

Trafikministeriet

TEMA

- En model for
transporters emissioner

Dokumentationsrapport

April 1996

Trafikministeriet

TEMA

- En model for
transporters emissioner

Dokumentationsrapport

April 1996

Dokument nr.: 25458-1
Revision nr.: 4
Udgivelsesdato: 1996-04-30

Udarbejdet: NBU/HUV/PGM
Kontrolleret: MMS
Godkendt: NBU

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	3
2	Overordnet modelstruktur og forudsætninger	11
2.1	Baggrund	11
2.2	Formål	12
2.3	Modellens opbygning	13
2.4	Forudsætninger og begrænsninger	13
2.5	Luftforureningskomponenter	15
2.6	Transportformer og transportmidler	17
2.7	Brugerspecificerede parametre - en oversigt	18
3	Personbiler	23
3.1	Metode og determinerende faktorer	23
3.2	Brugerspecificerede parametre	50
3.3	Beregningsgangen for energiforbrug og emissioner	51
4	Busser	53
4.1	Metode og determinerende faktorer	53
4.2	Ny eller gammel teknologi	54
4.3	Motor- og busfabrikat	54
4.4	Bus-/motor-valgmulighederne i TEMA-modellen	54
4.5	Data for de udvalgte busser	56
4.6	Emissionernes hastighedsafhængighed	57
4.7	Øvrige korrektioner	57
4.8	Brugerspecificerede parametre	59
4.9	Beregningsgangen for energiforbrug og emissioner	60
5	Fly	63
5.1	Metode og determinerende faktorer	63
5.2	Brugerspecificerede parametre	66

5.3	Beregningsgangen for energiforbrug og emissioner	67
6	Persontog	71
6.1	Metode og determinerende faktorer	71
6.2	Brugerspecificerede parametre	76
6.3	Beregningsgang for energiforbrug og emissioner	78
6.4	Kilder	79
7	Færger	81
7.1	Metode og determinerende faktorer	81
7.2	Brugerparametre	84
7.3	Beskrivelse af beregningsgangen	85
7.4	Kilder	87
8	Lastbiler og varebiler	91
8.1	Lastbiler	91
8.2	Brugerspecificerede parametre	99
8.3	Beregningsgang for energiforbrug og emissioner	99
8.4	Varebiler	102
9	Fragtskibe	107
9.1	Metode og determinerende faktorer	107
9.2	Brugerspecificerede parametre	110
9.3	Beregningsgang for energiforbrug og emissioner	111
10	Godstransport med Færger	113
10.1	Metode og determinerende faktorer	113
11	Godstog	115
11.1	Metode og determinerende faktorer	115
11.2	Brugerspecificerede parametre	117
11.3	Beregningsgang for energiforbrug og emissioner	117

1 Indledning

Denne rapport omhandler TEMA-projektet, der omfatter udvikling af en PC-baseret brugermodel til beregning af energiforbrug og emissioner fra transport under alternative forudsætninger (TEMA = Transporters Emissioner under Alternative forudsætninger).

Modellen kan anvendes beregne en konkret transports konsekvenser med hensyn til energiforbrug og luftemissioner på basis brugerens specifikation af en række centrale faktorer i relation til transportens udførelse, så som benyttede transportmidler, afstand, belægning, brændstof, hastighed, køremønster osv. Modellen kan behandle såvel person- som godstransporter.

Projektet er udført af COWI for Trafikministeriet. Arbejdet blev igangsat i september 1994 og samtidig med denne rapport foreligger Version 2.0 af modellen med tilhørende brugermanual. Der er tale om den første officielle version, idet tidligere versioner af modellen kun har været benyttet af projektgruppen og den tilknyttede følgegruppe. Det er hensigten, at denne første officielle version af modellen efterfølgende kan danne udgangspunkt for faglig debat og konstruktiv kritik, som vil kunne give input til revision af modelforudsætningerne samt udbygning med yderligere transportmidler i en senere version.

Hovedvægten i rapporten er lagt på en dokumentation af de anvendte forudsætninger og beregningstekniske procedurer. En kortfattet beskrivelse af modellens anvendelse er præsenteret i 'TEMA Version 2.0 - Brugermanual', COWI 1996.

Der er ikke foretaget nye måletekniske undersøgelser i forbindelse med projektet. Modellen er således alene baseret på bearbejdning og sammenstilling af eksisterende emissionsmålinger, simulationsberegninger og ekspertviden fra ind- og udland iøvrigt. Arbejdet er udført af et projekthold fra COWI bestående af Henrik Værø, Peter G. Madsen, Eva Willumsen (programmør) og Niels Buus Kristensen (projektleder), med bistand fra Spencer Sorensen, Laboratoriet for Energiteknik, og Richard Feller, Østrig.

