ikke bare er avhengig av den totale mengden NO<sub>x</sub>, men også forholdet NO/NO<sub>2</sub>. Andelen NO<sub>2</sub> er vanskelig å måle, men synes i nyere dieselmotorer å ligge på opp mot 50 % av de samlede NO<sub>x</sub>-utslippene. For at nye personbiler med dieselmotor skulle klare Euro 5 avgasskravene (som kom i 2009) for partikler ble det nødvendig å introdusere partikkelfiltre som samler og brenner opp partiklene. Dette har vært vellykket med hensyn til utslippet av partikler, men partikkelfiltrene og oksiderende katalysatorer har som bieffekt ført til at en stor andel av nitrogenoksidet (NO<sub>x</sub>) i avgassene blir oksidert til NO<sub>2</sub>. Dette gir en betydelig økning i andelen av den helseskadelige gassen NO<sub>2</sub> i utslippene av NO<sub>x</sub> og betyr at nye dieselmotorer har høyere NO<sub>2</sub> -utslipp enn gamle dieselmotorer. For bensindrevne personbiler antas NO<sub>2</sub> andelen av NO<sub>x</sub> -utslippet å være vesentlig lavere, rundt 5-10 %.

Mens CO<sub>2</sub>-utslipp kan knyttes direkte til energiforbruk og drivstoff, er beregning av NO<sub>x</sub>-utslipp vanskeligere. Både kjøremønster, type drivstoff og temperatur kan sterkt påvirke mengden NO<sub>x</sub> som blir produsert per liter forbrukt drivstoff.

### Type drivstoff og kjøremønster

Nye bensinbiler fikk fra og med 1989 treveiskatalysatorer, men det ser ut som det er først etter år 2000 at bensinbiler har fått lave utslipp av NO<sub>x</sub> under alle typer kjøring. Personbiler med

bensinmotor har nå knapt målbare utslipp av NO<sub>x</sub>. Alle testede kjøretøy har minimale utslipp av partikler og andre regulerte utslippsfaktorer.

Moderne dieselmotorer har i motsetning til moderne bensinmotorer ikke effektive rensesystemer som kan fjerne utslippene av NO<sub>x</sub>. Mangelen på effektive rensesystemer for NO<sub>x</sub> fra dieselskjøretøy har derfor, i perioder med en økning i andel dieselskjøretøyer, ført til forhøyede konsentrasjoner av NO<sub>2</sub> i de store norske byene. Nye moderne kjøretøy med dieselmotorer slipper ut betydelig mer NO<sub>x</sub> enn nye moderne kjøretøy med bensinmotorer, som vist i Tabell 11.

Dieseldrevne personbiler slipper i gjennomsnitt slipper ut 2-4 ganger mer NO<sub>x</sub> i virkelig trafikk enn det kravspesifikasjonene skulle tilsi. I tett bytrafikk har det vist seg at nye personbiler med dieselmotor slipper ut 0.5 til 1.5 gram NO<sub>x</sub> per kilometer (Hagman m.fl., 2011). Dette er 10 til 40 ganger mer enn tilsvarende biler med bensinmotor. Tilsvarende resultater ble også vist hos Franco m. fl (2014), hvor hovedresultatet fra uttestingen av 15 Euro 6 dieselpersonbiler var at NO<sub>x</sub>-utslippet i snitt var syv ganger høyere enn Euro 6 kravet.

Nye tunge kjøretøy med dieselmotorer slipper ut 4 til 10 gram NO<sub>x</sub> per kilometer i tett bytrafikk, mer enn 10 ganger den angitte grenseverdien. På motorveger når farten er over 80 km/t stemmer eksisterende tester forholdsvis bra med utslippskravene.

*Tabell 11: Gjennomsnittlig utslipp for personbiler i Norge (TØI, 2011).*

Drivstoff	NO <sub>x</sub> g/km	% NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> g/km
Bensin	0,265	1-10	<0,01
Diesel	0,430	40-60	0,25

## Temperatur

Ved kulde blir fordampingen ved innsprøyting av diesel dårligere og dieselpartiklene vil i større grad nå sylinderveggen, såkalt "Wall wetting". Til tross for at dannelsen av termisk NO<sub>x</sub> skulle bli redusert ved lavere temperaturer viser avgassmålinger at utslippene øker ved start i streng kulde. Det kan være flere årsaker til dette. Forbrenningen kan skje på andre måter med kaldt drivstoff, eventuelt lavere innsprøytingstrykk og under påvirkning fra kjemiske radikaler. Systemer for å redusere utslipp av NO<sub>x</sub> kan eventuelt først begynne å fungere etter at motoren har kjørt en stund.

En rapport fra TØI som er utarbeidet på oppdrag fra Statens vegvesen i forbindelse med FoU-programmet EMIROAD viser at utslipp som måles i virkelig trafikk og under vinterforhold, ofte har langt høyere utslippsverdier enn nominelle verdier oppnådd ved typegodkjenning av kjøretøyet (Weber m.fl., 2015). Rapporten viser at Euro 6 dieselpersonbiler riktignok oppnår noe reduksjon av NO<sub>x</sub>-utslippet ved 23°C i forhold til Euro 5, men ligger i virkelig trafikk over tre-fem ganger høyere

enn godkjenningsverdien, og kan under nordiske vinterforhold slippe ut opp mot 7-25 ganger over godkjenningskravet for NO<sub>x</sub>. For eksempel så rapporteres det at NO<sub>x</sub>-utslippene av fra en ny moderne Euro 5 dieselbil var 1,5 g/km ved kaldstart, men sank til 1.0 g/km etter de første 4 km av en bykjøresyklus. Foreløpig kjenner vi ikke til NO<sub>x</sub>-målinger fra tunge kjøretøy testet i kulde.

### 3.3.2.2.1 Implementert beregningsmetodikk for NO<sub>x</sub>-utslipp

Som foregående kapittel viser vil en nøyaktig beregning av NO<sub>x</sub>-utslipp være relativt komplisert. Det er derfor tatt utgangspunkt i den forenklede utregningsmetoden (tier 1) fra "EMEP-EEA air pollutant emission inventory guidebook" (EMEP, EEA, 2016). Denne tar utgangspunkt i kjøretøyklasser, og gjennomsnittsverdier for ulike utslipp pr forbrukt kg drivstoff, på følgende måte:

$$Utslipp_{NO_x}[gram] = Forbruk[kg] \cdot Prod_{NO_x} \left[ \frac{gram}{kg} \right]$$

Tabell 12 viser utdrag fra EMEP-EEA (2016) for såkalte tier 1-beregninger. Alternativer til denne utregningen er tier 2- og tier 3-beregninger foreslått i det samme dokumentet (som tar hensyn til ulike euroklasser), eller HBEFA-koeffisienter (som gjør det samme). I og med at euroklasse ikke er en del av det materialet vi har tilgjengelig for kjøretøysammensetning (utarbeidet av TØI), og at disse mer kompliserte beregningsmetodene derfor krever en god del bearbeiding av både grunnlagsmateriale og beregningsmetodikk, er tier 1-beregningen brukt i denne omgang.

