

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift  
**Udvalgte artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet**  
(Selected Proceedings from the Annual Transport  
Conference at Aalborg University)  
ISSN 1903-1092

[www.trafikdage.dk/artikelarkiv](http://www.trafikdage.dk/artikelarkiv)

Modtaget: 17.09.2014

Godkendt: 07.02.2017



## Energieffektiv fartpilot – et forprojekt

Lars Bolet, [bolet@civil.aau.dk](mailto:bolet@civil.aau.dk)

Trafikforskningsgruppen, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet

Erik Kjems, [ekj@civil.aau.dk](mailto:ekj@civil.aau.dk)

Trafikforskningsgruppen, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet

Darius Plausinaitis, [darius@gfix.dk](mailto:darius@gfix.dk)

---

### Abstrakt

Muligheder for at beskrive en hastighedstilpasningsstrategi, som er energieffektiv under hensyntagen til det aktuelle køretøj og den aktuelle vejstrækning, og som kan anvendes i en fartpilot, er vurderet gennem teoretiske overvejelser og ved computersimulering og kørselsforsøg på én vejstrækning. Resultatet er lovende, men viser også udfordringer og behov for yderligere udviklingsarbejde og praktiske forsøg.

---

### Indledning

Transportsektoren er en betydelig energiforbruger. Transporten står for ca.  $\frac{1}{3}$  af det danske energiforbrug (Hethey, Kofoed-Wiuff, & Lindboe, 2011). Ydermere forbruger transporten især fossile brændstoffer. Derfor bidrager sektoren også væsentligt til uønsket miljøpåvirkning. Ifølge Energistyrelsen er det 31 % af Danmarks CO<sub>2</sub>-udledning og tilsvarende andele af de øvrige forbrændingsemissioner. Med til billedet hører, at 78 % af person og godstransporten i Danmark finder sted på vejene (Energistyrelsen, n.d.). Disse forhold beror på bosætningsmønstre og erhvervslokalisering. De forudsætninger ændrer sig næppe; de udgør rammevilkår for udfordringerne med at reducere transportsektorens energiforbrug og emissioner i Danmark. Dermed forklarer de også, at centrale tiltag ikke i afgørende omfang formår at udvirke den ønskede energiomstilling i sektoren. I stedet må der tilvejebringes incitamenter og værktøjer, så borgere og virksomheder kan bidrage uden herved at pådrage sig en ekstra byrde.

Situationen er ikke speciel dansk, og overalt er der interesse for at optimere transportens brændstofforbrug. Groft sagt falder de strategier, der benyttes, i to kategorier. Teknologisk søges køretøjerne gjort mere energiritige: Ved brug af nye materialer reduceres køretøjets vægt, ved bedre formgivning reduceres

#### Forprojektets organisering og finansiering

Trafikforskningsgruppen ved Aalborg Universitet søgte sammen med Arla Foods AS og Dancar Trafikministeriet om tilskud fra 2011-puljen til forsøg med energieffektive transportløsninger til udvikling af en energieffektiv fartpilot. Trafikstyrelsens Center for Grøn Transport besluttede at give Trafikforskningsgruppen ved Aalborg Universitet tilskud til et mindre forprojekt, der skulle afklare usikkerheder og potentialer i det oprindeligt ansøgte projekt.

Projektet er afsluttet i 2013. (Kjems, Bolet, Plausinaitis, & Staunstrup, 2013).

vindmodstanden, ved bedre motorudformning optimeres virkningsgraden etc. Operationelt søges køretøjernes brug gjort mere energieffektiv gennem transportplanlægning og trafikledelse og ved at påvirke den adfærd, der styrer kørslen. Den fartpilot, forprojektet sigter mod, anviser en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi. Fartpiloten hører altså til den operationelle kategori.

Udfordringerne med at udvikle muligheder for bedre energiudnyttelse i transportsektoren beskrives fra forskellige ståsteder, blandt andet med udgangspunkt i køretøjet, miljøet og transporten, og med de respektive forskningsfelters modelværktøjer. Eksempelvis er modellerne i en litteraturgennemgang, (Song, Yu, & Wang, 2009), rubriceret og karakteriseret i tre grupper:

1. Modeller, der beskriver køretøjsteknologien, forudsiger det pågældende køretøjs brændstofforbrug præcist. Da kraftoverførslen simuleres i det enkelte køretøj, er disse modeller imidlertid uhenigtsmæssige i forhold betragtninger om vejnettets trafik. Endvidere kan modellernes inputparametre hverken udledes af trafikdata eller af trafiksimuleringsmodeller.
2. Makromodeller giver billeder af energiforbruget på et vejnet baseret på statistiske data om trafikarbejdet og gennemsnitshastigheden. Modellerne medtager dog ikke på tilfredsstillende vis den betydning, som kørselsadfærden og kørselsdynamikken har for brændstofforbruget. Modellerne kan derfor ej heller forudsige effekter af forskellige trafikledelsesstrategier.
3. Mikromodeller gengiver køretøjets aktivitet og kan estimere brændstofforbruget for en given vognflåde, en given kørselsadfærd og en vejudformning, så forbruget kan indgå i simuleringsværktøjer som fx VISSIM. Modellernes begrænsninger ligger i, at de betragter enkeltkøretøjer og fordrer input af et betydeligt omfang.

Den nævnte litteraturgennemgang afrundes med en bemærkning om, at de betragtede modellers indikatorer for brændstofforbruget ikke umiddelbart kan tolkes som et mål for energieffektivitet. Der søges derfor en størrelse, der ud fra kørselsdynamiske parametre udtrykker brændstofforbruget, og som kan omsættes til et mål for energieffektivitet såvel for køretøjet som for en strækning og evt. et vejnet.

## Projektidéen

Projektets tese er, at man sparer brændstof ved at køre forudseende i forhold til vejtracéet og pålagte reguleringer af trafikken. Kører man eksempelvis ad en retlinet vejstrækning i et kuperet terræn, så bør en mindre reduktion af hastigheden inden en bakketop og en beskedent forøgelse i den efterfølgende bakkedal give en reduktion i det samlede energiforbrug. Farttilpasningsstrategien udnytter, at potentiel energi fra bakketoppen under nedkørslen omdannes til kinetisk energi, så farten kan holdes eller øges uden supplerende motorkraft.

Emnet er behandlet siden 1970'erne (Schwarzkopf & Leipnik, 1977). Gennemgået litteratur på området viser, at der blandt andet i Sverige og USA har været udført forsøg og udviklingsarbejde med baggrund i den nævnte situation (Hooker, 1988), (Hellström, Ivarsson, Åslund, & Nielsen, 2009), (Sahlholm & Johansson, 2010), (Park, Rakha, & Ahn, 2012). Forsøgene er primært udført i samarbejde med lastbilsproducenter og disses proprietære systemer. Alt andet lige viser samtlige forsøg, at der kunne opnås energibesparelser på mellem 6 og 15 %. Sådanne besparelser må betegnes som betydelige.

Projektets idé er derfor at sætte en fartpilot i stand til at benytte sådanne mere energieffektive farttilpasningsstrategier. Hypotesen er, at det kan lade sig gøre at udvikle modeller, som beskriver de aktuelle sammenhænge, der påvirker kørselens energiforbrug, så disse modeller kan danne grundlag for at optimere farttilpasningsstrategien. Den gennemgåede litteratur viser, at der allerede er arbejdet med delproblemstillinger. Det gælder eksempelvis modelbeskrivelse af og strategi for gearvalg, når motorens optimale udvekslingsforhold ligger mellem to gear (Hellström, Åslund, & Nielsen, 2010), og operationsanalytisk håndtering af udfordringerne med at afveje brændstofbesparelse mod forøget tidsforbrug, (Hellström et al., 2009).

## Fartpilots hovedmoduler

Forprojektet behandler aspekter af en idé til en energieffektiv fartpilot, *E2C2* – akronym for *Energy Efficient Cruise Control*. Fartpiloten skal løbende tilpasse hastigheden, så den er energieffektiv under hensyntagen til det aktuelle køretøj og til den aktuelle vejstrækning. Projektet kombinerer flere discipliner og arbejder med flere processer. Hovedmodulerne er skitseret på Figur 1. Udgangspunktet er en stedbestemmelse af køretøjets øjeblikkelige placering på vejnettet. Slutresultatet er en hastighedsindstilling, altså den hastighed, som fartpiloten efterfølgende stiler mod. Beregningerne herimellem falder i fire grupper.

For det første skal vejdata for den strækning, der aktuelt køres på, bestemmes. Vejdata er her oplysninger, der beskriver vejstrækningens geometri, oplysninger, der beskriver trafikale restriktioner på vejstrækningen, samt eventuelt oplysninger, der beskriver vejbelægningens indflydelse på kørslen.

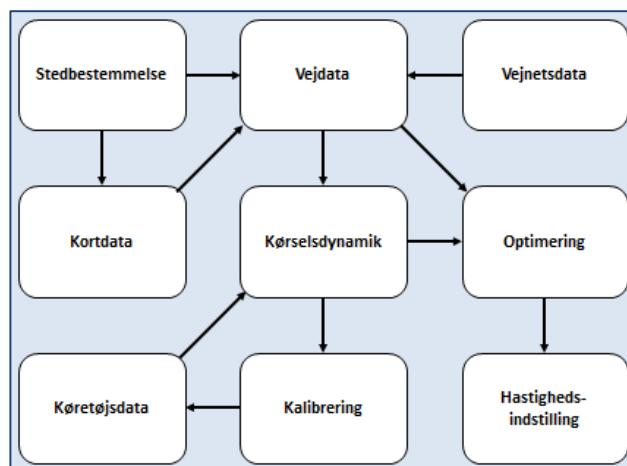
Det andet hovedmodul beskriver den kørseldynamik, der optræder. Der er tale om en klassisk, mekanisk model, der som input har informationer om køretøjet og om vejstrækningen. Modellen bruges i de to efterfølgende moduler.

