

Simulering af busser og lastbilers energiforbrug og emissioner med SEEK-modellen

Civilingeniør Flemming Bak, Teknologisk Institut, Energi / Motorteknik

Indledning

SEEK er et beregningsprogram til simulering af energiforbrug og emissioner for køretøjer med forskellige sammensætninger af motor, transmissionssystem, energilagring og bremseenergi genvinding for forskellige hastighedsprofiler. Det blev i første omgang udviklet med støtte fra Færdselsstyrelsen og Hovedstadens Trafikselskab til at regne på busser, senere har Trafikministeriet støttet med en udvidelse til også at regne på lastbiler.

SEEK står for **S**imulering af **E**nergiforbrug og **E**missioner med variabel **K**øretøjskonfiguration.

Mange producenter af busser og komponenter har tilsvarende meget specialiserede programmer, der benyttes til at optimere deres produkter. Teknologisk Institut udvikler p.t. et program for Banestyrelsen og DSB, der kan simulere deres tog, dette baserer sig på et program for IC3-toget udviklet af Ken Friis Hansen, Teknologisk Institut, under eksamensprojekt på Laboratoriet for Energiteknik, DTU.

Under et forprojekt til SEEK blev der ikke fundet programmer, som det var muligt at overtage eller købe i en åben version. Valget er derfor blevet at opbygge et program baseret på den viden, der findes på Teknologisk Institut, bl.a. opsamlet gennem en lang række forsøgs- og demonstrationsprojekter^{1,2,3,4,5}. SEEK kan frit distribueres til interesserede.

Baggrund

Programmets basisidé er at kunne sammenligne forskellige køretøjer under kendte driftsforhold. SEEK skal bruges til at vurdere CO₂-emissionen (energiforbruget) og emissionerne af NO_x, HC, CO, SO₂ og partikler, og det kan udbygges til at beregne andre emissioner i den udstrækning, der er data til rådighed.

De resultater, som SEEK beregner, er vanskelige at komme frem til under praktiske forhold. Det er ikke muligt at måle alle parametre under kørsel, og det er vanskeligt at gennemkøre en strækning på samme måde flere gange, hvilket er nødvendigt for at kunne sammenligne flere køretøjer.

SEEK følger samme hastighedsprofil hver gang. Oplysninger om hastighedsprofilen kan suppleres, bl.a. med vejens stigning (bakker) og antal passagerer, disse data kaldes samlet for en driftsprofil.

Hybridsystemer ventes fremover at blive mere almindelige, især til bybusser, fordi de ved at udnytte motoren bedre og genvinde bremseenergien kan spare brændstof, og fordi det bliver muligt at køre korte strækninger uden forbrændingsmotor, og uden at det går ud over kørekomforten eller køreegenskaberne. For at kunne vurdere fordelene ved et alternativt transmissionssystem er et program som SEEK nødvendigt.

I øjeblikket sættes kravene til emissionerne fra motoren, hvilket er fornuftigt set ud fra det synspunkt, at så kan motoren benyttes til forskellige køretøjer uden test af hvert enkelt køretøj. Men det endelige mål er at opnå *et helt køretøj* med lave emissioner og brændstofforbrug for en aktuel driftsprofil, og det kan kun et program som SEEK, eller praktiske målinger, vurdere.

SEEK har brugergrænseflader, der gør det muligt for f.eks. kommuner, trafikselskaber, busentreprenører og andre interesserede selv at gennemføre beregninger og sammenligne eksisterende køretøjer eller som basis for valg af nye; resultaterne kan også benyttes til lave grønne regnskaber for et trafikselskab eller for en kommune.

Udover disse muligheder vil resultaterne også kunne benyttes som input til andre edb-programmer, f.eks. TEMA, som er udviklet af COWI for Trafikministeriet eller til DMU's beregninger på det internationalt udviklede program COPERT, som benyttes til at beregne de samlede emissioner fra transportsektoren.