*Tabell 12: Tier 1 utslippsverdier som gram NO<sub>x</sub> pr kg drivstoff for ulike kjøretøytyper. Kilde: (EMEP, EEA, 2016)*

Kjttipe	Drivstoff	Gjsnitt	Min	Maks
Personbil	Bensin	8,73	4,48	29,89
	Diesel	12,96	11,2	13,88
	LPG	15,20	4,18	34,3
Varebil	Bensin	13,22	3,24	25,46
	Diesel	14,91	13,36	18,43
Stor tungbil	Diesel	33,37	28,34	38,29
	CNG/LNG(buss)	13,0	5,5	30,0

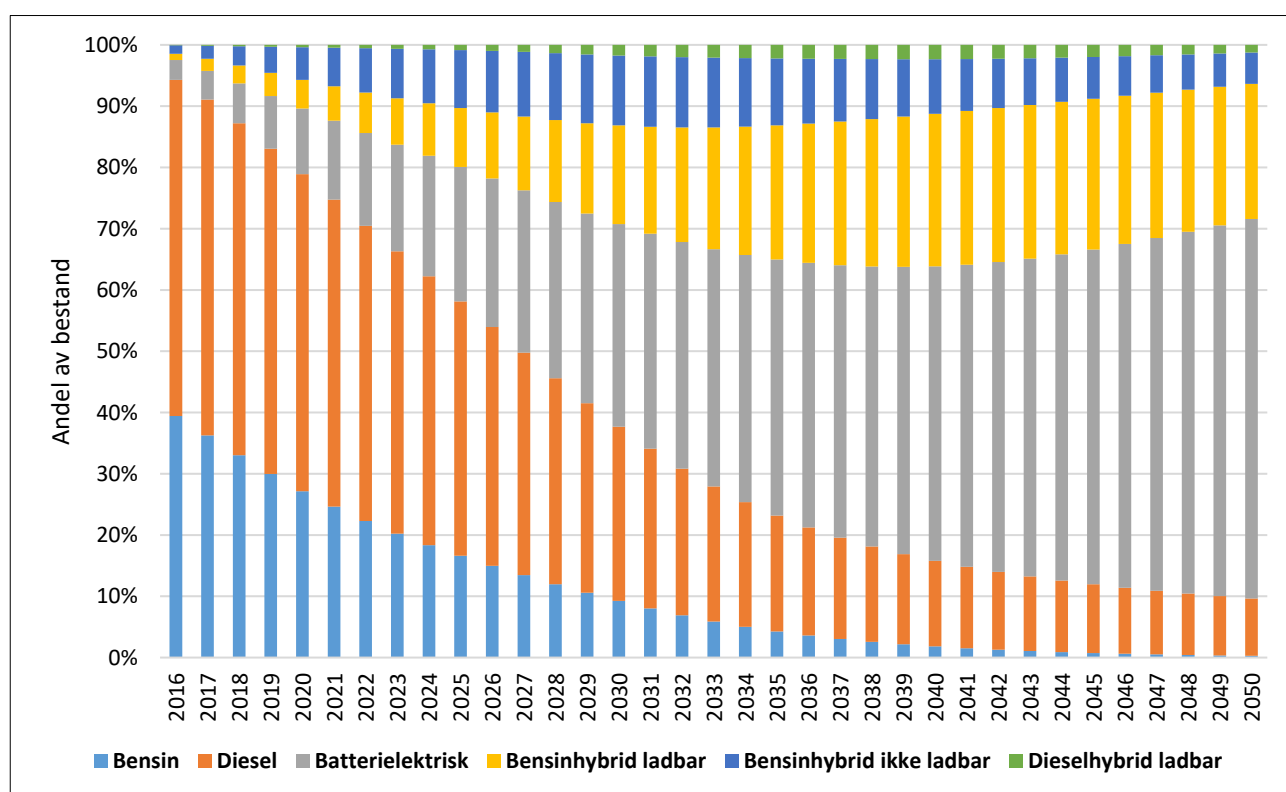


### 3.4 Betydning av kjøretøy og sjåfør

Med tanke på de ulike variablene som ligger til grunn for beregning av fart og energi, kan både kjørestil og kjøretøytype påvirke resultatet betraktelig. Derfor er det gjort en vurdering av hvordan parameterverdier påvirker beregningene. Det er også gjort et arbeid med å estimere en utvikling for kjøretøyparken.

#### 3.4.1 Kjøretøypark

Parallelt med SINTEF sitt prosjekt, har TØI gjennomført et prosjekt for å estimere sammensetning av fremtidens kjøretøypark, se Fridstrøm og Østli (2016) for utfyllende beskrivelse. Etter at denne rapporten ble ferdigstilt har det blitt gjort noen justeringer basert på perspektivmeldingen 2017 (Finansdepartementet, 2017). Blant annet ble det gjort en justering på tilgangen på nye kjøretøy, biodrivstoffandel og utslipp fra personbiler. Et trendscenarion kalt 'Hydrogeninnfasing' er estimert på grunn av forventet innovasjon i lastebilmarkedet. Bestandsutviklingen for personbiler er estimert som vist i figuren under.



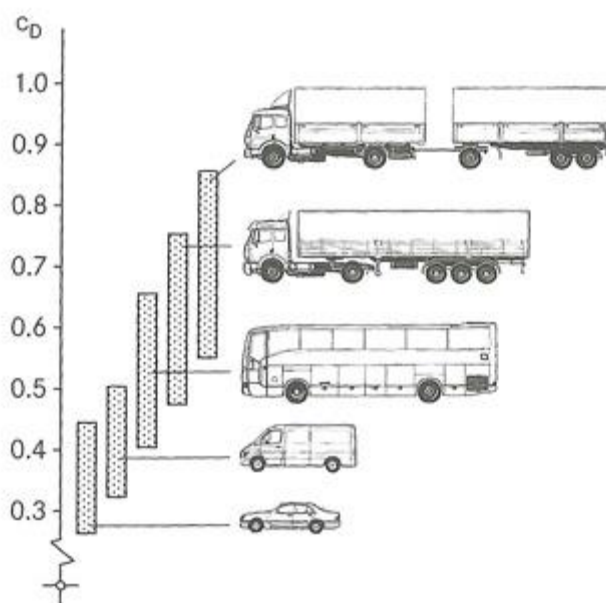
Figur 29: Framskriving av kjøretøypark for personbiler.

Når det gjelder kjøretøyparametere som gjennomsnittlig egenvekt, nyttelast og motoreffekt for de ulike kjøretøytypene som er definert i kjøretøyparken, er data fra Autosys brukt som grunnlag.

### 3.4.2 Betydningen av kjøretøyets egenskaper

Drivverkets egenskaper er utførlig behandlet i kapittel 3.3, og vil derfor ikke utdypes her. De øvrige relevante egenskaper ved kjøretøyet er vekt, aerodynamikk og friksjon mellom dekk og underlag. Vekten til kjøretøyet bestemmes som summen av egenvekt og eventuell nyttelast. Likeledes er frontarealet målbart. De resterende variabler som påvirker beregningene er koeffisienter for luft- og rullemotstand.

Koeffisienten for luftmotstand,  $C_d$ , er et uttrykk for kjøretøyets aerodynamiske evne. Et dråpeformet kjøretøy vil være mest hensiktsmessig, og resultere i en lav verdi på  $C_d$ . For vogntog vil det være uheldig med store sprang i høydeforskjeller mellom kabin og container, eller store mellomrom mellom containere. Eksempel på verdier for ulike kjøretøytyper er vist i figuren under.



Figur 30: Verdier for koeffisient for luftmotstand for ulike kjøretøytyper. Kilde: PART20 (2017).

Koeffisient for rullemotstand  $C_r$ , henger sammen med friksjon. En lav verdi indikerer at det er lite energi som kreves for at kjøretøyets hjul skal rulle fremover. Størrelser som hastighet, underlag, lufttrykk, og dekktemperatur påvirker  $C_r$ , men den er satt til å være konstant i beregningene, i tråd med Hellström (2007). Ifølge Pauwelussen (2014) er  $C_r$  mellom 0,01 og 0,02 for personbiler som kjører på veg, mens den kan være så lav som 0,005-0,006 for tunge kjøretøy, avhengig av kjøretøyets vekt og dekkets lufttrykk.