I det tredje hovedmodul kalibreres de informationer, der foreligger om køretøjet, om vejstrækningen og om det miljø, som kørslen sker i. Kalibreringen er nødvendig, fordi nogle parametre ikke er kendt eller kan ændre sig i løbet af en tur. Eksempelvis vil massen af en tankbil ændre sig, hver gang en landmand er besøgt for at afhente råmælk. Ligeledes vil rullemodstanden ændre sig, når vejbelægningen skifter type eller stand, fx fra pulverasfalt til grus. Kalibreringsmodulet skal bestemme gode estimater for ikke-konstante parametre på grundlag af registreringer fra den netop tilbagelagte vejstrækning. Kalibreringen bliver en løbende proces, hvor de senest fundne estimater til stadighed søges justeret.

Selve optimeringen af kørslen på den foranliggende vejstrækning sker i det fjerde hovedmodul. Princippet er først at fastlægge en profil, der udtrykker den maksimale hastighed i den enkelte station på strækningen. Det sker på grundlag af de tilgængelige data om vejgeometri, trafikrestriktioner mv. Den maksimale hastighedsprofil vil typisk rumme diskontinuerte spring: Optræder en lokal hastighedsbegrænsning eller et kryds med ubetinget vigepligt, falder niveauet i ét punkt fra den generelle hastighedsgrænse. Rummer traçéet en skarp horisontalkurve, skal hastigheden afpasses radius og sidegradient i kurven.

Når det maksimale hastighedsniveau er fastlagt, skal den optimale hastighedsprofil findes. Den optimale hastighedsprofil er den, der intetsteds overskrider den maksimale hastighed, og som samtidig minimerer energiforbruget, uden at der opstår en uacceptabel forøgelse af køretiden. Den kørseldynamiske model bruges til at belyse sammenhængen mellem forskellige hastighedsvalg på strækningen og det afledte brændstofforbrug. Heraf kan man udlede den hastighed, som fartpiloten aktuelt skal stile mod. Også optimeringen er en løbende proces, hvor den foranliggende strækning hele tiden vurderes, og hvor fartpilots hastighedsindstilling til stadighed justeres.

I forhold til projektidéen er forprojektet afgrænset til alene at se på vejens længdeprofil. Forprojektet rummer tre pakker: *a)* Teoretiske overvejelser vedr. et køretøjs bevægelse i kuperet terræn, *b)* Computersimulering af kørsel ad bakket vej med beregninger af det samlede energiforbrug og *c)* Kørselsforsøg med én bil på én teststrækning til at give indikation af mulige besparelser. Herudover rummer forprojektet un-



Figur 1. E2C2-fartpilots hovedmoduler. Artiklen behandler i hver sit hovedafsnit modulerne Kørseldynamik, Kalibrering og Optimering. De øvrige moduler omtales kun i artiklens indledning.

dersøgelser af anvendeligt kortmateriale med hensyn til kvalitet og tilgængelighed ved kortlægning af vejens tracé. Denne sidste del berøres kun forbigående i det følgende.

Forprojektet har især fokuseret på den kørselsdynamiske model. Modellen medtager ikke motorens virkemåde med hensyn til gearskifte mv., omend enkelte overvejelser herom indgår. Modellen er endvidere vurderet med hensyn til muligheder for at kunne inddrage data fra køretøjets diagnoseboks (OBD) i kalibreringer. Det er tilstræbt at indbygge væsentlige dele af teorien i en edb-baseret model for at kunne simulere forskellige forhold om køretøjet og dets ydre påvirkninger.

## Det kørselsdynamiske modul

Ved modelleringen af den energieffektive fartpilot forudsættes det, at kørslen ikke er påvirket af et samspil med anden trafik på strækningen, altså at der er tale om »fri kørsel«, at føre og vejrlig ikke lægger begrænsninger på kørslen, samt at køretøjet så vidt muligt fremføres ved den aktuelt tilladte hastighed, men under respekt for vigepligtsforhold og med tilpasning til sikkerheds- og almindelige komforthensyn, fx gennem horisontalkurver. Forudsætningerne forenkler situationen; men de behøver ikke at lægge grænser for en senere videreudvikling af en energieffektiv fartpilot. Eksempelvis kan man forestille sig en hastighedstilpasningsstrategi, der inddrager det aktuelle hastighedsniveau for trafikken på den akutte vejstrækning og i særdeleshed hastigheden af de forankørende køretøjer.

## Kræfter og parametre

Normalt betragtes syv kræfter, når et køretøjs bevægelse skal beskrives kørselsdynamisk. Det er tyngdekraften,  $F_G$ , centripetalkraften,  $F_C$ , vejens normalreaktionskraft,  $F_N$ , luftmodstanden,  $F_L$ , rullemodstanden,  $F_R$ , motorens trækraft eller motorbremsningen,  $F_T$ , samt friktionskraften,  $F_F$ . De fem første er påført udefra. De knytter sig til naturen, fx vind og luftmodstand, eller til egenskaber ved vejen og køretøjet. Størrelsen kan eventuelt afhænge af den aktuelle hastighed, men kræfterne kan i øvrigt ikke påvirkes af køretøjets fører. De to sidstnævnte kræfter er underkastet førerens kontrol og anvendes til at manøvrere køretøjet. De er begrænset af køretøjets motorkraft, og af de kraftoverførsler, der kan effektueres i køretøjets bremsesystem og i kontakten mellem dæk og vejoverflade, samt naturligvis af førerens krav om kørselskomfort.

Hvis resultanten af alle de påvirkende kræfter er 0, så vil køretøjet enten holde stille eller bevæge sig med uændret hastighed og retning. I modsat fald accelereres eller decelereres køretøjet:

$$|\sum \mathbf{F}| = |\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_N + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_F| = |\mathbf{F}_{RES}| = \kappa \cdot M \cdot |\mathbf{a}| \quad [1]$$

hvor:

$\kappa$	er en dimensionsløs parameter [-], der indregner, at ikke blot køretøjets masse ændrer hastighed ved acceleration eller deceleration, men at også køretøjets roterende dele i denne forbindelse ændrer rotationshastighed og derved binder eller frigør energi,
$M$	er køretøjets masse (vægt) [kg], og
$\mathbf{a}$	er køretøjets acceleration eller deceleration [ $\text{m/s}^2$ ], altså den tidsafledede af hastigheden: $dv/dt$

Størrelsen af de nævnte kræfter kan beregnes; men formlerne beror alle på nogle forudsætninger. I forhold til at beskrive en energieffektiv kørsel angår et par helt centrale forudsætninger vejbelægningsens beskaffenhed. Dels betragtes vejbelægningen som en stiv flade, som umiddelbart modvirker og udligner de kraftbidrag, der er rettet vinkelret på vejoverfladen, med lige så store og modsat rettede reaktionskræfter fordelt på køretøjets hjul, så vejbelægningen ikke deformeres under hjullasten. Dels forudsættes det, at vejoverfladen er jævn, så der ikke opstår energitab, fordi køretøjet sættes i vertikale bevægelser som følge af passage af lunger, vulster eller vaskebrætlignende strukturer med relativ kort bølgelængde eller som følge af stød fra passage af skader i og lapper på belægningen.

Den første af disse forudsætninger er plausibel på veje med veldimensionerede bundne belægninger, og det er antaget, at den er acceptabel for langt de fleste danske veje. Den anden forudsætning er mere problematisk ved vejbelægninger, der er skadede som følge af trafik, klima eller alder. Det gælder store dele af

de danske kommuneveje. Den betænkelighed, man derfor kunne nære, er dog negligeret i forprojektet. Det antages, at manglerne har en begrænset betydning for mulighederne for at opnå fuld effekt af en energieffektiv fartpilot, uden at det dog kan udelukkes, at manglende jævnhed i sig selv indebærer et energispild af samme størrelsesorden som den besparelse, som en energieffektiv kørselsstrategi vil resultere i.

For så vidt angår de øvrige kræfter i formel [1], erindres der i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** om de formler, der normalt benyttes til beregning af kræfterne. Spørgsmålet er, hvorvidt de anførte parametre lader sig bestemme – og i bekræftende fald hvor godt. Spørgsmålet er dernæst, hvor følsomt energiforbruget er, når parameterværdierne ændrer sig. Efterfølgende omtales de parametre, der er lettest tilgængelige, først:

- **Tyngdeaccelerationen,  $g$** , er rimelig ens over hele Jorden, og den kan regnes konstant inden for et geografisk afgrænset område. Dens størrelse er  $|g| = 9,818 \text{ m/s}^2$  i Danmark; de danske vejregler anvender systematisk den nedrundede værdi,  $|g| = 9,81 \text{ m/s}^2$ .
- **Køretøjets hastighed,  $v$** , er nøgleparameteren i den energieffektive hastighedstilpasningsstrategi. Den aktuelle hastighed kan bestemmes af køretøjets speedometer eller på grundlag af tætliggende GPS-målinger under kørslen.
- **Motorens ydeevne,  $p_T$** , og **køretøjets maksimalt tilladte masse,  $M_{Max}$** , er størrelser, hvis produkt angiver motorens maksimale effekt. Det er således størrelser, der bør foreligge fra fabrikanten af det pågældende køretøj.
- **Virkningsgraden,  $\eta$** , i køretøjets transmissionssystem afhænger af det aktuelle gearvalg, af gearets virkningsgrad (typisk  $\eta = 0,95$ ), af differentialets virkningsgrad (typisk  $\eta = 0,97$ ) samt af koblingen, hvis der skiftes gear under kørslen. De køretøjsspecifikke oplysninger bør foreligge fra fabrikanten. Optimal energiudnyttelse fordrer korrekt gearvalg, og ved modelberegninger skal der derfor indarbejdes en strategi for valg mellem køretøjets gear. (Hellström et al., 2010)

Ved nedbremsning i forbindelse med forudsigelige, naturlige hastighedstilpasninger, betjener trafikanterne sig i en vis udstrækning af motorbremsning. Motorbremsningen finder sted med fuld effekt, idet det effekt- og energitab, som virkningsgraden udtrykker, virker »modsat«, svarende til energien overføres fra hjulenes bevægelse og til gnidningsvarme i motoren.