Beregningsmetode

Programmets grundlag er følgende hoveddata:

- driftsprofil (hastighed, evt. antal passagerer eller godsvægt)
- køretøjsdata (vægt, frontareal, Cw-værdi, dækkenes rullemodstand)
- motordata (effekt, omdrejningsområde)
- brændstoftype
- brændstofforbrug og emissionsværdier ved forskellige motorbelastninger
- transmission (gearinger, gearskift, omdrejningstal)
- energilager (størrelse, max. effekt)
- lagringsstrategi (lagring af bremseenergi, lagring af overskudsenergi)
- virkningsgrader for evt. partikelfilter og katalysator.

Hvilke data, der er nødvendige, og som anvendes i programmet, afhænger selvfølgelig af det valgte køretøj. Brugeren har selv mulighed for at ændre på de data, der er vist med kursiv. Desuden er det muligt at tilføje katalysator eller partikelfilter på diesekøretøjerne^{6,7}.



Figur 1: Skærbillede, hvor alle inddata kan vælges og korrigeres.

Programmet gennemfører beregninger af forbrug og emissioner for små tidsstep på basis af køretøjets data og hastighed. I hvert tidsstep antages forholdene at være konstante, såkaldte kvasistationære beregninger.

SEEK regner baglæns fra den angivne hastighed. Køretøjets hastighed bestemmes af hastighedsprofilen, hvilket betyder, at hjulenes omdrejningstal er kendt. Transmissionssystemet bestemmer derefter motorens omdrejningstal. Ændringen i køretøjets hastighed (acceleration / deceleration) og køremodstandene bestemmer den effekt, som motoren skal yde. Dermed kendes såvel motorens effekt som omdrejningstal, og brændstofforbrug og emission kan beregnes.

Hvis køretøjet er forsynet med et lager, bestemmer kontrolstrategien, om motoren også skal levere energi til lageret, eller om lageret skal levere energi til køretøjet, og hvor megen energi der kan lagres under en opbremsning.

I hvert tidsskridt beregnes:

- Energiforbrug til
 - acceleration
 - vindmodstand
 - rullemodstand
 - bremsning
 - stigninger
 - tab i transmissionssystem
 - til generator, kompressor og blæser
- Effekten tilført fra:
 - motoren
 - lageret
- Emissionerne
 - NO_x
 - CO
 - HC
 - SO₂
 - CO₂
 - partikler

Ved at summere energitabene, brændstofforbruget og emissionerne for de enkelte tidsskridt beregnes det samlede tab, brændstofforbruget og den samlede emission for den givne driftsprofil (rute). Resultaterne kan derefter ses på skærmen eller udskrives på papir sammen med alle forudsætninger for beregningerne. Et eksempel på udskrift fremgår af bilag A.

På basis af disse resultater kan f.eks. to køretøjer, to energilagere eller to lagringsstrategier sammenlignes under samme driftsforhold. Samme køretøj kan også testes på to forskellige driftsprofiler, derved kan samme køretøjs egnethed vurderes på en anden rute. SEEK vil således kunne benyttes til at optimere et køretøj til en bestemt rute, f.eks. ved at vælge lagerets størrelse.

Status for programmet

SEEK kan regne på:

- en dieselbus med EURO I, II eller III motor uden / med katalysator eller partikelfilter
- en hybridbus (DAB-bus, ligesom i Aalborg med $\lambda=1$ benzinmotor og 3-vejskatalysator)
- en LPG-bus ($\lambda=1$ og 3-vejskatalysator)
- en CNG-bus (lean burn og oxidationskatalysator)

- en 10t lastbil (til distributionskørsel)
- en 25t lastbil
- en 48t sættevogn

Lastbilerne kan vælges med og uden hænger, med EURO I, II eller III motor og med / uden katalysator eller partikelfilter.