Til projektet har der været tilknyttet en følgegruppe, der har ydet værdifulde bidrag gennem referencehenvísninger og løbende diskussioner på jævnlige møder i forløbet. Følgegruppen har bestået af:

- Michael Soetman (afløste Hans-Carl Nielsen pr. 1.10.95), Trafikministeriet
- Frida Vestergård (afløste Helga T. Thomsen pr. 1.1.95), Trafikministeriet
- Erik Iversen, Miljøstyrelsen
- Nic Michelsen, Statens Luftfartsvæsen
- Niels Anders Nielsen, Færdselsstyrelsen
- Lone Reiff, Vejdirektoratet
- Jesper Arkil, DSB
- Pia Berring (afløste Kristian Strand pr. 1.6.95), HT
- Poul Fejer Christiansen, FDM
- Ove Holm, Danske Vognmænd
- Niels Kilde, Risø.
- Morten Winther, Danmarks Miljøundersøgelser

Rapporten er struktureret som følger:

I den resterende del af dette kapitel præsenteres to eksempler med henblik på at illustrere modellens anvendelse.

Herefter præsenteres i Kapitel 2 først baggrund og formål for projektet samt et overblik over modelstrukturen. Dernæst beskrives modellens anvendelsesområde samt de generelle begrænsninger og usikkerhedsmomenter, der er knyttet til modellen. Endvidere gives en kortfattet oversigt for de væsentligste luftforureningsproblemer, der er knyttet til transportsektoren. På baggrund heraf samt ud fra pragmatiske overvejelser omkring datatilgængeligheden afgrænses de komponenter, det er valgt at medtage i TEMA. Afslutningsvist foretages en afgrænsning af de transportformer, der indgår i modellen samt en diskussion af brugerens konkrete valgmuligheder i modellen med hensyn til antallet og typerne af transportmidler inden for hver transportform.

I de resterende kapitler 3 - 11 dokumenteres beregningsgangen og forudsætningerne inden for hver transportform med en hovedopdeling på persontransport (Del A) og Godstransport (Del B).

To eksempler på modellens anvendelse

I det følgende præsenteres to regneeksempler, der skal illustrere anvendelsen af TEMA-modellen. Af hensyn til overskueligheden fokuseres der i beskrivelsen af resultaterne alene på energiforbruget, selvom TEMA tillige beregner emissioner af CO₂, CO, HC, NO_x, SO₂ og partikler.

Først gennemgås en personrejse fra København til Ålborg med hhv. fly, bil, tog og bus med henblik på at sammenligne energiforbruget for de alternative transportformer ved denne konkrete rejse. Derefter foretages tilsvarende en sam-

menligning af energiforbruget for hhv. lastbil- og banetransport for to gods-transporter.

Da hensigten blot er at illustrere nogle af modellens anvendelsesmuligheder, vil eksemplerne ikke komme nærmere ind på de underliggende forudsætninger eller valgte specifikationer af transportmidlerne. For en gennemgang af den konkrete brug af modellen henvises til ovennævnte Brugermanual.

I. Persontransport: København - Ålborg

Der betragtes en rejse for én person. Der er valgt at se på fire alternative måder at komme fra København C til Ålborg C på:

- a) Fly b) Personbil c) Tog d) Bus

Før energiforbruget kan beregnes skal der for hvert transportmiddel specificeres en række forudsætninger for den konkrete rejse med hver transportform (en tur), som er kort beskrevet nedenfor. En mere præcis angivelse af forudsætningerne for de konkrete ture i eksemplet er opstillet i bilagstabellerne.

Supplerende transportmidler

I praksis vil man for alle fire ture være nødsaget til at benytte supplerende transportmidler. For flyets vedkommende drejer det sig om transport til og fra henholdsvis Kastrup og Ålborg lufthavn, hvor der i eksemplet er valgt en taxa. For de tre øvrige må man i dagens situation benytte en færge for at krydse Storebælt eller Kattegat. Derimod er der ikke medtaget til- og frabringetransport for tog- og busturen.

Rutevalg

For bil-, tog- og busrejsen kan man vælge mellem forskellige ruter, mens det for flyrejsen er oplagt at vælge ruten mellem Kastrup og Ålborg lufthavn. Bilturen går i eksemplet over Kalundborg - Århus med hurtigfærgen Catlink, mens togturen går over Storebælt og bussen benytter Molslinien fra Sjællands Odde til Ebeltoft. Der tages således i beregningerne højde for, at den tilbagelagte strækning er forskellig for de fire alternativer. Typisk vil flytransport følge den mest direkte linie, og toget vil have en lidt længere strækning end vejtransporten, selv langs samme rute da banenettet går omkring alle stationsbyerne på vejen.

Transportmiddeltype

Inden for hver transportform skal der endvidere vælges ét blandt flere konkrete transportmidler. Eksempelvis kan der for personbiler vælges mellem otte forskellige bilmodeller af forskellig størrelse og alder samt mellem diesel- og benzinator med eller uden katalysator.