$ F_G  = M \cdot  g $	[a]
$ F_C  = M \cdot \frac{v^2}{R_H}$	[b]
$ F_L  = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{W,\theta} \cdot A_\theta \cdot v^2$	[c]
$ F_R  = \gamma_R \cdot  F_N $	[d]
$ F_T  = \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{v}$	[e]
$ F_F  = f \cdot  F_N  \leq \mu \cdot  F_N $	[f]
Hvor:	
$M$	er køretøjets masse (vægt) [kg],
$g$	er tyngdeaccelerationen [ $\text{m/s}^2$ ],
$v$	er køretøjets hastighed [ $\text{m/s}$ ],
$R_H$	er radius [m] i den aktuelle horisontalkurve,
$\rho$	er luftens densitet [ $\text{kg/m}^3$ ],
$C_{W,\theta}$	er en dimensionsløs størrelse [-], der angiver luftmodstandens afhængighed af køretøjets form og overfladefriktion, når den resulterende vind virker i vinklen $\theta$ med kørselsretningen – størrelsen betegnes ofte ved sit engelske navn <i>drag coefficient</i> ,
$A_\theta$	er køretøjets areal [ $\text{m}^2$ ] med front mod vinden, der virker i vinklen $\theta$ ,
$\gamma_R$	er den aktuelle (hastighedsafhængige) rullemodstandskoefficient [-],
$\delta$	er den udnyttede del af motorens maksimaleffekt [-],
$\eta$	er virkningsgraden i køretøjets transmissionssystem [-],
$M_{Max}$	er køretøjets maksimalt tilladte masse (vægt) [kg],
$p_T$	er motorens ydeevne pr. vægtenhed [ $\text{W/kg}$ ],
$f$	er den friktionskoefficient [-], der aktuelt optræder, og
$\mu$	er den friktionskoefficient [-], der maksimalt kan etableres.

Figur 2. Optrædende kræfter - tyngdekraften,  $F_G$ , centripetalkraften,  $F_C$ , luftmodstanden,  $F_L$ , rullemodstanden,  $F_R$ , motorens trækraft,  $F_T$ , samt friktionskraften,  $F_F$  - udtrykt ved parametre, der traditionelt anvendes, jævnfør (Kjems et al., 2013).

- **Udnyttelsesgraden**,  $\delta$ , der angiver hvor stor en del af motorens maksimaleffekt, der benyttes under kørslen, udtrykker i princippet hvor tungt foden hviler på speederen, altså hvor meget brændstof motoren tilføres. En brugbar værdi kan derfor hentes fra køretøjets diagnoseboks (OBD).

Bemærk, at det anførte udtryk ([e] i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**) forudsætter, at motorens energiforbrug er ligefrem proportionalt med den udnyttede del af motorens maksimaleffekt. Denne sammenhæng holder med rimelighed, så længe der er tale om forholdsvis små ændringer i belastningen af motoren, og der køres i samme gear. Bemærk også, at det anførte udtryk alene betragter den leverede effekt fra motoren og ikke medregner varmetab under forbrændingsprocessen (denne andel tegner sig for cirka 65-70 % af brændstoffets totale energimængde), friktionstab i selve motoren, samt den effekt, der anvendes til at drive køretøjets generator, servostyring, air condition, mv. Der optræder altså betydelige energitab undervejs. I køretøjer med forbrændingsmotorer, der anvender benzin eller diesel, ender alene 10-30 % af energien i det forbrugte brændstof med at drive køretøjet frem. (Evans et al., 2009) (Meyer, 2007).

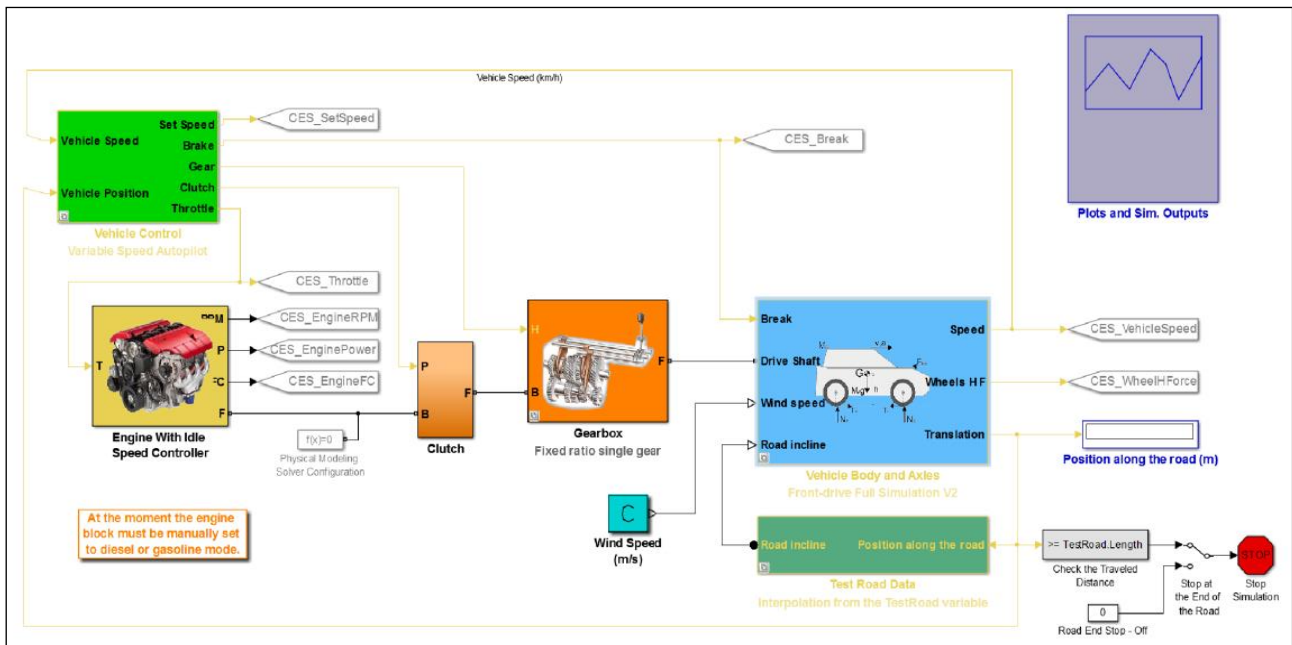
- **Luftens densitet**,  $\rho$ , varierer med temperaturen, luftfugtigheden eller barometerstanden, men kan med rimelighed regnes konstant inden for et afgrænset område og tidsrum. Størrelsen kan måles; men det er p.t. ikke klarlagt, om måling mest hensigtsmæssigt skal ske ved det enkelte køretøj eller centralt.
- **Horisontalkurvens radius**,  $R_H$ , er ideelt set en egenskab ved vejens tracé, og denne forudsætning holder, så længe køretøjet bevæger sig parallelt med vejens referencelinje. Der foreligger ikke tilgængelige vejdata, men horisontalkurvens radius kan optages fra kort eller luftfotografier; den aktuelle krumning kan alternativt bestemmes på grundlag af tætliggende GPS-målinger under kørslen.
- **Køretøjets masse**,  $M$ , er en kritisk størrelse, idet man skal vide, hvor tungt køretøjet er lastet på det aktuelle tidspunkt. Navnlige er der behov for at håndtere det forhold, at massen ændrer sig, når køretøjet lastes og losses. Størrelsen er konstant for den enkelte køretur og kan findes ved at veje køretøjet eller dets last eller eventuelt ved et estimat ud fra målinger af køretøjets kørsel.
- **Køretøjets frontareal**,  $A$ , og **drag coefficient**,  $C_w$ , skal fastlægges for det enkelte køretøj og burde i princippet kunne oplyses af de pågældende fabrikanter. Der skal dog tages hensyn til individuelle forhold, fx monteret ekstraudstyr, og for det forhold, at de trækkende køretøjer kan være kombineret med forskellige anhængere. Når vinden *ikke* blæser vinkelret på køretøjets front, skal der endvidere for begge størrelser,  $A$  og  $C_w$ , anvendes værdier, som repræsenterer retningen af den resulterende vindpåvirkning under kørslen,  $\theta$ . De søgte værdier kan derfor ikke antages at være kendte. Som tilfældet er det med køretøjets masse, kan man muligvis ud fra målinger foretaget under kørslen give et estimat på størrelserne.

Generelt om vindmodstanden gælder i øvrigt, at forudsætningerne forandrer sig undervejs, hvis vinden ikke har konstant styrke, eller hvis der langs vejen optræder forskelligt læ mod vinden. Det vil være meget ambitiøst at søge at håndtere disse momenter; men det kan være relevant gennem modelbetragtninger at skabe et fingerpeg om hvorvidt størrelsesordenen af den indflydelse, som vekslende vindforhold kan have på hastighedsoptimeringen, altså hvorvidt det er en parameter, som har væsentlig betydning for optimeringens robusthed.

- Rullemodstand betegner de energitab, der sker i køretøjets bevægelige dele, eller som altid optræder, når et hjul ruller på en vejoverflade. Det er en sammensat kraft, der består af flere forskellige bidrag, blandt andet den egentlige rullemodstand i form af det moment, som stammer fra, at hjultrykket virker i en lille afstand foran hjulakslen, friktion i køretøjets hjullejer og i transmissionssystem, deformationsmodstand i det pneumatiske hjuls gummi hidrørende fra indre og ydre friktionstab og hysteresetab, stødmotstand fra hjulenes svingende bevægelse ved kørsel på ujævn vejoverflade, samt energitab gennem vertikale rystelser af bilkonstruktionen ved kørsel på ujævn og hullet vej.

**Rullemodstandskoefficientens** størrelse,  $\gamma_R$ , beror på den aktuelle vejbelægnings tekstur, føret, dækkene, køretøjet og hastigheden. Sidstnævnte antages at indgå enten lineært eller kvadratisk afhængigt af køretøjstypen:  $\gamma_R = \gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2$ . Værdien kan ikke antages at være kendt. Som tilfældet er det med køretøjets masse, kan man muligvis ud fra målinger foretaget under kørslen give et estimat, der kan regnes gældende, så længe køretøjet bevæger sig med en given hastighed på en vejstrækning med en given belægning.