### 3.4.3 Betydningen av sjåføratferd

Det er flere måter sjåføren kan påvirke energibehovet på. Den største sjåførpåvirkede faktoren er bremsingen. Hvor mye bremsing som er nødvendig er igjen avhengig av fartsnivået. På kjøretøy uten regenerering av bremseenergi blir alt bremsearbeidet omformet til varme. (Med regenerering blir en viss andel av dette isteden lagret i et batteri, med et overføringstap bestemt ved virkningsgraden  $\eta_b$ .)

Fartsnivået vil også påvirke energitapet knyttet til luftmotstanden. Dette kommer frem i uttrykket for nødvendig effekt til fremdrift, hvor bidraget fra luftmotstanden øker med kvadratet av hastigheten:

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

Det totale forbruket er summen av den nødvendige fremdriftseffekten, sekund for sekund, og justert med virkningsgrader.

Verdien for akselerasjon påvirker også effekten, men sterk og kortvarig akselerasjon, eller lav og langvarig akselerasjon opp til et forutbestemt nivå påvirker ikke totalen. Og det endrer ikke drivstofforbruket hvis det skjer med samme virkningsgrad. Virkningsgradene blir her behandlet som konstanter, men dette kan endre seg med tilgang til bedre data om ulike drivlinjer, og blir derfor tatt med i sjåførprofilen.

Vekt, stigning, koeffisienter for rulle- og luftmotstand er alle faktorer som kan påvirkes på et strategisk nivå. Dette kan gjøres ved at sjåføren velger en rute med minst mulig stigning, kortere veg eller velger et kjøretøy med liten masse og gunstige betingelser for rulle- og luftmotstand.

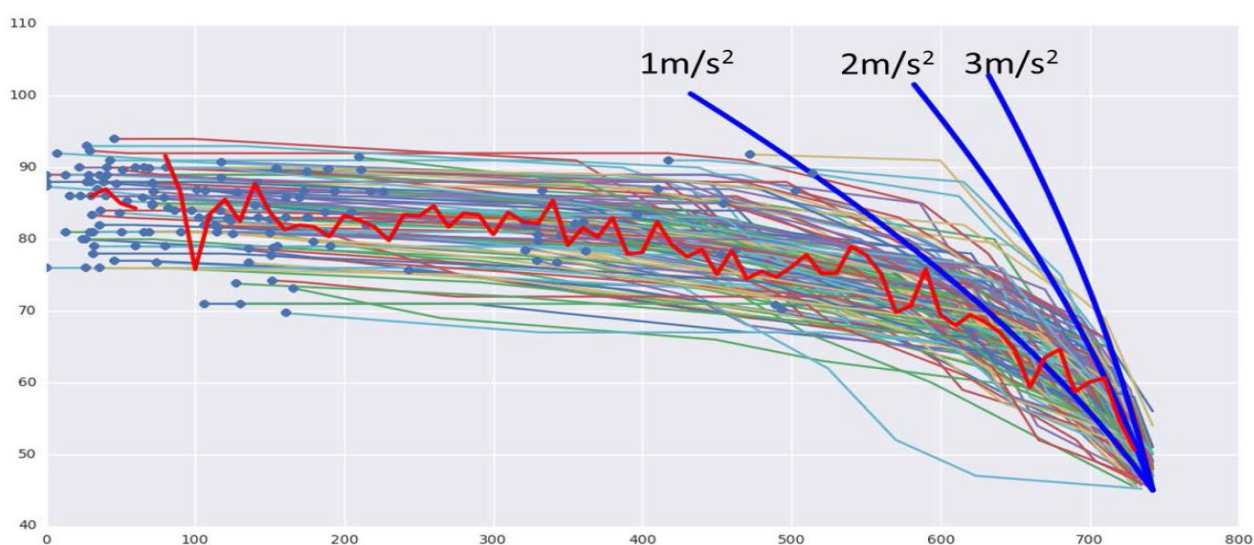
Ut over fartsnivået, er det kun bruk av bremses som kan påvirkes i beregningsmodellen. Rent modellteknisk skjer dette ved å sette verdier på parametre for retardasjon og planleggingshorisont. Disse styrer når fremdriftseffekt trappes ned og bremses kobles inn, og påvirker dermed energiforbruket. Verdier for akselerasjon er også tatt inn, siden vi venter at den får betydning for virkningsgraden senere.

For personbiler finnes det relevante kilder som kan benyttes for å tallfeste akselerasjon og retardasjon ved ulike kjørestiler. SINTEF gjennomførte i 2007 registreringer av akselerasjoner for tre forskjellige kjørestiler gjennom forskjellige konfigurasjoner av vegkryss (Berge, 2007). Akselerasjonen ble målt kontinuerlig gjennom hvert kryss. Verdiene for maksimal akselerasjon i hvert kryss er brukt til å beregne maksimumsverdi, minimumsverdi, gjennomsnitt og standardavvik. Det samme ble gjort for maksimal retardasjon i hvert kryss. Verdiene er oppgitt i Tabell 13.

Tabell 13: Verdier for gjennomsnitt, standardavvik, maksimum og minimum av maksimum akselerasjon og maksimum retardasjon for tre forskjellige kjøremåter (Berge, 2007).

Kjøremåte	Parameter	Gjennomsnitt	Standardavvik	Min	Maks
Eco-driving	Maks akselerasjon ( $\text{m/s}^2$ )	1	0,3	0,5	1,8
	Maks retardasjon ( $\text{m/s}^2$ )	1,9	0,6	1,1	3,5
Normal kjøring	Maks akselerasjon ( $\text{m/s}^2$ )	2	0,6	0,7	3,1
	Maks retardasjon ( $\text{m/s}^2$ )	2,1	0,8	0,8	3,9
Aggressiv kjøring	Maks akselerasjon ( $\text{m/s}^2$ )	3	1	1,5	6,5
	Maks retardasjon ( $\text{m/s}^2$ )	2,6	0,7	1,2	3,8

Parameteren planleggingshorisont kan være utfordrende å måle, fordi den antas å være situasjonsavhengig. For eksempel kan horisonten være lik sikt lengden ved kjøring på lavtrafikkert veg, mens den kan være lik avstanden fram til neste kjøretøy ved køkjøring. En nærliggende atferd ble sett nøyere på av Hjelkrem og Foss (2016), som undersøkte verdier for retardasjon i forbindelse med rampeutforming. Målinger med GPS inn mot kryss viste at sjåfører begynner å redusere farten flere hundre meter før krysset. Figur 31 viser fartsprofiler inn mot en oversiktlig rundkjøring. Her er det tydelig at det er en endring i atferd omtrent 200-300 meter før krysset, som kan indikere den horisontatferden som er implementert i beregningsmodellen.



Figur 31: Registrerte fartsprofil inn mot kryss. Hentet fra Hjelkrem og Foss (2016). Rød strek er gjennomsnittsfart. Blå tykke streker viser konstante retardasjoner på 1, 2 og 3  $\text{m/s}^2$ .