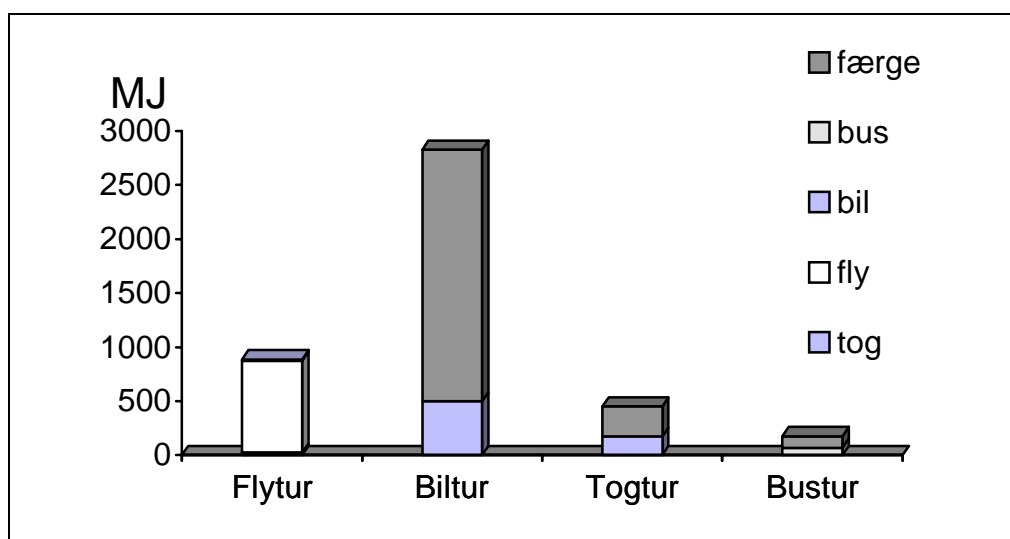
Belægning

Det er af stor betydning, om der er tale om eksempelvis en halvtom eller fuld bus, når man opgør energiforbruget pr. person, idet det samlede energiforbrug fordeles ligeligt ud på trafikanterne. I eksemplet er der for personbilen antaget, at føreren kører alene, mens der for de øvrige transportmidler er valgt typiske belægningsgrader.

Resultater

Energiforbruget (samt de seks emissionstyper) for de fire alternative ture er sammenlignet i fire tabeller: Totalt, pr. transportmiddelkilometer, pr. personkilometer samt pr. person for hele turen. I alle tabeller er resultaterne for hver tur underopdelt på de transportmidler, som turen er sammensat af. Ofte vil den mest relevante sammenligning af turene være energiforbruget pr. person.

En sammenligning heraf er illustreret i nedenstående figur. Energiforbruget er opgjort i MJ, hvor 1 MJ svarer til 0,030 liter benzin eller 0,028 liter diesel.



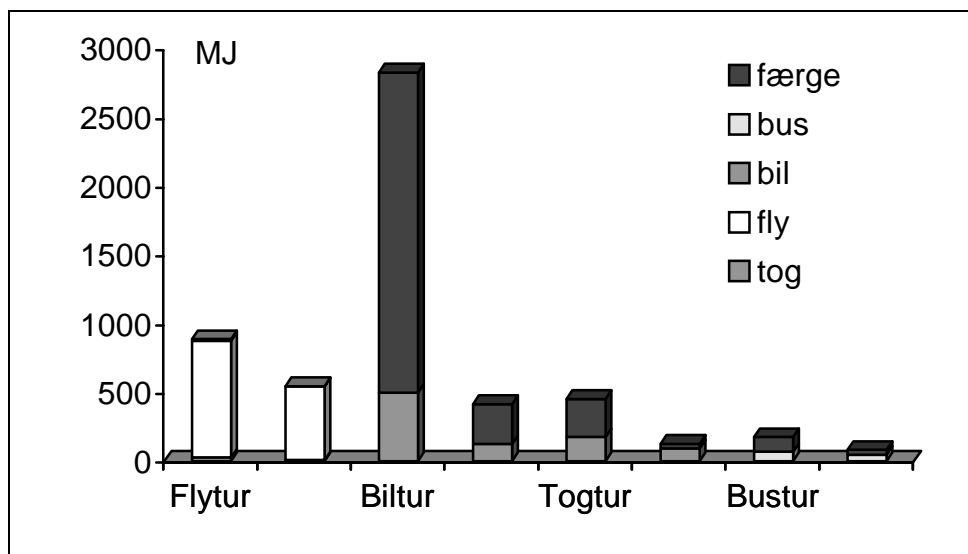
Figur 1.1 Energiforbrug pr. person ved typisk kapacitetsudnyttelse

Det ses, at bilturen resulterer i det klart højeste energiforbrug pr. person. Det er tre gange højere end for flyrejsen og ca. seks gange højere end togrejsen. Endelig kommer busturen ud som den mest energiøkonomiske med under det halve energiforbrug af togrejsen og kun en femtedel af personbilens.