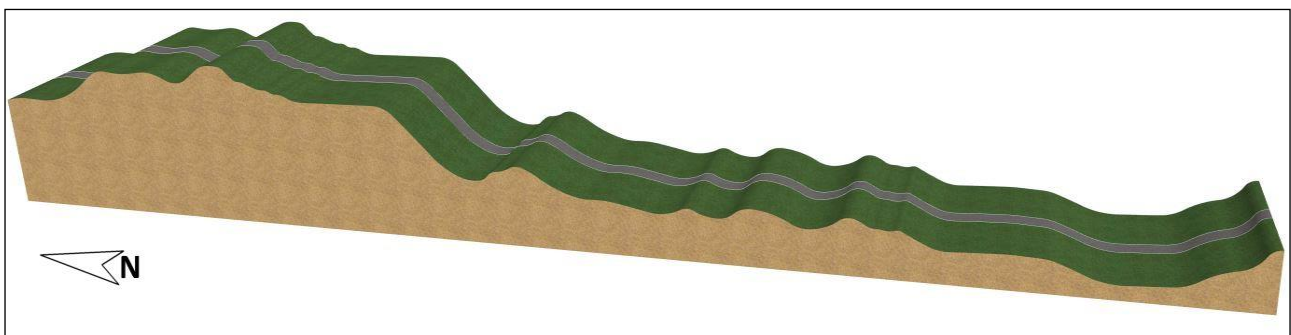
Figur 3 - Screen-dump af den udviklede Simulink®-model omfattende køretøjets kontrolsystem (grøn blok), motoren (gul blok) kobling og gearkasse (orange blokke), chassis, aksler og hjul (blå boks) samt teststrækningen (blågrøn blok). Bemærk, at de to forekomster af termen *Break* begge bør erstattes af *Brake*.

- Den **frikoefficient**,  $\mu$ ,  $f$ , der optræder under nedbremsning, vil normalt være begrænset af komfort hensyn, i hvilket man kan anvende defaultværdien i de danske vejregler, (Vejdirektoratet, 2012). Undtaget herfra er dog kørsel gennem skarpe horisontalkurver, hvor der skal tages hensyn til komfortabel sideacceleration og aktuell radialgradient, samt kørsel under meget ringe føreforhold, fx på isglat vej eller ved akvaplning. Den størrelse, der aktuelt udnyttes, kan muligvis, ligesom rullemodstandskoefficienten, estimeres ud fra målinger foretaget under kørslen.

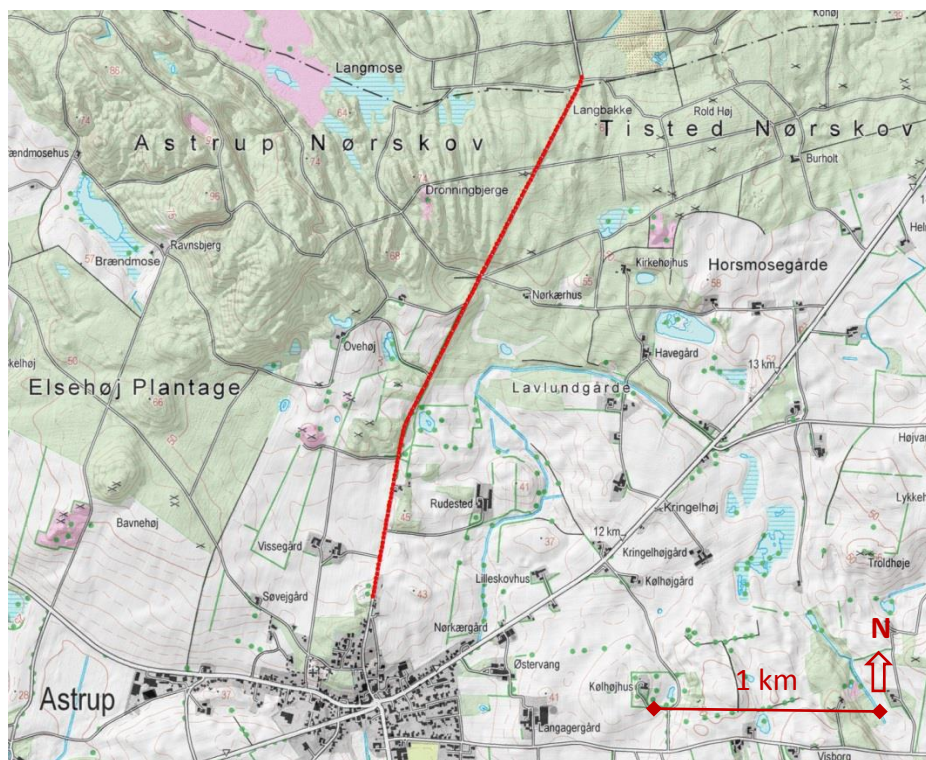
## Computersimulering

En model af det skitserede kørselsdynamiske system er opstillet i MatLab®-applikationen Simulink®. Simulink er udviklet til simulering, analyse og kontrol af komplekse modeller og dynamiske systemer. Modeller opbygges af moduler, der sammensættes med en veldefineret indbyrdes afhængighed. Den opbyggede model er illustreret på Figur 3, idet hver blok repræsenterer et system af algoritmer, der både omfatter kørselsdynamik og bilfysik. Med modellen simuleres gennemkørsel af en strækning i tidsskridt. Derved er det muligt at inddrage forskellige parametre og analysere deres betydning for det samlede energiforbrug.

Ved valg af strækningen til forsøget blev der lagt vægt på, at testkørslerne skulle foregå som fri, men sikker og forsvarlig kørsel, at linjeføringen skulle være forholdsvis ret, at strækningen ikke havde væsentlige kryds, og at den vertikale kurvatur indeholdt flere korte bakker, der kunne afspejle sig i de anvendte kørselsstrategiers målte energiforbrug, jævnfør Figur 4. Der er arbejdet med en cirka 2,2 km lang strækning af en mindre lokalvej i åbent land i Rebild kommune, jævnfør Figur 5.



Figur 4 - Udrettet profil af den valgte testlokalitet. (Nielsen & Laugesen, 2013)



Figur 5. Den anvendte forsøgsstrækning. (Kjems et al., 2013)

I projektet har det ikke været muligt at bestemme en hastighedsprofil for køretøjet, der tager udgangspunkt i en energioptimal passage af vejstrækningen. Hastighedsprofilen i modellen er tilrettet manuelt ud fra erfaringsværdierne opnået i praktiske gennemløb af forsøgsstrækningen. Denne tilpasning viste sig ikke overraskende at volde en del vanskeligheder, hvorfor sammenligningen i dag ikke er helt vellykket og vil kræve en del mere udviklingsarbejde.

Resultater fra sammenlignende simulerede gennemkørsler af forsøgsstrækningen er vist på Figur 6 på side 2: dels for en traditionel fartpilots kørselsstrategi (rød), dels for en manuelt tilrettet energieffektiv kørselsstrategi (grøn).

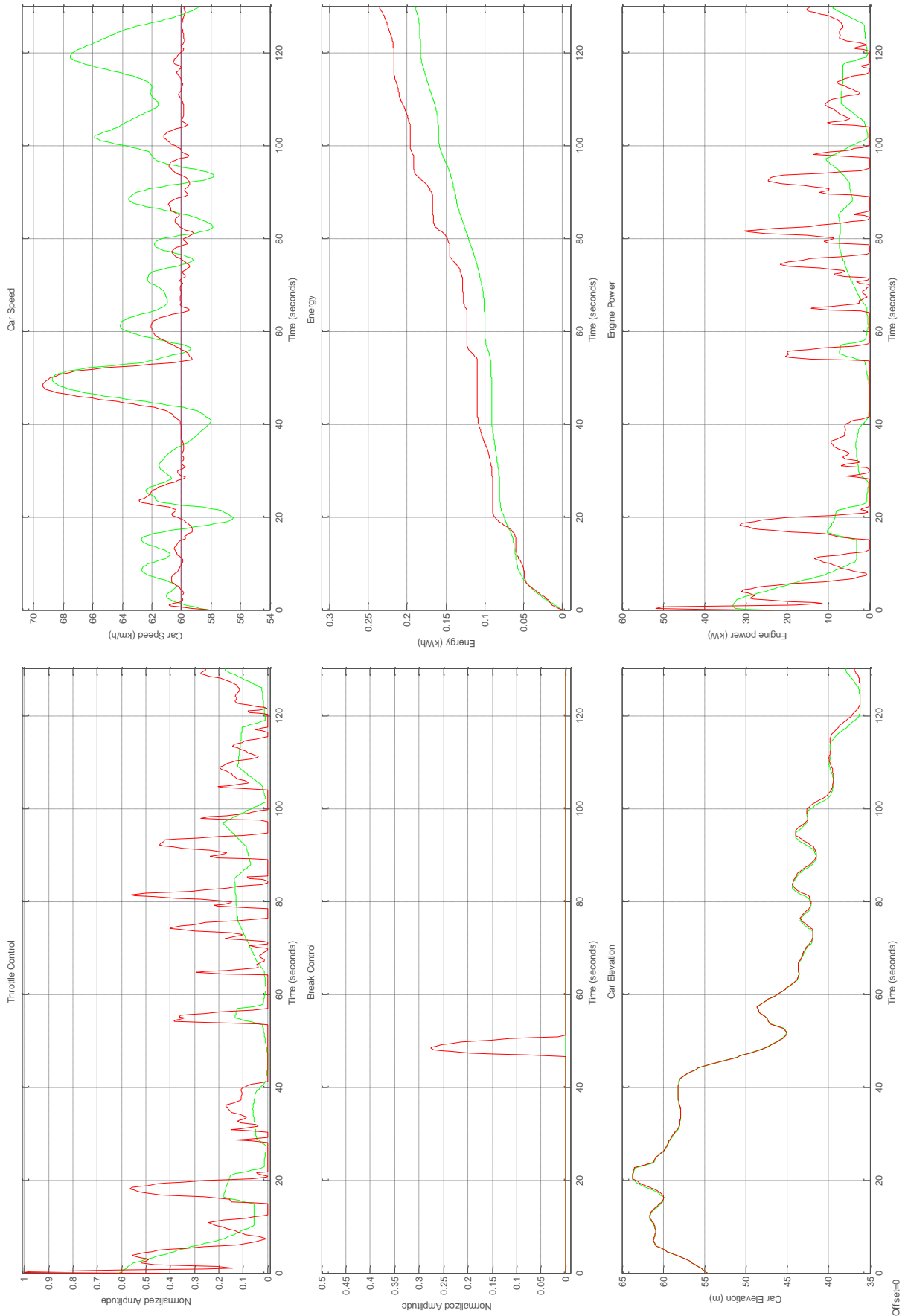
Resultaternes seks, godt to minutter lange kurveforløb, viser i første kolonne *A*: speeder-påvirkningen, *B*: bremse-påvirkningen samt *C*: koten [m], og i anden kolonne *D*: hastigheden [km/h], *E*: det akkumulerede energiforbrug [kWh] samt *F*: den øjeblikkelige motoreffekt [kW]. Den energieffektive kørselsstrategi fremstår som med roligere speeder-bevægelser (*A*) og har ingen opbremsning (*B*). Fremførslen er alt i alt en kende hurtigere end ved en traditionelle fartpilots kørselsstrategi (*C*); det skyldes navnlig større hastighedsfluktuationer, og et generelt set lidt højere hastighedsniveau på den sidste halvdel af kørslen (*D*). Energiforbruget ender med at være en femtedel mindre ved den energieffektive kørselsstrategi (*E*). Det afspejler strategiens roligere træk på motoreffekten (*F*) ... og dens roligere brug af speeder og bremse (*A* og *B*).