For tunge kjøretøy, som for eksempel busser og vogntog, er det ikke funnet tilsvarende målinger. Det er derimot tatt kontakt med ansvarlige for opplæring av kjøreskolelærere for tungbil-sertifikat ved Nord universitet. Resultatet av disse samtaler førte til en større innsikt i hvordan en sjåfør i et tungt kjøretøy tenker. Noen viktige momenter var:

- Lang planleggingshorisont: Tungbilsjåfører blir opplært til å forutse sine egne handlinger basert på den trafikksituasjon de til enhver tid befinner seg i. Dette gjør de for å unngå bruk av brems. En full stans, for eksempel i lyskryss, er svært lite ønskelig på grunn av den mengden med drivstoff som blir brukt ved oppstart. Derfor ble det sagt at en verdi på en tungbilsjåførs planleggingshorisont burde være på flere hundre meter. Dette medfører også at høye retardasjonsverdier forekommer sjeldent.
- Erfaring med kjøretøy og rute: Mye av dagens transport foregår på gjentakende ruter. Det vil si at en sjåfør ofte kjører den samme strekningen hver dag, og blir således godt kjent med den. Dermed blir sjåførens planleggingshorisont basert på vegutforming lang, slik at det er i praksis kun påvirkning av annen trafikk som kan føre til en mindre optimal fartsprofil.
- En verdi for akselerasjon, uansett kjørestil: Drivlinjen til tunge kjøretøy er utformet slik at ved lengre akselerasjoner er det små variasjoner på grunn av sjåføratferd. De aller fleste sjåfører bruker maksimalt tilgjengelige akselerasjon, og girkassen er designet slik at motoren fungerer i optimalt bruksområde ved slike akselerasjonsverdier. Dermed er det kun kjøretøyspesifikke variabler som for eksempel lastvekt som begrenser akselerasjonen. Det ble ikke nevnt noen typiske verdier i  $\text{m/s}^2$  for akselerasjon.
- Helst unngå bruk av bremsepedal: All bruk av brems er direkte tap av energi, som videre betyr tapte penger for eierne. Derfor blir mange sjåfører oppfordret til å ikke bruke brems hvis det ikke er strengt nødvendig. De aller fleste kjøretøy er utstyrt med motorbrems og/eller retarder, og de blir hyppig brukt i stedet for konvensjonelle brems.
- Fartssperre: Alle tunge kjøretøy skal være utstyrt med fartssperre, jamfør Kjøretøyforskriften § 47-1 (1994). Fartssperrene er i praksis en innretning som hindrer bruk av gasspedalen dersom farten er for høy. Den forhindrer derimot ikke kjøretøyet å komme opp høy fart i nedoverbakker. Fartssperren skal være satt på 90 km/t for gruppe N2 (lett lastebil) og N3 (tung lastebil), men settes på 85 km/t dersom maksimal toleranse ikke er oppgitt eller verkstedet ikke har fartssimulator. Fartssperren skal være innstilt på 100 km/t for gruppe M2 (liten buss) og M3 (stor buss).

Det er mulig å modellere el-drift med beregningsmodellen, både for lette og tunge kjøretøy. I en slik sammenheng er rolig og moderat akselerasjon gunstig, fordi en mindre andel av energien går tapt, jamfør kapittel 3.3.1.2. Derfor kan en anta at verdiene på parameterne f.eks. for en øko-sjåfør påvirkes av kjøretøytypen.

### 3.5 Håndtering av forsinkelse i kryss og andre flaskehalser

Som beskrevet av Levin m.fl. (2015) kan kryssforsinkelser grupperes i forsinkelser som skyldes den geometriske utformingen til krysset, og forsinkelser knyttet til annen trafikk. Dersom et kjøretøy kjører gjennom et kryss uten å bli påvirket av andre kjøretøy, er det kun den geometriske utformingen av krysset som virker begrensende på fartsvalget. En eventuell påvirkning av andre tilstedeværende kjøretøy vil føre til en ytterligere begrensning på fartsvalget.

I beregningsmodellen blir forsinkelser på grunn av geometrisk utforming tatt hensyn til ved at det beregnes en sluttradius på innkommende lenke, som tilsvarer vinkelendringen gjennom krysset fordelt på en bue lik med vegbredden.

Håndtering av forsinkelser på grunn av trafikk i kryss og flaskehalser er mer komplisert å inkludere i beregningene. Trafikkavviklingsforhold og kødannelser i vegnettet har sammenheng med ulike former for flaskehalser. Ofte er det kryss nedstrøms på veglenkene som utgjør slike flaskehalser, gjerne i kryss der flere lenker samles og spres ut. Kapasitetsproblemer kan imidlertid også oppstå i bratte stigninger eller krappe kurver, og tunge kjøretøy kan fungere som bevegelige flaskehalser. Forsinkelser på grunn av flaskehalser er i prinsippet inkludert i formlene presentert i kapittel 3.2, men det er ikke gjort noen differensiering på type flaskehals. Dette er et mulig tema for videre utvikling.

I dette prosjektet har det ikke vært tilstrekkelig datagrunnlag til å estimere forsinkelser på grunn av trafikk i kryss, utover det som er presentert i Levin m.fl. (2015). Det er likevel viktig å understreke at bruk av fartsberegningene i andre sammenhenger må gjøres med forsiktighet. Dette på grunn av faren for å overestimere forsinkelse i kryss, for eksempel ved å inkludere både den beregnede forsinkelse på grunn av geometri og en verdi for trafikal forsinkelse i en eventuell etterbehandling av data.

## 4 Frittstående beregningsmodul

For at de samme fartsberegningene skal være tilgjengelige fra flere steder, er de samlet i et programmeringsbibliotek som fungerer som en frittstående beregningsmodul. Dette kapittelet gir en beskrivelse av beregningsmodulen, og de praktiske tilnærminger som er gjort for å kunne implementere metodikken fra kapittel 3.

Modulen er utviklet i C#, og kan benyttes på flere ulike måter. Den kan inkluderes i andre .Net-programmer, og alle funksjoner i beregningsmodulen kan da benyttes direkte (som for eksempel TNext gjør). Den kan kjøres som et kommandolinjeverktøy med input- og output-filer fra hvilket som helst Windows-program, og den kan kjøre sin egen HTTP-server, slik at hvilket som helst program kan sende og motta data gjennom et vanlig REST-API. På denne måten kan modulen også kjøre på en server, og være tilgjengelig via intranett/internett. REST-API-et støtter først og fremst XML, men har også en nesten ferdigutviklet støtte for JSON. I tillegg kan beregningsmodulen kjøres gjennom et eget brukergrensesnitt som er utviklet for å teste modulen. Dette brukergrensesnittet leser ruter i JSON-format (eksportert fra TNext), og lar brukeren velge fartsmodell, kjøretøy og mange av innstillingene som er tilgjengelige i modulen. Et eksempel på en kjøring ved hjelp av brukergrensesnittet er vist i Figur 32.

Modulen inneholder forhåndsdefinerte enkeltkjøretøy (kan tilpasses for ulike beregninger), forhåndsdefinisjoner av kjøretøyparker (ulike kjøretøy, og hvor mange prosentandeler av den totale kjøretøyparken de utgjør i årene fremover), fartsmodeller (fartsmodellen for lette fra dette prosjektet, samt en fartsmodell for tunge kjøretøy fra Tørset m.fl. (2011)), og standardisert funksjonalitet for å sørge for at farten fra fartsmodellene er realistisk med tanke på vegegenskaper og hvor mange kjøretøy som befinner seg på vegen (som beskrevet i kapittel 2).

Uansett hvordan modulen kjøres, så trenger den én eller flere veglenker, og en kjøretøydefinisjon eller en kjøretøypark (avhengig av kjøremåte).

Dersom beregningen kjøres med en kjøretøypark, vil de fire beregningsstegene (se kapittel 2.1) gjentas for hvert kjøretøy. Dersom det i tillegg er en årsutvikling på kjøretøyparken, vil beregningen også bli gjentatt for hvert år det bestilles resultat for.