Disse samlede resultater skyldes et samspil af en lang række faktorer, da sammenligning af transportformernes energiforbrug er en meget kompleks problemstilling. Den væsentligste faktor må dog siges at være transportmidlernes belægning. For personbilen ville energiforbruget pr. person kun være en fjerdedel, hvis der foruden føreren havde været tre passagerer, eksempelvis familiens

ferietur. Flyet kommer så relativt pænt ud, fordi flytrafikken ofte har en høj belægningsgrad, hvilket blandt andet hænger sammen med, at fly er en relativt dyr transportform.

For at illustrere passagerbelægningsens betydning er nedenfor gengivet det samme eksempel, men hvor der tillige er vist energiforbruget pr. person, hvis alle transportmidler har fuld kapacitetsudnyttelse.



Figur 1.2 Energiforbrug pr. person ved typisk og ved fuld kapacitetsudnyttelse

Det ses, at flyrejsen har det højeste energiforbrug pr. person, lidt større end bilens, når der antages fuld kapacitetsudnyttelse for alle transportmidlerne. Energiforbruget for flyet og bilen er hhv. en faktor syv og fem større end for togrejsen, der stadig ligger lidt højere end busturen. Derimod er energiforbruget pr. person i en bil med fire personer af samme størrelsesorden som for den tilsvarende togrejse med typisk belægning.

Passagerbelægningen i de konkrete tilfælde er således af stor betydning for, hvorvidt den ene eller den anden transportform giver anledning til det største energiforbrug pr. person.

De enkelte søjler for energiforbruget pr. person er underopdelt på bidraget fra hvert af de transportmidler, der indgår i turen. Heraf fremgår det, at færgernes bidrag til energiforbruget er markant, når man tager deres forholdsvis lille andel af de samlede tilbagelagte strækninger i betragtning. Med typiske kapacitetsudnyttelser er der tale om godt 60% for både tog- og busrejsen, mens hurtigfærgen Catlink bidrager med hele 80% af bilturens energiforbrug. For Øst-Vest trafikken vil åbningen af den fast forbindelse over Storebælt derfor betyde en væsentlig reduktion af energiforbruget for den eksisterende trafik.

II. Godstransport: Sønderborg - Frederikshavn og Åbenrå - Skive

Der ses i det følgende på energiforbruget for to forskellige ture i Jylland (Sønderborg - Frederikshavn og Åbenrå - Skive), hvor der ønskes en last på 10 tons transporteret. For begge ture sammenlignes vejtransport med kombineret jernbane og vejtransport.

Forudsætninger

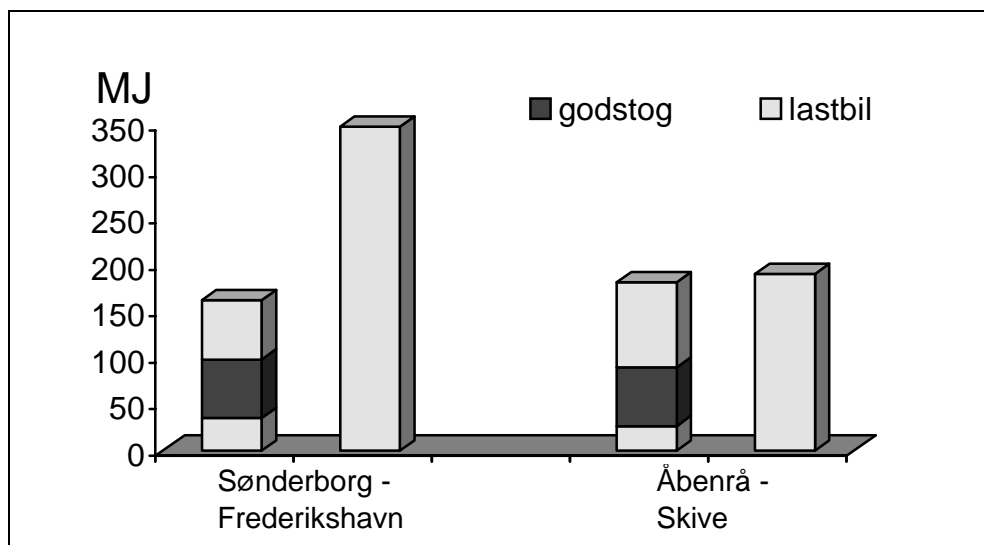
Godstransport med jernbane foregår normalt med lange togstammer med 20 - 30 godsvogne eller mere. Energiforbrug og emissioner pr. tonkm er typisk væsentligt større for lastbiltransport end for jernbanedelen af en tilsvarende kombineret transport. Når kombitransport ikke altid er bedre end vejtransport, skyldes det, at lastbilen kører den mest direkte vej fra dør til dør, mens kombitransporten er afhængig af kombiterminalernes placering. Kombitransporten vil som regel være længere end vejtransporten, hvor forøgelsens størrelse afhænger af beliggenheden af kombiterminaler i forhold til udgangspunkt og destination.