Som driftsprofiler benyttes bl.a. linie 5 i København, to langtursprofiler for lastbiler og to profiler for bydistribution⁸ samt en profil for Aalborg Hybridbus¹. Nogle af de profiler, som DTU har opmålt for bybusser i København findes også. Desuden vil det være muligt at køre efter Braunschweig-cyklen, der er en kunstig profil, som universitetet i Braunschweig har udviklet baseret på målinger.

Verifikation

Et beregningsprogram som SEEK vil aldrig kunne udføre en eksakt beregning for et køretøj eller en driftsprofil. Det er derfor væsentligt at verificere programmet gennem sammenligning med målinger. Da de væsentligste beregninger udføres med de samme rutiner, uanset køretøjstype, er det tilstrækkeligt at verificere én type. Ideelt udføres verifikationen i tre niveauer:

Effektbehov: Beregningen af effektbehovet til fremdrift af køretøjet er ens for alle køretøjer og uafhængig af transmissionssystemet. Hvis effekten ikke beregnes rigtigt, vil resten af beregningerne heller ikke blive rigtige.

Transmissionssystemet er bestemmende for motorens omdrejningstal. Det er væsentligt, at omdrejningstallet bliver korrekt, således at motoren er i det rigtige belastningspunkt.

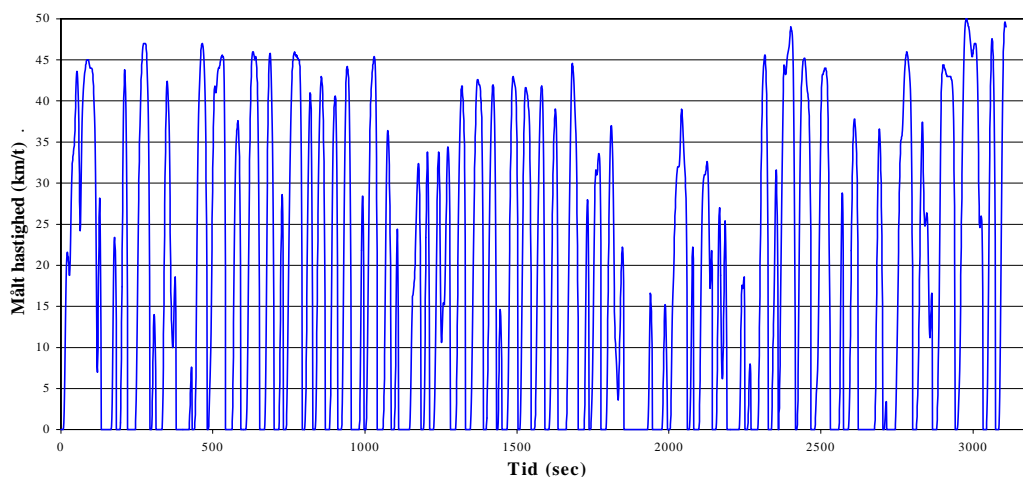
Brændstofforbrug og emissioner er slutresultatet. Det er muligt at sammenligne det beregnede brændstofforbrug med de forbrug, der måles af busselskaberne. Det er kun muligt at lave sammenligning af emissionerne ved at lave løbende målinger under hele turen inklusiv måling af brændstof- eller luftforbrug.

I det følgende gennemgås de verifikationer, som det har været muligt at gennemføre for SEEK-programmets resultater, der er især benyttet målinger, som Teknologisk Institut har gennemført på en HT-bus på linie 5 i København.