Figur 32: Eksempel på resultater fra en manuell kjøring av fartsmodulen (gjennom brukergrensesnittet). Helt øverst viser oppsummerende resultater. Deretter følger to grafer som viser farts- og energieresultatene, og veigeometrien. Nederst viser lenkene og lenkesegmentene som ruten ble delt opp i, og detaljerte resultater for hver av dem, samt en del teknisk informasjon om beregningen.



#### 4.1 Implementering av fartsmodell for lette kjøretøy

Fartsmodellene over er ikke definert for alle vegtyper. For eksempel er det ikke grunnlag nok, eller godt nok datagrunnlag, til å estimere en egen fartsmodell for envegskjørt veger eller veger med fartsgrense 30 km/t. Vi definerer her *#tot\_felt* til å være totalt antall felt på vegen, det vil si summen av antall felt i begge kjøreretninger. For å modellere de vegtypene hvor datagrunnlaget er utilstrekkelig valgte vi derfor å utvide definisjonen av fartsmodellen på følgende måte:

- 1 felt i kjøreretningen (uavhengig om det er kjørefelt imot eller ikke) og fartsgrense  $x_g$  større enn 60 km/t:

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

$$C(70) = 71$$

$$C(80) = 82$$

$$C(x_g) = x_g \text{ dersom } x_g > 80$$

$$U(x_d, x_s, x_f, x_k) = 2 * \beta_d(x_d / \#tot\_felt - 4) + \beta_s x_s + \beta_f x_f + \beta_{kk} x_k^2 + \beta_k x_k + \beta_{sk} x_s x_k + \beta_{fk} x_f x_k$$

$\beta$ -parametrene er som definert i Tabell 2.

- $n$  felt i kjøreretningen,  $n > 1$ , og fartsgrense  $x_g$  større enn 60 km/t:

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

$$C(70) = 76$$

$$C(80) = 85$$

$$C(90) = 96$$

$$C(100) = 103$$

$$C(x_g) = x_g \text{ dersom } x_g > 100$$

$$U(x_d, x_s, x_f, x_k) = 4 * \beta_d(x_d / \#tot\_felt - 4.75) + \beta_s x_s + \beta_f x_f$$

$\beta$ -parametrene er som definert i Tabell 4.

- $n$  felt i kjøreretningen,  $n \geq 1$ , og fartsgrense 50, 60 km/t:

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

$$C(50) = 52$$

$$C(60) = 61$$

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

Der  $\beta$ -parametrene er som definert i Tabell 3.

- $n$  felt i kjøreretningen,  $n \geq 1$ , fartsgrense mindre enn 50 km/t:

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

$$C(x_g) = 52 \text{ for alle } x_g$$

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

Der  $\beta$ -parametrene er som definert i Tabell 3.

I tillegg innføres det følgende to begrensninger i den implementerte modellen:

1. Ingen fartsverdier under 5 km/t. For ekstreme parameterverdier (gjærne utenfor dataområdet), kan usannsynlig lave fartsverdier returneres fra modellen. Derfor er det som i den gamle fartsmodellen satt en nedre grense på 5 km/t.
2. Ingen feltbredde over 5 m. Feltbredde i den implementerte modellen regnes ut som dekkebredde delt på antall felt. I datagrunnlaget er det registrert svært få målinger utenfor dette området, og som nevnt tidligere er denne parameteren forbundet med mye usikkerheter. For å forhindre usannsynlig høye fartsverdier antar vi derfor at en feltbredde ikke kan være høyere enn 5 meter. I tilfeller hvor vi får oppgitt en feltbredde høyere enn 5 meter brukes 5 meter.

Logikken her består i å gjenbruke de estimerte matematiske sammenhengene så mye som mulig (og så riktig som mulig) for vegtyper som ikke er med i datagrunnlaget. For å kunne gjøre dette har vi i formelverket over dividert dekkebredde på antall felt. Dette gir oss muligheten til å overføre også denne parameteren til andre feltyper (for eksempel 1-feltsveger eller 3-feltsveger). Formelverket er i denne versjonen delt opp i 4. Den første av formlene over tar for seg alle veger som har ett felt i kjøreretningen og en fartsgrense på 70 km/t eller mer. Den andre formelen tar for seg alle veger med mer enn ett felt i kjøreretningen og en fartsgrense på 70 km/t eller mer. Disse to formlene definerer dermed en fartsmodell for alle veger med fartsgrense 70 km/t eller mer. Den tredje formelen over tar for seg alle veger (det vil si alle feltyper) med fartsgrense 50 eller 60 km/t, og den siste (og fjerde) formelen tar for seg alle veger med en fartsgrense mindre enn 50 km/t. I den fjerde formelen brukes fartsgrensen som fartsmodell med mindre en tilsvarende veg-geometri i en 50 km/t-sone ville gitt en fart mindre enn denne fartsgrensen. De to siste formlene definerer dermed en fartsmodell for alle veger med en fartsgrense mindre enn 70 km/t.

## 4.2 Tilrettelegging for bruk av VDF i RTM

Steg 3 i beregningsmetodikken er å justere for fart gitt at det finnes informasjon om trafikkmengde (se Figur 8). Trafikkmengde vil i mange tilfeller være informasjon som er produsert i RTM, og derfor er det gjort forsøk på å implementere resultatene fra kapittel 3.2 i RTM. Implementasjonen er beskrevet videre i dette kapittelet.

Av transportmodellhensyn ønsker man at farten er avhengig av etterspurt trafikk også etter sammenbrudd, men denne avhengigheten finnes det ingen mulighet for å si noe om fra

datamaterialet. En versjon av VDF-kurvene ble implementert i en testversjon av RTM, der kravet om en strengt avtagende kurve også etter sammenbrudd ble tilfredsstilt på følgende måte. I denne versjonen defineres  $v_s(x) = V_l(x)$ , det vil si vi lar farten være avhengig av etterspurt trafikk også etter sammenbrudd. Nærmere bestemt *definerer* vi

$$V_l(x) = \begin{cases} V_l & \text{for } 0 \leq x < x_{50} \\ (V_l - C)e^{\omega(x_{50}-x)} + C & \text{for } x_{50} \leq x, \end{cases}$$

der  $C$  er konstanten gitt i Tabell 5 og hvor  $V_l$  og  $x_{50}$  er gitt i Tabell 14. Denne formen antar at gjennomsnittsfarten ved et sammenbrudd før det er 50 % sannsynlighet for sammenbrudd er konstant og lik  $V_l$ . For etterspurt trafikk med over 50 % sannsynlighet for sammenbrudd brukes en eksponentielt avtagende kurve med parameter  $\omega$  for farten ved sammenbrudd. Parameteren  $\omega$  brukes til å justere hvordan halen avtar etter sammenbrudd, og legg merke til at den eksponentielle formen etter sammenbrudd også ble brukt i estimeringen av VDF-kurvene gitt i Tabell 5 og Figur 20. For å kunne definere VDF-kurver for alle vegtyper utvidet vi de allerede definerte VDF-kurvene som vist i Tabell 14. Denne tabellen brukes på følgende måte. Først skaleres trafikkmengden for antall felt i kjøreretningen, se kolonne 2. Det vil si, dersom trafikkmengden er  $x$  regnes størrelsen  $\tilde{x}$  ut ifra formelen i kolonne 2, og det er trafikkmengden  $\tilde{x}$  som i andre steg brukes inn i det etablerte formelverket. På denne måten får vi ut kapasitetskurver også for situasjoner med mer enn 2 felt i kjøreretningen.