De to nedenfor beskrevne sammenligninger af kombi- og lastbiltransport tager begge udgangspunkt i at togdelen af kombitransporten sker mellem Padborg og Ålborg. Udgangspunkt og destination for hele turen er dog forskellig for de to sammenligninger. I det første eksempel sammenlignes energiforbruget for de to transportformer for turen Sønderborg - Frederikshavn, altså en tur hvor det ikke indebærer den store omvej at skulle over Padborg og Ålborg (en forøgelse fra 356 km til 466 km, dvs. på 110 km). I det andet eksempel er beregningerne for turen Åbenrå - Skive. Omvejen over Padborg og Ålborg for kombitransporten er her noget større (en forøgelse fra 193 km til 487 km, dvs. på 294 km).

I begge eksempler foregår godstransporten på vej med en stor lastbil (48t) årgang 1995, mens transporten på bane sker med et langt godstog med 34 vogne (i TEMA-modellen kan der vælges mellem fem lastbiler af forskellig størrelse og årgang samt enkelt varevogn, og et kort og et langt godstog). Mængden af last brugeren ønsker at transportere er som sagt 10 tons.

Resultater

Figuren nedenfor viser, at det energimæssigt er bedst at transportere gods mellem Sønderborg og Frederikshavn (eller lignende ture) som kombitransport. Medfører kombitransport derimod store omveje, som det er tilfældet med turen Åbenrå til Skive, bliver forskellen i energiforbrug derimod lille. Kombitransportens styrke er naturligvis her, at energiforbruget pr. tonkm for godstogets vedkommende er under en femtedel af lastbilens. Svagheden ved kombitransporten er, at transporttiden er væsentligt større, samt at frekvens og fleksibilitet er noget lavere.



Figur 1.3 Energiforbrug pr. ton ved vejtransport og kombitransport

Det bør nævnes, at der ved beregningerne for kombitransport ikke er taget hensyn til energiforbrug ved omladninger eller rangering. Hvad der heller ikke umiddelbart fremgår af beregningerne er, at ved transport af ret lette varer kan fordelene ved kombitransport forsvinde helt. Godstog er mest velegnet til transport af tunge varer, og det lange godstog, der optræder i TEMA-modellen har en relativ tung last, hvorfor en beregning af en overflytning af last med lavt vægtylde kan være misvisende.

2 Overordnet modelstruktur og forudsætninger

2.1 Baggrund

Et af transportsektorens væsentligste miljøproblemer er luftforurening som følge af transportmidlernes brændselsforbrug. Begrænsning af luftemissionerne fra transportsektoren kan principielt gribes an på tre måder: Transportmidlerne kan gøres mindre forurenende ad teknologisk vej, eller man kan mindske transportomfanget gennem påvirkning af trafikanternes adfærd. Endelig kan transporterne tilrettelægges på en mere miljøvenlig måde, hvilket typisk vil betyde overflytning til mindre forurenende typer af transportmidler.

Nøjagtige og detaljerede emissionsopgørelser er særligt vigtige i relation til diskussionen om overflytning mellem transportmidlerne, idet sammenlignelige emissionstal for de enkelte transportmidler er forudsætningen for at kunne vurdere miljøkonsekvenserne af en konkret transportopgave foretaget med alternative transportformer.

I forbindelse med regeringens Trafikplan 2005 (og Transporthandlingsplanen fra 1990) er der beregnet gennemsnitlige emissionsfaktorer for de enkelte transportmiddelkategorier på et aggregeret niveau. Hensigten hermed var at belyse transportmidlernes bidrag til de samlede nationale emissioner med henblik på at vurdere omfanget af de trafik- og miljøpolitiske tiltag der skal til for at sikre en begrænsning i luftemissionerne i overensstemmelse med Danmarks internationale forpligtelser og nationale miljømålsætninger.

De gennemsnitlige emissionsfaktorer, som nødvendigvis er resultatet af sådanne totale betragtninger, dækker over meget store variationer internt for de enkelte transportmidler og over en lang række andre forhold, hvorunder en given transport foregår.

Disse aggregerede emissionsfaktorer for transportmiddeltypene er derfor ikke særligt repræsentative i mere konkrete vurderinger af miljøkonsekvenserne ved udførelsen af en given transport under anvendelse af konkurrerende transportmidler. Ydermere kræver en konkret transport af personer eller gods fra A til B ofte mere end ét transportmiddel, hvilket nødvendiggør en samlet betragtning af emissionerne fra hele kæden af transportmidler, der indgår i transporten.