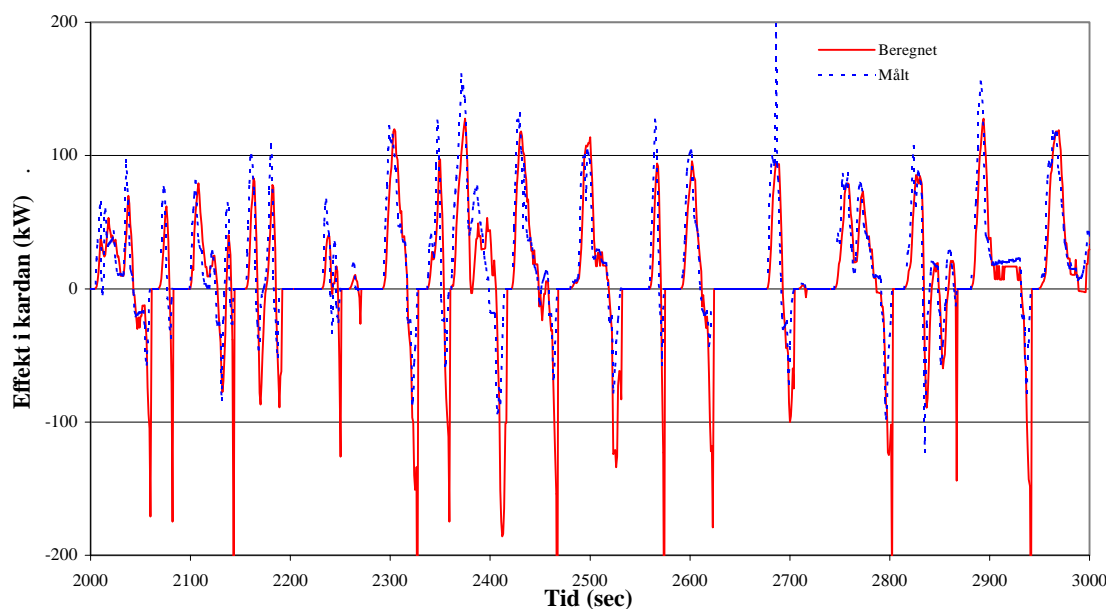
Effektbehov

Der har været gennemført måleserier for Færdselsstyrelsen på busser i fast rute, hvor der udover hastighed også har været målt effekt i kardanakslen og motoromdrejningstal.

Efterfølgende figur 2 viser hele hastighedsforløbet for linie 5 i København. Figur 3 viser det målte og det beregnede effektbehov. Som det ses, beregnes meget større *negative* effektbehov, end der måles på kardanakslen. Det skyldes, at bussens bremses overtager arbejdet og dermed reduceres den negative effekt i kardanen. Dette har dog ingen indflydelse på de beregnede resultater, da der regnes med fuel cut off ved påløb. Som det ses af kurverne for den positive del af effekterne, er der god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede værdier. Forskellene kan skyldes, at antallet af passagerer (og dermed busvægten) er anderledes end antaget i programmet, eller at en bakke (hvilket ikke er inkluderet i driftsprofilen) influerer på det målte effektbehov.



Figur 2: Hastighedsprofil for linie 5 i København.



Figur 3: Det målte og det beregnede effektbehov vist i et udsnit og afskåret ved -200 kW. Beregningerne er gennemført for en bus med 13 passagerer.

Der er desuden foretaget en summation af det positive effektbehov, målt og beregnet. Hvis der er 13 passagerer, beregner SEEK 8,9% for lidt, hvis der er 33 passager beregnes 0,2% for lidt i forhold til det målte.

Da der ikke foreligger en tælling af passagerantallet, vurderes dette at være tilstrækkelig korrekt.