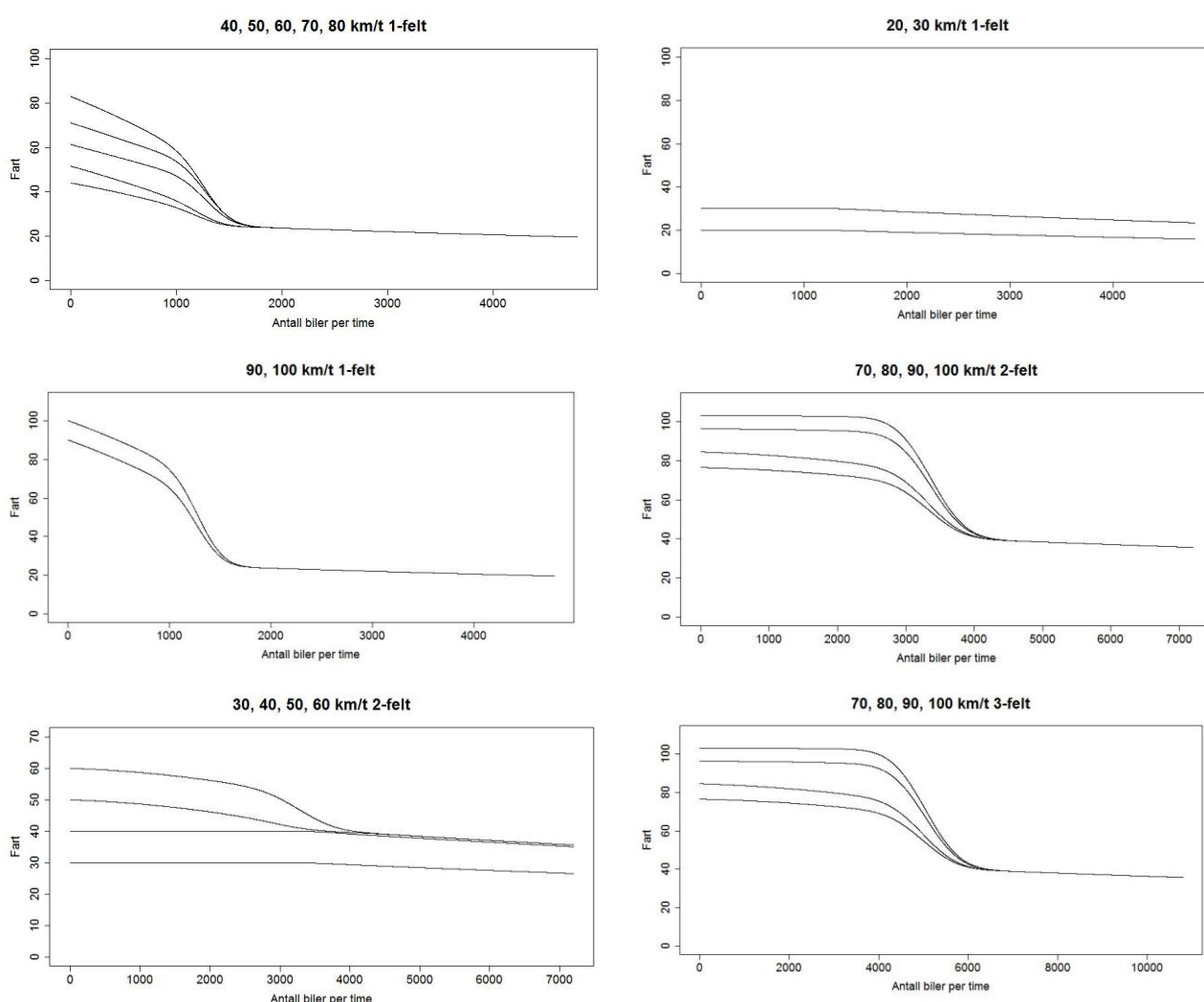
Tabell 14: Utvidet VDF-definisjon for alle vegtyper.

Farts- grense $x_g$	Antall felt i kjøre- retning	Skalering av trafikkmengde	$a$	$b$	$c$	$C$	$\omega$	$V_l$	$x_{50} / \mu$	$\sigma$
$\leq 30$	1	$\tilde{x} = x$	$x_g$	0	0	4.2	0.001	$x_g$	110	16.5
40	1	$\tilde{x} = x$	44.0	-0.103310	-0.000295	4.2	0.001	26.65	110	16.5
50	1	$\tilde{x} = x$	51.6	-0.162246	-0.000216	4.2	0.001	26.65	110	16.5
60	1	$\tilde{x} = x$	61.3	-0.153406	-0.000020	4.2	0.001	26.65	110	16.5
70	1	$\tilde{x} = x$	71.1	-0.186902	-0.000030	4.2	0.001	26.65	110	16.5
80	1	$\tilde{x} = x$	82.9	-0.230052	-0.000487	4.2	0.001	26.65	110	16.5
$\geq 90$	1	$\tilde{x} = x$	$x_g$	-0.230052	-0.000487	4.2	0.001	26.65	110	16.5
$\leq 40$	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	$x_g$	0	0	7.1	0.0005	$x_g$	280	33.5
50	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	50	-0.009279	-0.000082	7.1	0.0005	40.65	280	33.5
60	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	60	-0.009279	-0.000082	7.1	0.0005	40.65	280	33.5
70	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	76.4	-0.009279	-0.000082	7.1	0.0005	40.65	280	33.5
80	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	84.4	-0.013259	-0.000092	7.1	0.0005	40.65	280	33.5
90	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	96.1	-0.000000	-0.000030	7.1	0.0005	40.65	280	33.5
100	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	102.9	-0.000000	-0.000014	7.1	0.0005	40.65	280	33.5
$\geq 110$	$n (n > 1)$	$\tilde{x} = x * (2/n)$	$x_g$	-0.000000	-0.000014	7.1	0.0005	40.65	280	33.5

Med andre ord, for en trafikkmengde  $x$  regnes skalert trafikkmengde  $\tilde{x}$  ut, og videre beregnes farten  $\hat{v}(\tilde{x})$  ut ved formelen

$$\hat{v}(\tilde{x}) = \hat{p}(\tilde{x})v_s(\tilde{x}) + (1 - \hat{p}(\tilde{x}))v_h(\tilde{x}),$$