Der har derfor i debatten været en del uklarhed og divergerende opfattelser af de alternative transportformers miljømæssige effekter. Uenighederne beror dels på for generaliserede betragtninger om, hvorvidt det ene eller andet transportmiddel er mest miljøvenligt, og dels en manglende fælles referenceramme som baggrund for vurderingerne.

2.2 Formål

På baggrund af ovenstående er formålet med dette projekt at opstille en brugermodel, der kan anvendes til beregning af en konkret transports samlede energiforbrug og luftemissioner ud fra brugerspecificerede oplysninger om centrale faktorer i relation til transportens udførelse, så som transportmiddel(-ler), afstand, belægning, brændstof, hastighed, køremønster osv.

Modellen kan behandle såvel person- som godstransporter.

Modellens anvendelse illustreres måske bedst ved hjælp af et eksempel: Man ønsker at vurdere de samlede emissioner af en persons rejse fra Bagsværd til Nørresundby under anvendelse af hhv. bil, bus, tog og fly som hovedtransportmiddel. Med bil indgår tillige en færgetur over Storebælt, mens togrejsen indledes med en S-togstur fra Bagsværd til Hovedbanegården og afsluttes med en bustur fra Aalborg banegård til Nørresundby. For fly er der måske en taxatur til og fra Kastrup og Aalborg lufthavn. Det interessante er ikke kun de emissioner pr. transportmiddelkilometer, som kan beregnes ud fra de tekniske specifikationer af køretøjstype, brændstoftype, hastighed osv., idet det tilbagelagte antal kilometer ikke ens i de tre tilfælde. Flyet flyver stort set i lige linie, mens bilerne må følge vejnettet og den kollektive trafik køre omveje som følge af transportmiddelskift i knudepunkter. Endvidere vil transportmidlernes belægningsgrader være af afgørende betydning for emissionerne pr. person pr. rejse.

Lige så vel som sammenligninger af emissioner *mellem* forskellige transportformer kan modellen anvendes til sammenligning *inden for* en transportform. Eksempelvis kan konsekvenserne teknologiforskelle mellem nye og gamle generationer af personbiler eller forskellige bilkategorier beregnes.

Måling af emissioner fra mobile kilder er i sagens natur teknisk meget vanskeligt. Da de fysisk-kemiske sammenhænge, der bestemmer emissionernes størrelse, endvidere er uhyre komplekse, er der derfor generelt stor usikkerhed knyttet til emissionsopgørelser. Det skyldes dels manglende viden om de generelle sammenhænge mellem emissionsomfanget og de determinerende faktorer, og dels at der er tale om store variationer afhængigt af såvel de konkrete forhold som transporten udføres under (så som faktisk køremønster, lufttryk- og temperaturforhold, brændstofkvalitet, belægning osv.) og det specifikke transportmiddel, der er tale om, herunder mærke, årgang, motorjustering, slitage mv.

På grund af disse meget betydelige usikkerhedsmomenter giver det ikke mening at tillægge marginale forskelle mellem transportformerne betydning, men kun størrelsesordenen af de beregnede emissioner.

De brugere, som PC-modelværktøjet henvender sig til, er derfor først og fremmest eksperter, der er i stand til at vurdere, om modellens forudsætninger er nogenlunde opfyldt for den situation, der ønskes belyst, og har en fornemmelse af omfanget af usikkerhed for de enkelte beregninger. Der er derfor ikke indbygget validitetskontroller af de brugerspecificerede parametre.

2.3 Modellens opbygning

Modellen er opdelt i to dele for henholdsvis persontransport og godstransport. Der er tale om to separate modeller, der trods den fælles overordnede struktur er helt uafhængige. Det er således ikke muligt at foretage sammenligninger af energiforbrug og emissioner på tværs mellem person- og godstransport inden for modellens rammer.

Outputtet fra modelberegningerne er Energiforbrug (målt i MJ) samt emissioner (målt i gram) af CO₂, CO, NO_x, HC, SO₂ og partikler, jvf. Kapitel 2. Resultaterne opgøres totalt, pr. transportmiddel, pr. transportmiddelkilometer og pr. personkilometer og præsenteres i tabelform og gennem grafiske illustrationer.

EDB-implementeringen af modellen er foretaget i PC-programmet Microsoft Excel version 5.0 for Windows. Der er opbygget en brugerflade, hvor en samlet rejse/godstransport defineres. Der kan samtidigt sammenlignes op til 5 forskellige samlede ture, og hver tur kan indeholde en sekvens af op til 8 transportmidler.

For hver transportform skal brugeren specificere en række parametre gennem makro-baserede dialog-bokse. Det drejer sig eksempelvis om tilbagelagt strækning, transportmiddel, hastighed, belægning, jvf. Afsnit 2.6.