Transmissionssystemet

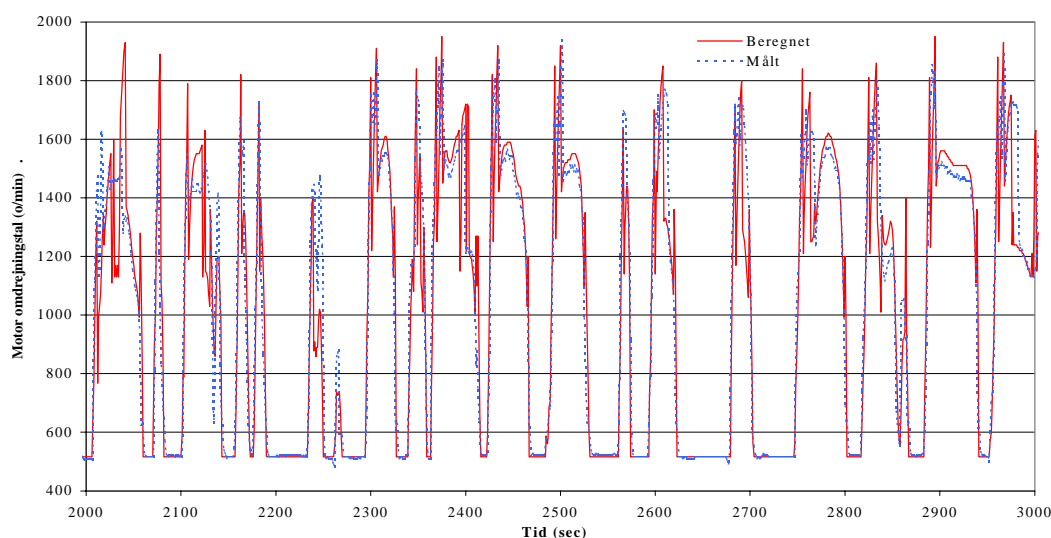
For at verificere transmissionssystemet, specielt gearkassen er der lavet en sammenligning mellem målt og beregnet motoromdrejningstal.

Automatgearet har to forskellige skifteprogrammer (normal og økonomi) hver med forskellige skifteomdrejningstal afhængig af :

- lav belastning
- normal last
- fuldlast
- kick down

I virkeligheden har chaufføren stort set enten sluppet speederen eller trådt speederen helt i bund og aktiveret kick down-kontakten, derfor benyttes kun lav-belastning eller kick down funktionerne i praksis.

Nedenstående figur 4 viser sammenhængen mellem målt og beregnet motoromdrejningstal for samme tidsområde som i figur 3.



Figur 4: Målt og beregnet motoromdrejningstal, for linie 5.

Der er også lavet en summation af målt og beregnet omdrejningstal. Sammenligningen viser en afvigelsen på 2,3% for 33 passagerer.

Konklusionen er, at med de målinger, der er til rådighed, giver modellen i SEEK en overordentlig god overensstemmelse med virkeligheden for motorbelastning og omdrejningstal.

Brændstofforbrug og emissioner

Det er muligt at sammenligne brændstofforbrugene for de mest almindelige køretøjer ved at sammenligne den beregnede sum af forbrug med det, der måles i praksis.

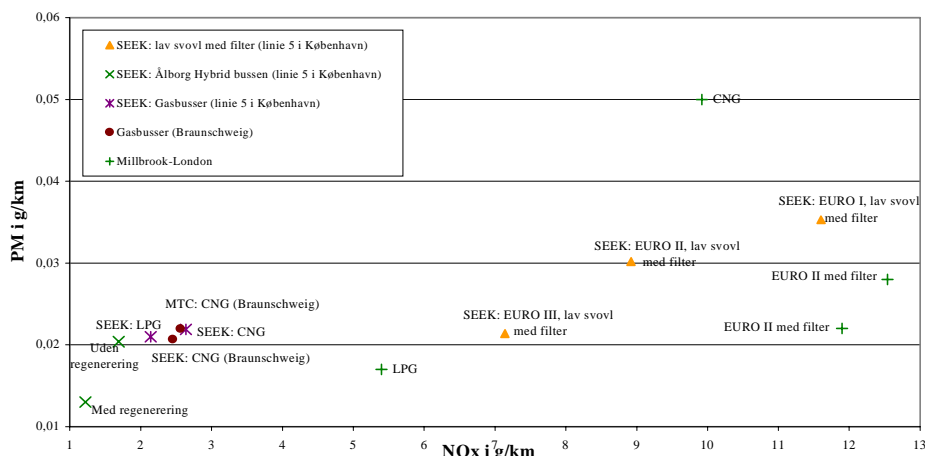
Dieselbusserne i København kører ifølge HT i gennemsnit ca. 1,96 km/l. SEEK beregner for Linie 5 kørecyklen i København til: 1,99 km/l for EURO II-bussen og 1,94 km/l for EURO I. Forventningen til EURO III-bussen er, at forbruget vil stige for at reducere NO_x. Vore forventninger er et forbrug på 1,97 km/l. Alle beregninger er med 13 passagerer, som er middel belægning på busserne i HT-området.