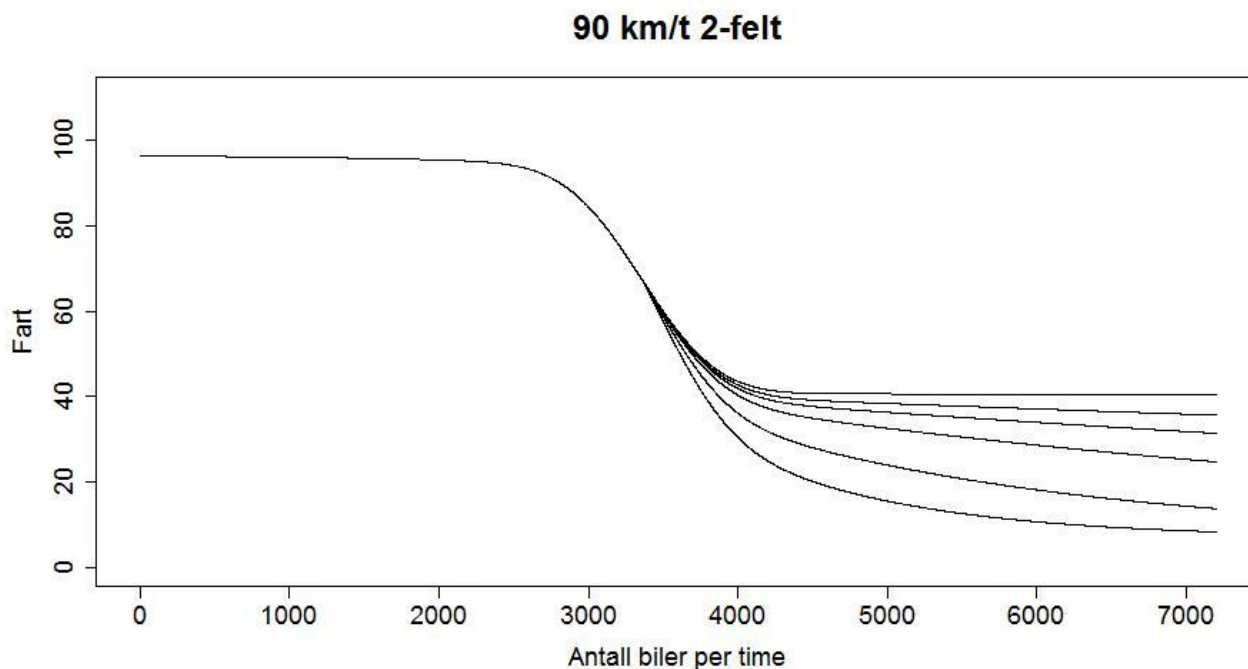
der formen på  $\hat{p}(\tilde{x})$ ,  $v_s(\tilde{x})$  og  $v_h(\tilde{x})$  som funksjon av antall felt og fartsgrense er gitt i Tabell 14. Eksempler på hvordan disse VDF-kurvene ser ut, er vist i Figur 33. Merk at i disse figurene er mengden trafikk skalert opp til per time (i motsetning til per 5 min), for bruk inn mot RTM og for sammenligning med tidligere definerte kurver.



Figur 33: Eksempler på implementerte kapasitetskurver. Sammenlign spesielt plot nummer 4 og 6 i denne figuren hvor skaleringen opp til flere enn 2 felt i kjøreretningen illustreres.

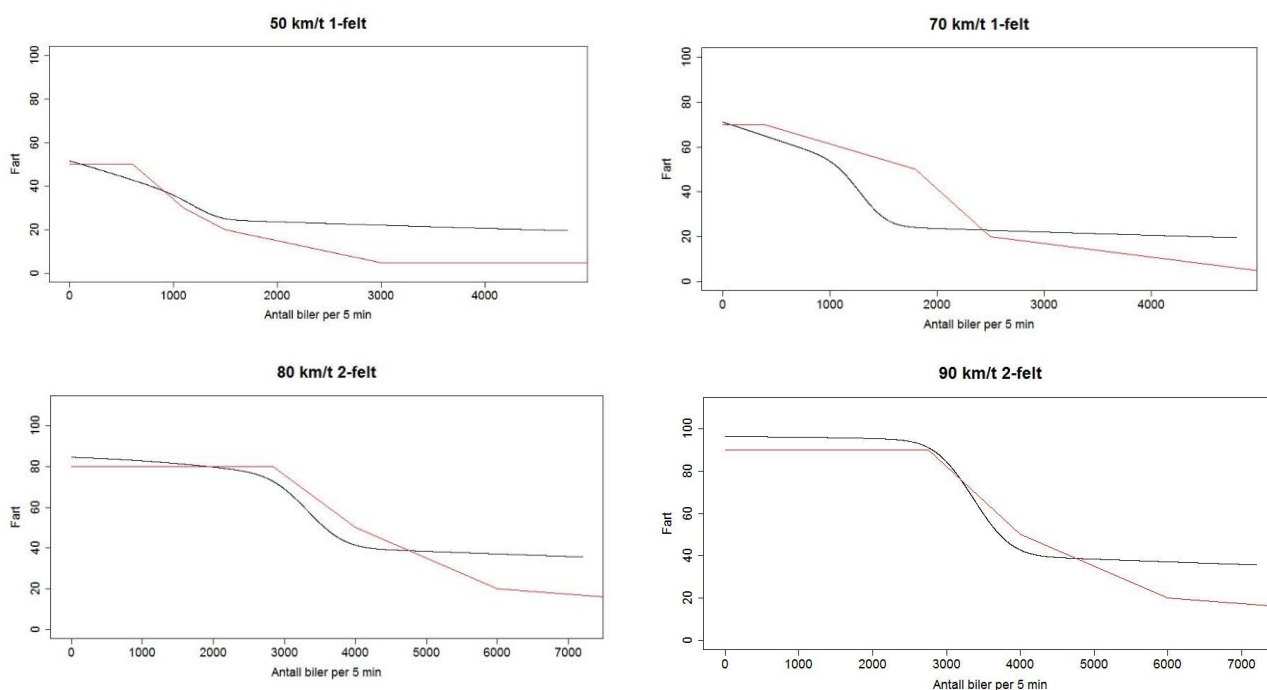
Som sagt er halen på disse kurvene avhengig av valget man gjør for  $\omega$ . Dersom man på et senere tidspunkt finner en metode for datainnsamling av fart som funksjon av etterspurt trafikk etter sammenbrudd kan man tenke seg å estimere  $\omega$  fra dette datagrunnlaget. Her kan data fra

mikrosimuleringer være aktuelt å bruke. Se Figur 34 for eksempler på kapasitetskurver for ulike verdier av  $\omega$  for fartsgrense 90-km/t og med 2 felt i kjøreretningen.



Figur 34: VDF-kurver for 90 km/t med 2 felt i kjøreretningen for ulike valg av  $\omega$ . Fra den øverste til nederste kurven er verdien på  $\omega$  lik 0, 0.0005, 0.001, 0.002, 0.005 og 0.01.

Disse kurvene kan sammenlignes med de som er implementert i RTM i dag, se Figur 35 for eksempler på dette.



Figur 35: Nye kurver plottet mot gamle kurver

## 5 Oppsummering og mulige tema for videreutvikling

I rapporten er det dokumentert utviklingen av beregningsmodellen fra slik den fremstod i etterkant av arbeidet gjort av Levin m.fl. (2015), frem til en selvstendig beregningsmodul. I løpet av denne tiden er det kjørt flere faglige metodeutviklingsløp, både fartsmodell for lette, kjøretøyparametere, korreksjon for trafikkbelastning, energi- og utslippsberegninger og kryssforsinkelser. Kalibreringene viser at beregningsresultatene er lovende, men det er også påvist flere utfordringer underveis som bør være tema for videre forskning og utvikling.

Den mest åpenbare utfordringen er tilgjengelighet på trafikkdata. Flere av resultatene er beregnet med utgangspunkt i empiriske data. Det vil si at gyldighetsområdet ikke uten videre kan utvides til å omfatte andre situasjoner enn de som er gjeldende for datagrunnlaget. Det innebærer at en fremtidig datainnsamling bør inkludere data fra tellepunkt på veier med mer variert horisontal- og vertikalkurvatur og andre vegtyper enn de som er beskrevet i denne rapporten, i tillegg til data om vær- og føreforhold. Samtidig bør det samles inn data om fartsprofiler fra enkeltkjøretøy, helst med overlappende tidsperioder med tellepunkt-data, for å undersøke videre sammenheng mellom fartsprofiler og trafikkvolum.

Energiforbruk beregnes basert på karakteristika ved kjøretøypark (bl.a. energibærer og vektklasse) utarbeidet av TØI. Kjøretøyparametere er hentet fra Autosys der det har vært mulig. I tillegg trengs noen mer spesifikke kjøretøyparametere for å få til en mest mulig riktig beregning av energibruk. Her bør det gjøres mer arbeid for å finne representative parametere for de kjøretøytypene (ca. 80) som er tatt inn i modellen for beregning av energiforbruk og utslipp.