### Testkørsler

De praktiske gennemløb stammer fra kørselsforsøg, der i foråret 2013 er udført i et kandidatspeciale på civilingeniøruddannelsen på Aalborg Universitet med henblik på at teste modellen. (Nielsen & Laugesen, 2013).

Specialeprojektet, som testede computermodellen, omhandlede indsamling af empiriske data i kørselsforsøg, hvor der tilstræbtes en brændstofbesparelse ved kørsel med hastighedstilpasning frem for en konventionel fartpilot. Efterfølgende benyttedes de empiriske data til at sammenligne den opstillede simuleringsmodel med forsøgsførerne. Herved undersøgte, om man ved at sammenholde teori og praksis kunne verificere modellen.





Figur 6. Resultater fra godt to minutter lange sammenlignende modelkørsler (simuleringer) gennem forsøgsstrækningen. Rød linje viser kørsel med traditionel fartpilot. Grøn linje viser resultater fra en energieffektiv hastighedsstrategi.

Forsøgskørslerne blev gennemført med en standardpersonbil, Renault Laguna (årgang 2011, 2,0 diesel med 150 hk). Standardparametre for denne model blev lagt ind i simuleringmodellen. Forsøgene indsamlede data fra gennemkørsel med traditionel fartpilot med låst hastighedsvalg og fra en alternativ, intuitivt fastlagt kørselsstrategi, der bør være mere energieffektiv end fartpilots. I alt blev der gennemført 15 gennemkørsler med hver af de to kørselsstrategier.

Om forsøgsresultaterne hedder det i kandidatprojektets konklusion (Nielsen & Laugesen, 2013):

*”Analysen af forsøgskørslen viser en besparelse på 27,7 % ved kørsel med energieffektiv hastighedstilpasning frem for fartpilot, hvortil besparelsen er dannet på baggrund af beregninger ud fra målingerne ved den manuelle tankning. Besparelsen indsamlet fra bilens kørecomputer er derimod beregnet til 15,3 %. Forskellen vurderes til at skyldes forsøgsudførelsen og usikkerheder omkring empirien, hvor den forbrugte brændstofmængde har stor indflydelse på den procentuelle forskel mellem før og efter målingerne. Hvis der havde været udført flere forsøgskørsler eller længere ture, ville usikkerhederne omkring brændstofmålingerne været reduceret. Videodokumentation og analyse af kørecomputerens realtidsinformationer viste en besparelse på 17,2 % for selve forsøgsstrækningen. På trods af måleusikkerheder ved empirien vurderes det fortsat, at brændstofbesparelse ligger mellem 15,3–27,6 % ved samme forsøgsstrækning og kørselsforudsætninger. Desuden medførte hastighedstilpasningen kun en rejsetid der var 1,5 % længere end for fartpiloten.”*

Modellsimuleringerne viste altså en besparelse på mellem 10 og 30 % afhængig af det valgte energisystem og de ydre omstændigheder, fx strækningens udformning. De studerendes praktiske forsøg fremviste lignende besparelser og brug af forskellige målemetoder gav anledning til en lignende stor spredning i værdierne.

De opnåede energibesparelser er ganske høje sammenholdt med tidligere dokumenterede forskningsresultater fra større veje, fx 3 % for lastbiler (Hellström et al., 2009) og 12 % for personbiler (Ahn, Rakha, & Moran, 2011). Resultatet skal dog ses på baggrund af, at forsøgsstrækningen blev udvalgt med henblik på at opnå størst mulig besparelse; blandt andet faldt koten over de sidste 75 % af strækningen omtrent 30 meter.

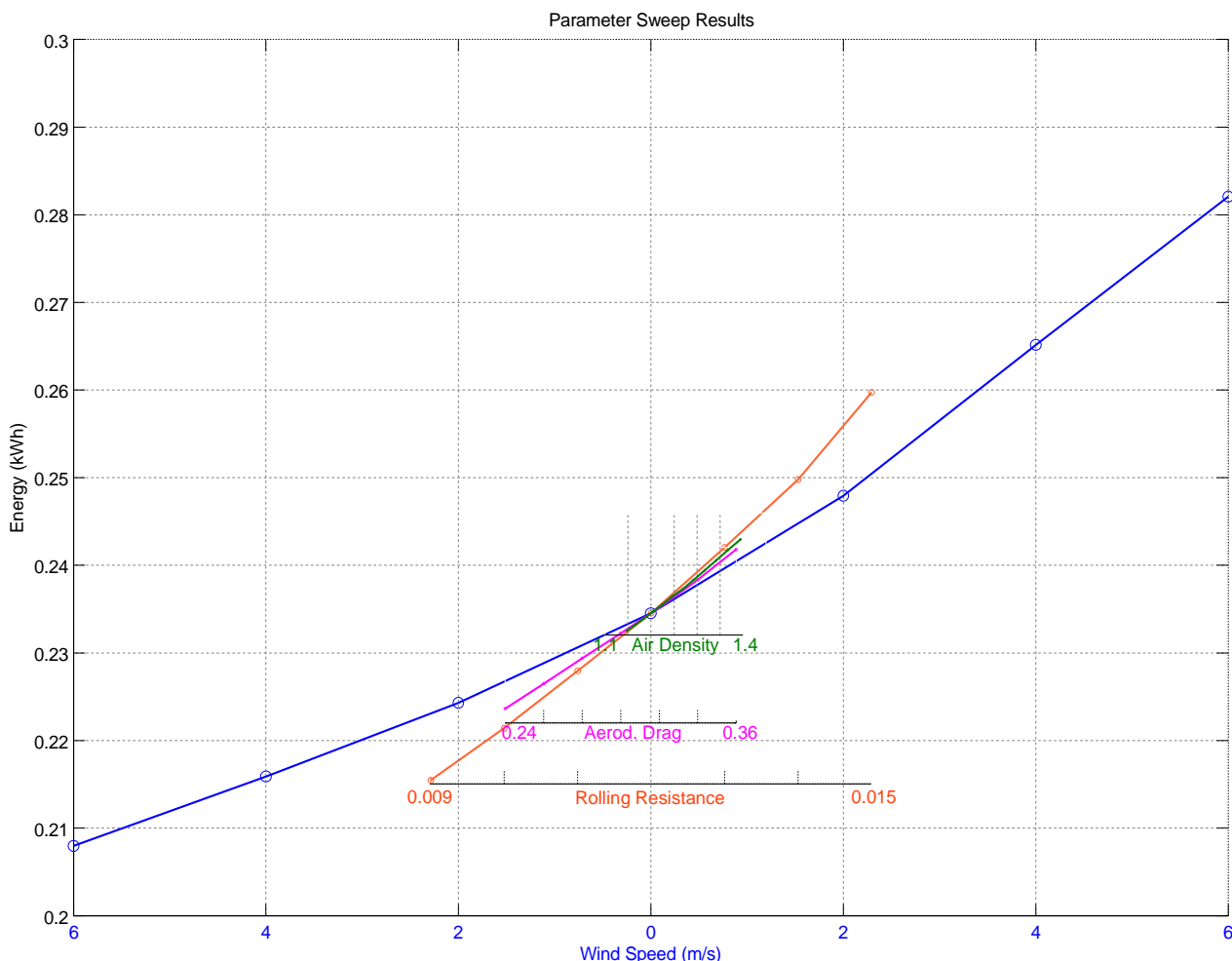
Forsøgskørslens data er søgt sammenholdt med beregninger i den opstillede simuleringmodel. I det øjeblik med er modellen kalibreret i forhold til forsøgets strækning og køretøj. Umiddelbart viser simuleringen, at der kun kan forventes opnået en besparelse på 2 % ved energieffektiv hastighedstilpasning, men denne beregning tager ikke højde for det store energispild, der er i bilens forbrændingssystem og ringe udnyttelse af brændstoffet. Sættes brændstoffets udnyttelsesgrad til ca. 25 % vil brændstofbesparelsen i stedet blive 8 %. Tilbage står udfordringer med hastighedstilpasningen i modellen.

Sammenligningen viser, at det er umiddelbart vanskeligt at sammenholde et praktisk målt energiforbrug med et teoretisk beregnet. Fornuftige antagelser om det samlede energisystem viser dog, at computermode-llen er ganske anvendelig.

### Følsomheds-vurderinger

Den opstillede Simulink®-models følsomhed er testet for variationer i enkelte af dens grundparametre. Resultaterne er sammenstillet i Figur 7. Om de variationer, parametrene spænder over, skal følgende oplyses:

- Luftens massefylde,  $\rho$ , varieres i intervallet 1,1–1,4 kg/m<sup>3</sup>. Den aktuelle værdi afhænger af luftens temperatur, fugtighed og tryk. Værdien er typisk omkring 1,3 kg/m<sup>3</sup> ved 0 °C. Det anvendte spænd kan sammenholdes med den variation, som massefylden vil have ved en temperaturvariation fra +35 °C til –20 °C cirka 200 m over havets overflade.
- Køretøjets *drag coefficient*,  $C_w$ , er behandlet i intervallet 0,24–0,36. Værdierne svarer til de, der gælder for sports- og personbiler. Varevogne har værdier omkring 0,5, og lastbiler med anhænger ligger omkring 0,7–0,9.
- Rullemodstanden er udtrykt gennem én koefficient, der ligger i intervallet 0,009–0,015. Niveauet svarer til at køre med gode dæk på en fast vejbelægning, fx asfalt, i god stand.