For LPG-busserne i København måles ca. 1,11 km/l i snit, dette opnås også med SEEK.

Aalborg Hybridbusser kører på benzin, de kører ca. 1,4 km/l. SEEK beregner 1,5 km/l, når der køres med regenerering af bremseenergien. Når der køres uden regenerering beregnes der 1,28 km/l.

CNG-busserne er målt i Sverige efter Braunschweig-cyklen. Målingerne giver 1396 g CO₂ pr. km, beregningerne giver 1350 g CO₂ pr. km. Det er her valgt at opgive forbruget i CO₂, da det er den værdi, der bruges i den svenske rapport⁹.

Emissionsresultaterne er vanskelige at verificere. Nedenstående figur 6 viser partikelemissionerne plottet som funktion af NO_x, og emissionen for de forskellige busser med forskelligt efterbehandlingsudstyr på dieselbusserne.



Figur 5: Resultater af beregninger med SEEK. Emissionerne partikler (PM) vises som funktion af NO_x. Resultaterne er for diesel med lavt svovlindhold (brændstoffspekifikationen for 1999) samt for gasbusserne og Aalborg Hybridbussen. Desuden viser plottene et par af de resultater, der findes i litteraturen: CNG-gasbussen målt efter Braunschweig-cyklen af MTC⁹ og resultater udført af Millbrook¹⁰ for to dieselbusser (city diesel), en LPG $\lambda=1$ og en CNG Lean Burn-bus - begge med katalysator. Disse er kørt efter en kørselscyklus for London.

Konklusionen er, at resultaterne fra SEEK giver en god overensstemmelse med til rådighed værende målinger, og at modellen kan benyttes til også at beregne på fremtidige køretøjer, som måske endnu ikke er fremstillet.

Anvendelse og muligheder

Et par af de mest nærliggende opgaver, som SEEK kan vurdere, er f.eks., hvordan LPG-busser forurener i forhold til de nuværende og de fremtidige dieselbusser. Nogle af resultaterne fremgår allerede af ovenstående figur 5, men kun for NO_x og partikler. I nedenstående tabel 1 vises alle de beregnede emissioner.

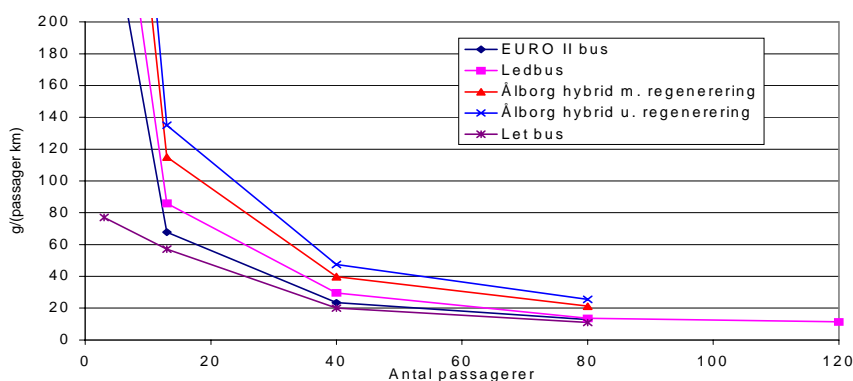
Linie 5	CO ₂	NO _x	HC	CO	PM	SO ₂
	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km
EURU II	1280	9,4	1,0	2,1	0,50	0,041
EURO II med kat.	1280	8,9	0,26	0,2	0,41	0,041
EURO II med filter	1280	8,9	0,26	0,2	0,03	0,041
EURO III med filter	1300	7,1	0,22	0,18	0,021	0,042
LPG	1460	2,1	0,13	2,4	0,021	0,0020