I sammensetningen av kjøretøypark er ikke inndeling i Euro-klasser tatt inn. En utarbeidelse av andel kjøretøy i ulike Euro-klasser for kjøretøytypene i kjøretøyparken ville gitt et bedre grunnlag for å beregne riktig energiforbruk og utslipp.

NOx-utslipp regnes ut som beskrevet i kapittel 3.3.2.2. Det er mulig å ta i bruk mer detaljerte modeller (fra EEA eller HBEFA), som bl.a. håndterer ulikheter mellom Euro-klasser, for å få en mer nøyaktig beregning av NOx-utslipp.

Nedstrøms påkjøringsramper er trolig årsak til køproblemene for en del av de tellepunktene som er behandlet i kapittel 3.2. Mange typer flaskehalser vil trolig ikke være representert blant de analyserte tellepunktene. En interessant løsning kunne være å erstatte dagens kjørefeltbaserte kapasitetsangivelser i RTM med flaskehalsbaserte kapasitetstall. Aktuelle flaskehalser bør i så fall kunne identifiseres ved hjelp av vegnettsdata og de aktuelle kapasitetsgrensene må kunne fastlegges ved hjelp av tilgjengelige registreringer og litteratur. I denne omgang er det lagt opp til å erstatte dagens VDF-kurver med et formelverk for beregning av fart på overbelastede lenker, basert på egenskaper ved lenken, som vist i kapittel 3.2. På lengre sikt er det ønskelig å få utviklet en metodikk for mer realistisk beregning av fart og reisetid på overbelastede lenker med flaskehalser

nedstrøms. I en slik metodikk må en prøve å fange opp mekanismene i flaskehalser og kø på en bedre måte enn dagens VDF-kurver, herunder forhold som kødannelse ved overbelastning, køforplantning på lenkene, tilbakeblokkering i vegnettet og oppløsning av kø.

De strategiske transportmodellene (bl.a. RTM) er statiske i den forstand at de forutsetter at systemet er stabilt over aktuelle beregningsintervaller, for eksempel for et helt døgn eller en rushtidstime. Det vil være en utfordring å utvikle en god metodikk for behandling av overbelastning med utvikling og oppløsning av kø i denne typen modeller. Dette vil imidlertid være avgjørende for gode analyser i byområder.



## 6 Referanser

- Arnesen, P. og Hjelkrem, O. A. (2017): An Estimator for Traffic Breakdown Probability Based on Classification of Transitional Breakdown Events. Transportation Science.
- Berge, T. (2007): Measurements of driving patterns in crossings and roundabouts. SINTEF
- Dimaiuta, M., E. Donnell, et al. (2011). Modeling Operating Speed. Transportation Research CIRCULAR EC151. Washington DC, Transportation Research board.
- EMEP, EEA. (2016). EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. European Environment Agency, Copenhagen.
- Finansdepartementet (2017): Perspektivmeldingen 2017 (St. meld. nr. 29, 2016-2017). Oslo.
- Franco, V., F. Posada, J. German, and P. Mock. (2014): Real-world exhaust emissions from modern diesel cars: A meta-analysis of PEMS emissions data from EU (Euro 6) and US (Tier 2 Bin 5/ULEV II) diesel passenger cars (Part 1: Aggregated results). Washington: international Council on Clean transportation (iCCT). International Council on Clean Transportation Europe (ICCT), Berlin, Germany.
- Fridstrøm, L og Østli, V. (2016): Kjøretøyparkens utvikling og klimagassutslipp. Framskrivinger med modellen BIG. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Hagman, R., K.I. Gjerstad, and A.H. Amundsen. (2011): NO<sub>2</sub> utslipp fra kjøretøyparken i norske storbyer. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Hellström, E. (2007): Look-ahead Control of Heavy Trucks utilizing Road Topography. PhD-avhandling no. 1319, Linköpings universitet.
- Hjelkrem, O. A. og Arnesen, P. (2017): The effect of heavy vehicles on breakdown probability curves in peak hour traffic. I review-prosess.
- Hjelkrem, O. A. og Foss, T. (2016): Rampeutforming og retardasjon. SINTEF-rapport A27792. SINTEF. Trondheim.
- Hjelkrem, O. A., (2015): Determining Influential Factors on the Threshold of Car-Following Behavior. Presented at 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Kjøretøyforskriften (1994): Forskrift om tekniske krav og godkjenning av kjøretøy, deler og utstyr av 4. oktober 1994.
- Kroksæter, A., Straume, A., Thorenfeldt, U. K., Hjelkrem, O. A. (2015): Kjøretøybaserte beregninger av fart, drivstofforbruk og utslipp. SINTEF-notat. Datert 29.06.2015 (Fortrolig dokument).
- Lee, S., Chung, Y. (2001): A Bayesian Approach to Detecting Outliers Using Variance-Inflation Model. The Korean Communications in Statistics, 8(3), ss. 805-814.

- Levin, T. og Sund, A.B. (2013): Empirical study of energy consumption of electric vehicle taxis. SINTEF-rapport A24357. SINTEF. Trondheim.
- Levin, T., Tørset, T., Malmin, O. K., og Rennemo, O. (2015): Data og metoder for modellering av biltrafikkens fart i transportmodeller. SINTEF-rapport A26649. SINTEF. Trondheim
- May, A. D. (1990): Traffic Flow Fundamentals. Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ.
- Marinelli, G., Bysveen, M., Pitera, K. og Rennemo, O. (2017): Operating speed prediction models comparison: A case study for Norwegian two-lane rural roads. I review-prosess.
- Miljødirektoratet (2015): Nasjonale standardfaktorer, datert 24. februar 2015.
- Nordtømme, M., Moen, T., Dahl, E., Hjelkrem, O. A. og Arnesen, P. (2016): Evaluering av automatisk fartstilpasning (ISA) i Statens vegvesen. SINTEF-rapport A27040. SINTEF. Trondheim.
- PART20 – Platform for Aerodynamic Road Transport (2017). Aerodynamics. <http://www.part20.eu/en/background/aerodynamics>
- Pauwelussen, J. (2014). Essentials of vehicle dynamics. Butterworth-Heinemann.
- Rise, T., Sund, A. B., Bertelsen, D., Skoglund, K. A. m.fl. (2016): Transportløsninger mellom Tromsdalen og Verdal Havn. SINTEF-rapport SBF2016A0092. SINTEF. Trondheim.
- Tørset, T., Aakre, A., Børnes, V. og Rennemo, O. (2011): Fartsmodell for næringslivets transporter. Datagrunnlag og dokumentasjon av modell. SINTEF-rapport 17524. SINTEF. Trondheim.
- US Department of Energy (2016a): Comparison of Fuel Cell Technologies. <http://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>
- US Department of Energy (2016b): Lower and Higher Heating Values of Hydrogen and Other Fuels. <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/lower-and-higher-heating-values-hydrogen-and-other-fuels>
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., Ye, K. (2007): Probability & Statistics for Engineers & Scientists. Pearson International Edition, New Jersey.
- Weber, C., R. Hagman, and A.H. Amundsen. (2015): Utslipp fra kjøretøy med Euro 6/VI-teknologi. Resultater fra måleprogrammet i EMIROAD 2014. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Weiss, M., P. Bonnel, R. Hummel, A. Provenza, and U. Manfredi. (2011): On-road emissions of light-duty vehicles in Europe. Environmental science & technology. 45:8575-8581.
- Yi, J. og Horowitz, R. (2006): Macroscopic traffic flow propagation stability for adaptive cruise controlled vehicles. Transportation Research Part C 14 (2006), ss. 81–95



Teknologi for et bedre samfunn

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