Figur 7. Simulink®-modellens følsomhed over for variationer i luftens vægtfylde (Air Density), køretøjets drag coefficient (Aerod. Drag), rullemodstandskoefficient (Rolling Resistance) og direkte mod- eller medvind (Wind Speed).

- Endelig varierer vindhastigheden i intervallet fra  $-6$  m/s til  $+6$  m/s, hvor fortegnet minus angiver, at der er medvind. Den vind, der er betragtet, overstiger ikke såkaldt »jævn vind« (vindstyrke 4: 5,5-7,9 m/s). Vinden er alle steder regnet parallelt med køreretningen, og det er forudsat, at vinden angriber køretøjet på samme vis forfra som bagfra, altså, at produktet  $C_W \cdot A$  er ens uanset vindretningen.

Det fremgår af Figur 7, at usikkerhed i fastlæggelse af rullemodstanden har den største indflydelse inden for de betragtede, normalt forekommende variationsintervaller. Vindpåvirkningens indflydelse er ikke uvæsentlig, når der er tale om vind, der kan mærkes. De udfordringer, som vinden i øvrigt giver med hensyn til læ, stød og vindretning i forhold til kørslen, er ikke søgt behandlet.

Tilsvarende følsomhedsanalyser bør naturligvis gennemføres for andre køretøjstyper og andre belægnin-ger. Endvidere bør der udføres modelberegninger, der illustrerer, hvordan parametrene usikkerhed indvirker på den energibesparelse, som forskellige strategier for hastighedstilpasning giver.

## Kalibreringsmodulet

Kalibreringsmodulet er væsentligt i E2C2-konceptet. Det er det, fordi adskillige af de grundparametre, der indgår i den kørselsdynamiske model, og som derfor influerer på forudsætningerne for den sidste hovedproces, optimeringsmodellen, ikke kan forudsættes at være konstante i hverken tid eller sted. Kalibreringsmodulets opgave er derfor, at verificere, om energiforbruget i den netop gennemførte kørsel modsvarer det resultat, som den kørselsdynamiske model kommer frem til. Ifald dette *ikke* er tilfældet, skal de

stedvariable parametre i den kørselsdynamiske model justeres på en systematisk måde, så modellen giver retvisende resultater, indtil vejstrækningen atter ændrer karakter eller køretøjet gør et holdt.

Selv om kalibreringsmodulet altså er væsentlig for at udvikle en praktisk duelig, energieffektiv fartpilot, så er det en komponent, vi ikke er stødt på, i nogle af de artikler, vi har fundet om energieffektive fartpiloter. Et par svenske arbejder (Sahlholm & Wanglund, 2009) og (Sahlholm & Johansson, 2010) kommer nærmest, idet de beskriver forsøg, hvor man på grundlag af registreringer fra et antal gennemkørsler med en lastbil er i stand til at give et ganske godt estimat af stigningsforholdene på en overordnet vejstrækning.

E2C2-projektets idé er, som nævnt, at estimere værdier for grundparametre på baggrund af registreringer af tid, sted og brændstofforbrug på den netop gennemkørte vejstrækning. Nogle parametre skal kalibreres én gang for hver ny tur, der i værksættes – køretøjets masse er et eksempel herpå. Andre parametre, fx rullemodstandskoefficienten, skal kalibreres, når vejstrækningen ændrer karakter. Som udgangspunkt anvendes de senest fundne grundparametre til den kalibreringsberegning, der forestår, men der kan naturligvis tænkes situationer, hvor grundparametrene i stedet bør *resettes* til en default-værdi.

Efterfølgende betragtninger er en skitse af, hvordan kalibreringsmodellen kan tænkes at virke.

### Betragtninger om køretøjets energi

Et køretøj bevæger sig under de førnævnte generelle forudsætninger på en retlinet vejstrækning. Betragt køretøjets bevægelse mellem to snit, ① og ②, der ligger så tæt på hinanden, at yderligere følgende forenkende forudsætninger kan gøres for delstrækningen, at længdeprofilet er retlinet, men ikke nødvendigvis vandret, at tværfaldet (radialgradienten) er konstant, at vejbelægningen er ensartet, så rullemodstand og friktionsforhold ikke ændrer sig undervejs, at kørslen sker i ét og samme gear, samt at gearingen er afpasset den aktuelle motorbelastning, så der optræder en lineær sammenhæng mellem ydelsen fra køretøjets motor og kraftoverførslen gennem køretøjets drivende hjul.

Endvidere forudsættes, at kørslen finder sted i vindstille, altså at der ikke skal tages hensyn til vindpåvirkninger, herunder vindstød, der indvirker skævt i forhold til køretøjets bevægelsesretning.

Når stationeringen betegnes  $s$ , koten  $h$ , tiden  $t$  og hastigheden  $v$ , og når indices 1 og 2 angiver værdierne i snit ① henholdsvis snit ②, bestemmes afstanden,  $\Delta s = s_2 - s_1$ , højdeforskellen,  $\Delta h = h_2 - h_1$ , gennemkørselstiden,  $\Delta t = t_2 - t_1$ , og hastighedsændringen,  $\Delta v = v_2 - v_1$ . Ses for enkelheds skyld bort fra den dimensionsløse faktor  $\kappa$  i formel [1], og udnyttes, at længdeprofilets vinkel med vandret,  $\alpha_t$ , er beskeden, så det om længdegradienten  $i_t$  gælder, at  $i_t = \tan \alpha_t \approx \sin \alpha_t = \Delta h / \Delta s$ , så bestemmes ændringen i kinetisk energi,  $E_{kin}$ , og i potentiel energi,  $E_{pot}$ , mellem de to snit:

$$\Delta E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot ((v_1 + \Delta v)^2 - v_1^2) = M \cdot v_1 \cdot \Delta v + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \Delta v^2 \quad [2]$$

$$\Delta E_{pot} = M \cdot g \cdot h_2 - M \cdot g \cdot h_1 = M \cdot g \cdot \Delta h = M \cdot g \cdot i_t \cdot \Delta s \quad [3]$$

hvor notationen i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** er anvendt.

Generelt gælder, at ændringen i energi er summen af det arbejde, som aktivt virkende kræfter,  $\mathbf{F}$ , udfører over den strækning,  $s$ , hver af disse kræfter virker over:

$$\Delta E = \sum |\mathbf{F} \cdot \mathbf{s}| \quad [4]$$

Tyngdekraften optræder altid og svarer for ændringen i potentiel energi. For et køretøj, der ikke bremses på delstrækningen, optræder herudover alene rullemodstanden,  $\mathbf{F}_R$ , luftmodstanden,  $\mathbf{F}_L$ , og motorens trækraft,  $\mathbf{F}_T$ . Alle disse tre kræfter virker langs vejoverfladen over afstanden,  $\Delta s$ , mellem de to snit ① og ②. De tre kræfter kan dog ikke forudsættes at være konstante over delstrækningen.

Flyttes snittene ① og ② uendeligt tæt på hinanden,  $\Delta s \rightarrow ds$ , bliver også højdeforskellen, gennemkørselstiden og hastighedsændringen bliver infinitesimalt små:  $\Delta h \rightarrow dh$ ,  $\Delta t \rightarrow dt$ ,  $\Delta v \rightarrow dv$ . Da de tre kræfter, jævnfør formel [c], [d] og [e] i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**, beror på størrelsen af køretøjets ha-

stighed, er det tilladeligt at betragte dem som konstante over denne forsvindende lille bevægelse. Antages nu tillige, at den betragtede delstrækning er vandret,  $dh = 0$ , kan et udtryk for den acceleration,  $a$ , som køretøjet har, udledes. Af formlerne [2] og [4] fås med notationen i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**:

$$\begin{aligned} dE_{kin} &= M \cdot v \cdot dv + \frac{1}{2} \cdot M \cdot (dv)^2 = (-F_R - F_L + F_T) \cdot ds \\ &= \left[ -\gamma_R \cdot M \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_W \cdot A \cdot v^2 + \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{v} \right] \cdot ds \end{aligned} \quad [5]$$

Udnyttes, at  $ds = v \cdot dt$ , og bortkastes det ubetydeligt lille kvadratled  $dv^2$ , findes:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\gamma_R \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{M} \cdot v^2 + \delta \cdot \eta \cdot \frac{M_{Max} \cdot p_T}{M \cdot v} \quad [6]$$

## Estimation af parametre

Formel [6] nærmer sig et udtryk, som giver mulighed for at estimere nogle af de parametre, der ikke kan måles, og som ikke er kendt med sikkerhed.

Det antages, at det vil være muligt løbende at opsamle sammenhørende værdier af tidspunktet,  $t$ , samt køretøjets aktuelle position i form af et koordinatsæt,  $(x, y)$ , og aktuelle brændstofforbrug,  $\dot{m}$ . På grundlag af en serie af samholdende tids- og positionsmålinger vil det ved at betragte kørslen over en kortere delstrækning,  $\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ , være muligt at estimere den aktuelle hastighed,  $v \approx \Delta s / \Delta t$ , og, når successive delstrækninger betragtes, den aktuelle acceleration,  $a \approx \Delta v / \Delta t$ .

Det antages endvidere, at der er en kendt sammenhæng mellem det akkumulerede brændstofforbrug,  $\Delta B = \sum \dot{m}$ , og den energi, som køretøjets motor leverer over en strækning, hvor motoren er belastet ensartet i samme gear. Hvis sammenhængen er lineær, gælder  $k \cdot \Delta B = \Delta s \cdot \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot p_T / v = \Delta t \cdot \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot p_T$ , og så giver formel [7] følgende billede, hvor de målte størrelser er markeret med rødt:

$$a = -(\gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2) \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{M} \cdot v^2 + k \cdot \frac{\Delta B}{\Delta s \cdot M} \quad [8]$$

hvor rullemodstandskoefficienten er opdelt i sin konstant og i sine lineært henholdsvis kvadratisk hastighedsafhængige led, svarende til den repræsentation, der normalt antages.

Hvis den betragtede vejstrækning *ikke* er vandret, kan man formentlig nå en fornuftig tilnærmelse til samme formel ved at subtrahere eller addere det brændstofforbrug,  $\Delta B_{pot}$ , der modsvarer det energibidrag, som bindes henholdsvis frigives ved kørsel op eller ned ad en bakke, jævnfør formel [3]. Hvis man råder over en digital terrænmodel med god repræsentation af koten, så vil tids- og positionsmålingerne tillade estimering af den aktuelle højde,  $h = h(x, y)$ , og dermed også for den aktuelle længdegradient,  $i_t \approx \Delta h / \Delta s$ , og ændringen i potentiel energi.