Tabel 1: Emissioner beregnet for linie 5 i København. Dieselbrændstoffet er lavsvovl diesel. Der findes endnu ikke tilgængelige måleresultater for en EURO III dieselbus. Beregningen af denne

bus er baseret på forventninger set ud fra de kendte grænseværdier.

Resultaterne i tabel 3 viser, at der er et meget stort potentiale for reduktion af partikelemissionen ved at montere filtre på EURO II busserne, de når næsten LPG-emissionsniveauet. Når EURO III busserne med filter kommer på markedet, vil den væsentligste fordel ved LPG-busserne være deres lave NO_x-emission, hvorimod man må acceptere en højere CO-emission. Tabellen viser også, at de laveste emissionsværdier (de grå felter) afhænger af, hvilken bus der er tale om; den ”bedste bus” afhænger altså af, hvad man prioriterer.

Nedenstående figur 6 viser brændstofforbruget (CO₂-emissionen) pr. passager-km for forskellige busser som funktion af antal passagerer i busserne.



Figur 6: Beregnet CO₂-emission for en almindelig bus (EURO II), en ledbus, en let bus samt Aalborg hybridbusserne med og uden bremseregenerering beregnet efter Aalborg driftsprofilen.

Kurverne viser, at hybridbusserne har et større forbrug end dieselbusserne, hvilket skyldes delvis deres større vægt (1020 kg mere), men også at dieselmotorer har en højere virkningsgrad end benzinmotorer. Disse forhold kan ikke opvejes af bremseregenereringen. Fordelene ved ledbussen kommer først frem, når der er flere passagerer, end der kan være i en almindelig bus. Fordelene ved en let bus aftager, når passagerantallet stiger, hvilket er naturligt, da bussens vægt udgør en mindre andel.

Tabel 2 viser, for EURO II med katalysator, hvilken betydning det har at lave busgader eller grøn-bølge for busser. Det er simuleret ved at fjerne hvert andet stop i city-driftsprofilen.

EURO II med kat.	CO ₂	NO _x	HC	CO	PM	SO ₂
	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km
Linie 5 – city	1510	10,1	0,31	0,25	0,49	0,048
Linie 5 - grøn city	1130	7,9	0,25	0,20	0,40	0,036
Besparelse i %	25	22	19	20	18	25

Tabel 2: Emissioner beregnet for en EURO II bus, for city delen af linie 5 samt for den samme strækning, hvor hvert andet stop er fjernet, nederst besparelsen i %.

Tabellen viser, at der er væsentlige besparelser at hente ved at reducere det antal gange en bus må stoppe, og det er besparelser, som vil være gældende, også selvom der senere indsættes mindre forurenende busser.

Disse tre eksempler viser nogle af de muligheder, der er for at udnytte SEEK med henblik på at vurdere emissionsforhold og brændstofforbrug for forskellige busser og forskellige ruter.

Udviklingen stopper ikke med den nuværende udgave. P.t. arbejdes der med at fremstille modeller for en ledbus, en let bus og for en ethanoldrevet bus, som udføres i forbindelse med projekter for Færdselsstyrelsen^{11,12}.