2.4 Forudsætninger og begrænsninger

Kendskabet til transportformernes emissioner er meget varierende mellem transportformerne afhængigt i hvilken grad, de er underlagt miljøregulering. For personbiler, der længe har givet anledning til miljøgener i byerne, er eksperternes viden klart størst, mens der eksempelvis for fragtskibe er foretaget meget få målinger og analyser. Disse forhold er af gode grunde afspejlet i den grad af simplificering, der har måttet gøres i de antagelser, der ligger til grund for modellens beregningsgang. Generelt er den miljømæssige viden mindst for fragtskibe og godstog, og størst for vejsektoren, specielt personbilerne. Men usikkerheden er alligevel også stor for vejsektoren, da ubestemte variable faktorer, så som topologi, vejens beskaffenhed, chaufførens køremønster varierer betydeligt mere for vejtransport end for de øvrige transportformer.

Uanset disse forskelle mellem transportformerne er der som tidligere nævnt tale om en betydelig usikkerhed i resultaterne. En usikkerhed som det ikke er muligt at kvantificere i et usikkerhedsinterval, idet den er tæt knyttet til i hvor høj grad

forudsætninger og antagelser i modellen kan siges at være opfyldt for den konkrete transport, der betragtes.

Modellen er endvidere afgrænset til beregninger under eksisterende forhold: Det vil først og fremmest gælde med transportmidler, der i dag anvendes i et vist omfang ud over, hvad der må betragtes som forsøgsprojekter. Men det inkluderer også dagens brændstoffer, infrastruktur og ikke mindst trafikmønstre. Eksempelvis er det *ikke* i den foreliggende modelversion muligt at belyse konsekvenserne af ændrede hastighedsbegrænsninger på vejnettet, da de muligheder for hastighedsvariationer, der er lagt ind i modellen, er baseret på målinger af det køremønstre, der i dag er typisk ved de pågældende gennemsnitlige rejsehastigheder.

Modellens output består som nævnt af det samlede udslip, dvs. *emissioner*, af en række luftforureningskomponenter, samt det samlede energiforbrug for en konkret, nærmere specificeret rejse. Bortset fra på inputsiden, hvor turene med fly, tog og færger defineres geografisk mellem to lufthavne/byer eller færgehavne, er den spatiale dimension ikke inddraget i modellen. For energiforbrug og emission af CO₂ er dette stort set underordnet. Men for de øvrige emissioner er det af stor betydning for miljøkonsekvensernes omfang og karakter om udslippet fra eksempelvis personbiler sker i tæt trafik i en smal gade i en storby eller i tyndtbefolkede landområder. Tilsvarende flyene, hvor en stor del af deres emissioner af kulbrinter sker højt oppe i atmosfæren, mens skadevirkningen og generne er betydeligt større ved jordoverfladen.

Det følger heraf, at der heller ikke foretages beregninger af de *immissioner*, altså af luftkvaliteten, som konsekvensen af emissionerne, hvorfor det ikke er muligt at vurdere de potentielle skadevirkninger af udslippene på baggrund af modelresultaterne.

Modellen inddrager ikke livscyklusbetragtninger, dvs. der er ikke medregnet de emissioner og energiforbrug, der er sket i forbindelse med produktionen af brændstoffer eller de benyttede transportmidler. Såfremt disse var medtaget, ville man alt andet lige være nået frem til højere værdier i alle beregningerne.

For togenes vedkommende er heller ikke medtaget tomkørsel og materielkørsel.

Tilsvarende er der en række miljøkonsekvenser, såsom uheld, støj, barrierereffekter mv., som slet ikke er inddraget i modellen. I en samlet vurdering af de opstillede transporters miljømæssige konsekvenser kan derfor ikke alene baseres sig på modellens beregningsresultater, idet man tillige må analysere betydningen af øvrige miljøpåvirkninger.

Endelig skal det nævnes, at der er valgt at tage udgangspunkt i specifikke modeller af transportmidler frem for gennemsnitsbetragtninger inden for hver kategori. Begrundelsen herfor er, at forudsætningerne herved bliver mere eksakte, og at man undgår at skulle opstille vægte til sammenvejningsprocedurer, som det kan være vanskeligt at fremskaffe pålidelige tal for.

2.5 Luftforureningskomponenter

2.5.1 Skadesvirkninger fra transportsektorens luftforurening

Luftforureningen fra transportsektoren er knyttet til forbrændingen af fossile brændstoffer. I det følgende gives en kort oversigt over de væsentligste emissioner fra transportsektoren, som omhandles i litteraturen, og de miljøproblemer, som de er årsag til.

I nedenstående tabel er opstillet de væsentligste forureningskomponenter samt en angivelse af karakteren af miljøeffekterne.