I udtryk [8] er tyngdekraften,  $g$ , naturligvis kendt. De resterende størrelser,  $\mu_{R,0}$ ,  $\mu_{R,1}$ ,  $\mu_{R,2}$ ,  $\rho$ ,  $C_W$ ,  $A$  og  $M$  samt  $k$ -værdierne, rummer forskellige udfordringer.

## Rullemodstandskoefficienterne

Rullemodstandskoefficienterne,  $\gamma_R$ , beror, som nævnt, på den aktuelle vejbelægning, føret, dækkene og køretøjet. Hvis øvrige parametre, navnlig  $\rho$  og  $M$ , er kendte, kan koefficienterne tænkes estimeret for det konkrete køretøj og den konkrete vejstrækning ud fra kørselsmålinger i frigear, så motorens trækraft er elimineret, og med forskellige udgangshastigheder. I princippet er denne fremgangsmåde enkel, men hagen er, at øvelsen skal foretages, hver gang køretøjet bevæger sig ind på en ny vejstrækning.

Der kunne være behov for at få vurderet, om den fejl, som begås ved alene at anvende standardværdier, er væsentlig i forhold til den nøjagtighed, hvormed den optimale hastighed kan fastlægges, og i bekræftende fald:

- hvor stor forskel der er på de  $\gamma_R$ -værdier, der estimeres for samme køretøj på forskellige vejstrækninger, henholdsvis hvor stor forskel der er på de  $\gamma_R$ -værdier, der estimeres for samme vejstrækninger for forskellige køretøjer af samme type,



- hvorvidt der kan opstilles reference  $\gamma_R$ -værdier for en given vejstrækning, således at de  $\gamma_R$ -værdier, som gælder for et køretøj, kan udtrykkes ved en køretøjsspecifik faktor kombineret med disse reference-værdier,
- hvor følsomme slutresultaterne er over for usikkerhed i estimerne af  $\gamma_R$ -værdierne sammenlignet med følsomheden over for andre optrædende usikkerheder, herunder målenøjagtigheden.

### Luftens densitet

Atmosfærisk lufts massefylde,  $\rho$ , kan variere en del procent, når temperaturen, luftfugtigheden eller barometerstanden ændrer sig. Det er derfor væsentligt, at kende den aktuelle værdi, så snart hastigheden når en sådan størrelse, at luftmodstanden kommer til at spille en betydende rolle i kørslens energiregnskab.

Der er behov for at vurdere, hvordan luftens densitet kan måles med tilstrækkelig nøjagtighed, og hvorvidt denne måling mest hensigtsmæssigt foretages ved det enkelte køretøj eller centralt. I givet fald behøver man ikke at estimere sig frem til denne parameter i kalibreringsmodellen.

### Køretøjets drag coefficient, frontareal og masse

Produktet  $C_W \cdot A$  er i princippet konstant og køretøjsspecifikt, når kørslen sker i vindstille. Størrelsen ændrer sig imidlertid, hvis det trækkende køretøj får en ny anhænger, ligesom den ændrer sig, hvis et køretøj uden faste sider, læsses eller losses. Som udgangspunkt vil det formentlig være fornuftigt at anvende den senest estimerede værdi som default for en ny køretur, men værdien bør forholdsvis tidligt på turen søges verificeret.

Køretøjets aktuelle masse,  $M$ , spiller ligeledes ind på navnlig luftmodstandens betydning. For en personbil kan massen default sættes til en standardværdi, fx lig køretøjets egenvægt med tillæg af vægten af én person. Hvis køretøjet undtagelsesvis lastes hårdere, vil dette i reglen gælde en hel tur. Føreren bør derfor have mulighed for at overskrive defaultværdien eller "bestille" et estimat.

En lastbils masse vil ændres ved lastning og losning undervejs, og lasten kan meget vel overstige køretøjets egenvægt. Der er behov for at vurdere, om lasten hensigtsmæssigt og tilstrækkelig hurtigt kan vejes automatisk på køretøjet, om føreren skal have adgang til at angive vægten af den aktuelle last efter standsning af køretøjet, eller om der alene skal ske et estimat i kalibreringsmodellen. I sidstnævnte tilfælde vil det også her som udgangspunkt formentlig være fornuftigt at anvende den senest estimerede værdi som default, hver gang køretøjet har gjort et ophold.

### k-værdierne

Faktoren  $k$  i formel [8] rummer dels et produkt fra en række faktorer, der relaterer sig til det aktuelle køretøjs motor og til det gear, køretøjet aktuelt anvender, dels faktoren  $\delta$ , der udtrykker hvor stor en del af motorens ydeevne, der aktuelt anvendes. Faktoren  $k$  er altså en størrelse, der helt beror på den øjeblikkelige køresituation. Ser man bort fra størrelsen  $\delta$ , er de indgående faktorer knyttet til køretøjets motor, differentiale, gearing mv. og bør altså kunne udtrykkes som en parameter, der er bestemt af gearvalget.

Når alle øvrige størrelser i formel [8] er kendt, kan faktoren  $k$  beregnes, også selv om de enkelte parametre, der indgår i  $k$ , ikke er fastlagt.

## Optimeringsmodulet

Det at bestemme den energimæssigt optimale hastighedsstrategi ved kørsel ad en rute, er, matematisk set, et ikke uspændende problem. Heller ikke, når rutens tracé er kendt, og der eksisterer en kørseldynamisk model. Problemet har da også kastet en del artikler af sig, hvoraf (Schwarzkopf & Leipnik, 1977) i reglen angives som *first-writer*.

De fleste artikler behandler delproblemer; navnlig optimeringen på en delstrækning, hvor der ikke optræder ændringer i hastighedsbegrænsningen, og hvor linjeføringens kurvatur kan negligeres, så der alene skal

tages højde for variationen i længdeprofilen. Selv under disse forenkede forudsætninger er problemet ikke trivielt.

Problemet kan forenkles ved at opdele ruten i delstrækninger, der kan optimeres hver for sig. Det er påvist, at man på en vandret, retlinet strækning kører mest energieffektivt ved at opretholde en konstant hastighed. Iagttagelsen kan udvides til også at gælde strækninger, der har en besædning, men konstant længdegradient, og strækninger, der har store horisontalkurver. (Chang & Morlok, 2005)

Man kan således betragte de mellemliggende delstrækninger isoleret og optimere dem med hensyn til passage af en bakke, eller tilpasning til en ændret hastighedsgrænse mv. På disse ændringsstrækninger gælder altså en begyndeshastighed og én sluthastighed, som kan fastlægges ud fra vejgeometri eller ud fra trafikale restriktioner. (Hooker, 1988) undersøger fire kørselssituationer og udleder generelle anbefalinger for en energieffektiv kørselsstrategi: a) *cruising*, altså kørsel, hvor den traditionelle fartpilot kan fungere, idet den optimale hastighed beror på køretøjets størrelse, motor mv., b) acceleration til *cruising*-hastigheden, c) kørsel mellem signalanlæg og d) kørsel på bakker.

Problemet kan betragtes som en programmeringsopgave, og første udfordring består da i at få fastlagt hvilke dele, der skal optimeres. Energiforbruget nedbringes naturligvis, når man sænker hastigheden, men i problemets kontekst ligger implicit, at merforbruget af tid ikke må blive arbitrært stort. Én måde at håndtere denne udfordring er at fastlægge et (realistisk) tidsforbrug, som ikke må overskrides. En anden måde er at fastlægge et bånd, inden for hvilket hastigheden tillades at variere (Fröberg, Hellström, & Nielsen, 2006). Alternativt kan man definere en objektfunktion, der vægter tids- og energiforbrug sammen i én fælles parameter, der skal optimeres. Herved reduceres problemet i princippet til at være en (sekvens af) lineær(e) programmeringsopgave(r). (Hellström et al., 2010)

Trods disse forenklinger, tilbagestår udfordringen, at hastighedsstrategien involverer beslutninger om tidspunkt for hastighedsændring og for gearskifte, og at hver af disse beslutninger kan træffes på et vilkårligt tidspunkt. Hver beslutning åbner for en uendelighed af kørselsmønstre, og der er behov for at behandle og sortere disse på en systematisk måde, der gør det muligt at finde det bedste – eller i det mindste et, der ligger tæt på det bedste.

På *Linköping Universitet i Sverige* har man arbejdet med en model, der medtager gearskifter, idet en række valg udelukkes, fordi de ikke leder mod det hastighedsniveau, der skal tilstræbes. (Hellström et al., 2010) *Virginia Tech Transportation Institute, USA*, betragter delstrækninger i mindre segmenter, der hver for sig beregnes i endnu mindre trin. Det påpeges, at beregningsomfanget er betydeligt, og at det derfor er en udfordring at få gennemført en fuld beregning ved brug af traditionelle algoritmer i løbet af den tid, det tager at gennemkøre et segment. I stedet foreslås brug af en heuristisk algoritme. Ud over at spare beregningstid håndterer denne algoritme også gearskift. (Park et al., 2012), (Park, Rakha, Ahn, & Moran, 2011).

Begge metoder synes at pege mod brugbare løsninger af det overordnede problem.

Samlet set, er vurderingen, at der er arbejdet med en stor del af de udfordringer, der er knyttet til optimeringsmodulet. Der udestår stadig nogle, men den store udfordringer skønnes at være dels at få sammensat delløsningerne, så de udgør en konsistent model, dels at sikre, at denne model også kan afvikles under kørsel.

## Konklusion

Projektet har på mange måder være meget lærerigt. Dels med hensyn til at skabe forståelse for den bagvedliggende teori i sammenhæng med den fysiske forståelse for køretøjets bevægelse. Dels med hensyn til potentialet for brændstofbesparelsen ved at lade vejens vertikale forløb indgå som en forudsigelig størrelse, så en mere hensigtsmæssig fartgivning kan opnås.