Men der vil altid komme nye ideer frem til kombinationer af motorer, brændstoffer, transmissions-systemer og energilagre, som kan reducere brændstofforbruget og / eller emissionerne for køretøjer med forskellige driftsforhold. Der vil derfor være et behov for at opdatere og udvide modellen fremover, bl.a. som følge af indførelse af strengere krav til motorenes emissioner (EURO III og IV).

En af de tydeligste svagheder i den nuværende udgave af SEEK er det begrænsede antal driftsprofiler, specielt for lastvognskørsel. Det ville forbedre brugerens muligheder for at finde et repræsentativt kørselsmønster og dermed få repræsentative resultater, hvis SEEK indeholder flere forskellige driftprofiler. Den moderne GPS-teknologi har medført, at opmåling af driftsprofiler er blevet væsentligt enklere.

Konklusion

Motorteknik på Teknologisk Institut har i edb-programmet, SEEK, fået mulighed for at indbygge megen af den viden om motorer, køretøjer og emissionsforhold, som er opbygget gennem de sidste år.

Programmet er udført, så det kan køres fra moderne pc'er med en let tilgængelig brugergrænseflade for de væsentligste data og parametre. Det er dermed blevet muligt for mange at udnytte den opbyggede viden til at bestemme brændstofforbrug og forurening fra forskellige køretøjer.

Verifikationerne af SEEK viser, at det er muligt at lave troværdige analyser på busser og lastbiler, desuden vil det være muligt at udbygge programmet med endnu ikke eksisterende køretøjer og dermed opnå en god prognose for brændstofforbrug og emission. Det er også muligt at analysere konsekvenserne af omlægning af en rute eller nedlæggelse af stoppesteder.

Henvisninger:

- 1) Hybridbusser i Aalborg
- 2) LPG-busser i København
- 3) CNG bus i Vejle
- 4) Muligheder for miljøforbedringer af dieselskøretøjer
- 5) 5-bus projektet
- 6) Edb-program SEEK, 1999.02.25
- 7) Edb-program SEEK Lastbilversion, 1999.03.30.
- 8) Kortlægning af driftsprofiler

- 9) AB Svensk Bilprovning Motortestcenter, rapport Nr. MTC 9405 B
- 10) An experimental investigation of affordable alternative fuel and exhaust aftertreatment options for urban buses, Simon J.Brown, London Transport Buses
- 11) Lette busser og lette komponenter til busser
- 12) Ethanolrevne busser

Bilag A: eksempel på udskrift

SEEK

Program version 1.1.4 1999
Teknologisk Institut, Motorteknik, 8000 Århus C

Beregningerne er gennemført af
Flemming Bak, Teknologisk Institut den 16-07-99

Beregningsbaggrund:

Data for bussen:	Diesel EURO II
Vægt:	11400 kg
Rullemodstand:	0,006
Frontareal:	8 m ²
Vindmodstand:	0,9
Antal passagerer:	13
Antal sæder:	45
Motor:	EURO II diesel - 180 kW
Gear:	ZF 4 HP 500 gear - standard program
Lager:	Intet
Brændstof:	Ultra let diesel
Efterbehandlingsudstyr:	Ingen
Driftsprofil:	Linie 5 - København

Resultater:

Strækningsslængde:	15,7 km
Køretid:	52,0 min
Gennemsnitshastighed:	18,1 km/t
Antal stop (over 5 s):	58

	kg	g/km	g/(passager km)	g/(sæde km)
Br.forbrug	6,45	411	31,6	9,13
CO ₂	20,1	1280	98,6	28,5
NO _x	0,150	9,58	0,737	0,213
HC	0,0131	0,836	0,0643	0,0186
CO	0,0293	1,87	0,144	0,0415
Partikler	0,00753	0,479	0,0369	0,0107
SO ₂	0,00645	0,411	0,0316	0,00913
	MJ	MJ/km	MJ/(passager km)	g/(sæde km)
Energiforbrug	274	17,5	1,34	0,388
	l	km/l		
Brændstofforbrug	7,87	1,99		