Størrelsen af besparelsen varierer meget i både litteraturen og i projektets egne undersøgelser. Selv de resultater, der påviser den laveste opnåelige besparelse, bør dog give anledning til at arbejde videre med projektets idé. Der er et klart potentiale for energibesparelser ved at tage hensyn til vejens tracé, også hvor geometrien kun varierer beskedent. Blot en enkelt bakke over et længere stræk bonner tydeligt ind på brændstofforbruget, hvis ikke den tilgås på den rette måde. En person, som kører meget bevidst med hensyn til vejens tracé, vil kunne opnå lignende resultat på den enkelte bakke, men det er næsten umuligt at følge en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi over længere tid. Derfor skal den energieffektive hastighedsstrategi indbygges i en fartpilot.

Forfølges projektidéen kan de nødvendige algoritmer og grunddata genereres, så Danmark vil kunne indføre en generel energieffektiv kørsel. Det er en udfordring for os alle, så producenterne af fartpiloter får åben adgang til udviklingsresultaterne.

Der eksisterer et stort antal kombinationer af gearkasser og køretøjer. Dette har indflydelse på den besparelse, der kan opnås. Det stiller samtidig store udfordringer med hensyn til at styre via en fartpilot og dermed optimere og reducere brændstof forbruget. Den bedste løsning, hvor en fartpilot indgår, fås ved at anvende et automatgear, der i sig selv er optimeret med hensyn til energieffektiv kørsel. Det traditionelle billede er, at automatgear bruger mere brændstof end samme køretøj med manuelt gear, men årsagen hertil er, at automatgear har været optimeret med hensyn til kørekomforten og ikke benzinforbruget. De store tyske bilproducenter har dog adskillige modeller på markedet, hvor benzinforbruget ved automatgear er lavere end deres manuelle pendant uden tab af komfort. Med et fortsat fokus på at reducere energiforbruget, vil vi se en fortsat udvikling mod at eliminere den menneskelige faktor ved gearskift. Elbiler og hybridbiler er allerede i dag typisk med automatgear.

Nogle andre faktorer, som spiller ind på køretøjets forbrug, er henholdsvis dækkenes rullemodstand og ikke mindst vindpåvirkningen. Der kan forventes en løbende forbedring og tilpasning af designet, men ingen af disse parametre kan forventes ændret, så der kan ske en dynamisk tilpasning under kørslen – et automobil kommer aldrig til at udnytte vindforholdene, som et sejlskib, der krydser. Men med den tilgang, at man med udgangspunkt i den øjeblikkelige position og hastighed forsøger at optimere hastighedsvalget gennem en løbende kalibrering i forhold til skiftende ydre påvirkninger, kan der for ethvert bildesign ske en relativ optimering.

Skal dette kunne virke bedst muligt, er det nok ikke uvæsentligt, at det ikke kræver alt for mange oplysninger fra andre sensorer, end dem der kan tilgås via OBD systemet i køretøjet. En fortsat bearbejdning af de opstillede teoretiske modeller, vil kunne komme virkeligheden nærmere. De køretøjsafhængige og de stedafhængige kan være både vanskeligt at skaffe; men yderligere simuleringer og testkørsler kan benyttes til at udpege betydningen af de enkelte parametre. Ikke mindst kan supplerende undersøgelser belyse, hvor følsomme mulige brændstofbesparelser er overfor usikkerheder ved bestemmelse af parametrene. Herved kan modellernes datakrav eventuelt forenkles på et oplyst grundlag.

Den fundne litteratur rummer en række studier, der beskæftiger sig med muligheder for at spare energi ved farttilpasning af lastbiler på højklassede veje. Udfordringerne og potentialet på det sekundære vejnet er derimod endnu ikke opdyrket. Selv om litteraturens modeller operationaliseres, er der altså også på dette felt stadig behov for at supplere med viden og forsøg, før det er muligt at udvikle en energieffektiv fartpilot, der kan benyttes på den broderpart af vejnettet, der ikke er motor(trafik)vej.

En anden væsentlig forudsætning for en realistisk udvikling af en energieffektiv fartpilot er et godt kortgrundlag. Projektet har vist, at kortgrundlaget ikke blot er til stede i Danmark, men har en kvalitet, som overgår, hvad man generelt finder på markedet i et internationalt perspektiv. Man kan få Z-koordinaten med en middelfejl på under 6 cm, og X,Y-koordinaterne endnu bedre. Derimod eksisterer der i dag ikke præcise rumlige vejdata. Nøjagtigheden, der kan opnås, er enestående på internationalt niveau og gør det

blandt andet overkommeligt at benytte en fartpilot, som her beskrevet, på hele det sekundære vejnet. Det vil kunne bringe Danmark i førertrøjen på området.

Forprojektet om en energieffektiv fartpilot har givet en klar indikation af, at der er meget at spare ved en korrekt fartgivning af et køretøj. Der findes mange mere eller mindre seriøse bud på, hvor og hvordan man i øvrigt kan spare brændstof i transportsektoren. De fleste af disse besparelser er vanskelige at opnå. De gælder kun under særlige omstændigheder eller er relateret til udformningen af køretøjet og udstyr i køretøjet. En energieffektiv fartpilot vil kunne få et anderledes bredt *impact*, fordi den retter sig mod ethvert køretøj i enhver situation, og fordi der vil være tale om et stykke forholdsvis billigt ekstraudstyr, som føreren selv vil opleve gevinst ved at benytte.

Hidtidige forsøg med fartpiloter har primært haft salg af et produkt som den primære motivationsfaktor. Målet om at reducere CO<sub>2</sub> udledningen kræver en anden og mere åben tilgang til problemstillingen, omend også denne indebærer store udfordringer.

## Referencer

- Ahn, K., Rakha, H. A., & Moran, K. (2011). Eco-Cruise Control: Feasibility and Initial Testing. In *Submitted for peer review at the 90th Transportation Research Board Annual Meeting* (p. 16).
- Chang, D. J., & Morlok, E. K. (2005). Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption. *Journal of Transportation Engineering*, 131(3), 173–182. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:3(173)
- Energistyrelsen. (n.d.). Transportens energiforbrug og CO<sub>2</sub>-emissioner. Retrieved from <http://www.ens.dk/klima-co2/transport/transportens-energiforbrug-co2-emissioner>
- Evans, L. R., Maclsaac, J. D. J., Harris, J. R., Yates, K., Dudek, W., Jason, H., ... Salaani, M. K. (2009). *NHTSA Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2 – Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear, and Vehicle Fuel Economy* (p. 153). Springfield, Virginia. Retrieved from [http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Vehicle Research & Test Center \(VRTC\)/ca/Tires/811154.pdf](http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Vehicle%20Research%20&%20Test%20Center%20(VRTC)/ca/Tires/811154.pdf)
- Fröberg, A., Hellström, E., & Nielsen, L. (2006). Explicit fuel optimal speed profiles for heavy trucks on a set of topographic road profiles. *SAE Technical Paper*, 1–1071.
- Hellström, E., Ivarsson, M., Åslund, J., & Nielsen, L. (2009). Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09670666108001251>
- Hellström, E., Åslund, J., & Nielsen, L. (2010). Design of an efficient algorithm for fuel-optimal look-ahead control. *Control Engineering Practice*, 18(11), 1318–1327. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.12.008>
- Hethey, J., Kofoed-Wiuff, A., & Lindboe, H. H. (2011). *Scenarier for transportsektorens energiforbrug i Danmark* (p. 139). Copenhagen. Retrieved from <http://www.ea-energianalyse.dk>
- Hooker, J. N. (1988). Optimal driving for single-vehicle fuel economy. *Transportation Research Part A: General*, 22(3), 183–201. doi:10.1016/0191-2607(88)90036-2

- Kjems, E., Bolet, L., Plausinaitis, D., & Staunstrup, J. K. (2013). *Energieffektiv fartpilot - forprojekt* (p. 69). Aalborg. doi:ISP-Skriftserie; Nr. 02.
- Meyer, J. (2007). *Engine Modeling of an Internal Combustion Engine With Twin Independent Cam Phasing*. The Ohio State University. Retrieved from [https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/24538/Meyer\\_Jason\\_Honors\\_Undergraduate\\_The\\_sis.pdf](https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/24538/Meyer_Jason_Honors_Undergraduate_The_sis.pdf)
- Nielsen, R. B., & Laugesen, M. S. (2013). *Energieffektiv hastighedstilpasning ved brug af fartpilot*. Aalborg University. Retrieved from [http://projekter.aau.dk/projekter/da/studentthesis/energieffektiv-hastighedstilpasning-ved-brug-af-fartpilot\(65bd99e4-1591-418b-a8d4-4c448ebf7ffe\).html](http://projekter.aau.dk/projekter/da/studentthesis/energieffektiv-hastighedstilpasning-ved-brug-af-fartpilot(65bd99e4-1591-418b-a8d4-4c448ebf7ffe).html)
- Park, S., Rakha, H., & Ahn, K. (2012). Predictive Ecocruise Control System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Retrieved from <http://trb.metapress.com/index/418274Q4P81JP672.pdf>
- Park, S., Rakha, H., Ahn, K., & Moran, K. (2011). Predictive eco-cruise control: Algorithm and potential benefits. ... *System (FISTS), 2011 IEEE* .... Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5973639](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5973639)
- Sahlholm, P., & Johansson, K. H. (2010). Road grade estimation for look-ahead vehicle control using multiple measurement runs. *Control Engineering Practice*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066109001804>
- Sahlholm, P., & Wanglund, K. (2009). Comparison of Road Grade Estimation Results Based on GPS Position and Velocity Data. *16th ITS World Congress and Exhibition on* .... Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=908441>
- Schwarzkopf, A., & Leipnik, R. (1977). Control of highway vehicles for minimum fuel consumption over varying terrain. *Transportation Research*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041164777900934>
- Song, G., Yu, L., & Wang, Z. (2009). Aggregate Fuel Consumption Model of Light-Duty Vehicles for Evaluating Effectiveness of Traffic Management Strategies on Fuels. *Journal of Transportation Engineering*, 135(9), 611–618. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000037
- Vejdirektoratet. (2012, October 1). Grundlag for udformning af trafikarealer. København: Vejdirektoratet. Retrieved from <http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?t=/V1/Navigation/Tillidsmandssystemer/Vejregler/Anlaegsplanlaegning/faelles+for+by+og+land/&sb=date&docId=vd-anleag-vejgeo-grundlag2-full>