Tabel .2.12.2 Luftforureningskomponenter fra transportsektoren

	Globale effekter	Regionale effekter	Lokale effekter
CO ₂ (kuldioxid)	X		
N ₂ O (lattergas)	X		
NH ₃ (ammoniak)	(X)	X	X
NO _x (kvælstofoxider)	X	X	X
SO ₂ (svovldioxid)		X	X
HC (kulbrinter)	(X)	X	X
CO (kulilte)	(X)		X
Bly			X
Partikler (sod og støv)			X

De globale miljøproblemer er drivhuseffekten, de regionale problemer er skovdød og eutroficerings pga. sur nedbør og kvælstofdeponering, og de lokale effekter er sundhedsskader (luftvejsirritanter og kræftfremkaldende stoffer) og bygningskader.

Der skal knyttes en kommentar til HC (hydrocarboner eller kulbrinter), idet dette er en betegnelse, som dækker over en meget stor gruppe af stoffer, der kan dannes af kulstof-, brint- og molekyler. HC-emissionerne består dels af uforbrændt brændstof og dels af stoffer, som dannes under forbrændingen i motoren. Herudover er der et fordampningstab af HC fra motoren under kørsel, fra en slukket motor, så længe den er varm, samt fra benzintanken.

Medvirkende til luftvejsirritation er aldehyder som f.eks. formaldehyd og akrolein. De kræftfremkaldende stoffer er en række polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH) og derivater af disse samt et mindre antal andre aromater som

f.eks. benzen og toluen. HC kan enten udledes på dampform eller sidde på overfladen af partikler. Gruppen af HC, som udledes på dampform, kaldes også VOC (Volatile Organic Compounds eller flygtige kulbrinter). PAH optræder enten på dampform eller ved binding af PAH til overfladen af sod- og støv-partikler.

NO_x dækker NO og NO₂, men ikke N₂O (lattergas). Kun NO₂ giver gener og skadesvirkninger ved de i praksis forekommende koncentrationer, men da NO-emissionerne gradvist omdannes til NO₂, er det almindeligt at opgøre de to under ét.

2.5.2 Udvalgelse af emissionstyper

I udvælgelsen af luftforurenende stoffer er der lagt vægt på følgende forhold:

- a) at det er de væsentligste luftforureningskomponenter,
- b) at der er opstillet politiske mål for reduktion af emissionerne for de pågældende stoffer, samt
- c) at der foreligger tilstrækkelig viden om sammenhængen mellem emissionerne og de tekniske og kørselsmæssige forhold, som indgår i TEMA-modellen.

a) Emissioner fra de forskellige transportformer

I nedenstående oversigt er for de forskellige transportformer opsummeret de luftforureningskomponenter, som normalt anvendes til beskrivelse af emissionsforholdene fra transportsektoren:

Vejtransport: Langt størstedelen af transportarbejdet indenfor vejtransport foregår med benzindrevne personbiler, hvor emissionen pr. kørt km for SO₂ og partikler er lavt, mens emissioner af partikler er væsentlig højere for dieseldrevne køretøjer, hvilket typisk også er tilfældet for NO_x. Udslippet af CO og HC derimod højst for benzinerbiler.

Tog: En del af banenettet er elektrificeret. Der sker således ingen emission fra den elektrificerede del af banetrafikken. Derimod sker luftforureningen fra kraftværkerne, som primært har emission af CO₂, NO_x, SO₂ og partikler. Den øvrige banetrafik foregår med diesel som fremdriftmiddel.

Skib: Søtransport foregår helt overvejende med dieseldrevne motorer. Svovlindholdet i den anvendte dieselolie er ofte højt, hvilket giver en høj SO₂-emission. DSB er dog pr. 1. januar 1994 gået over til at anvende færgemiljødiesel på samtlige færger. Partikel- og kvælstofilteemissionen er ligeledes forholdsvis høj. Søtransporten foregår primært på det åbne hav, hvor de lokale luftforurenings-effekter er begrænsede.

Fly: Flytransport foregår overvejende med jetmotorer, som har meget lav emission af SO₂ og partikler. De lokale luftforureningseffekter er begrænsede.

b) Politiske målsætninger

Der er fastsat politiske målsætninger for reduktion af CO₂, NO_x, HC og partikler i Transporthandlingsplanen for miljø og udvikling fra 1990. Disse målsætninger er videreført i Regeringens Trafik 2005 fra 1993. Der er ikke fastsat politiske mål for reduktion af CO-, SO₂ - samt blyemissionerne. CO-emissionen på vej ned og vil reduceres yderligere pga. katalysatorerne på nye benzinbiler. Blyemissionen er stort set elimineret, da der ikke længere tilsættes bly til benzinen, og SO₂-emissionen fra transportsektoren er lav i sammenligning med andre sektorer.

c) Tilgængelige emissionsdata

Det er nødvendigt i forbindelse med opstilling af TEMA-modellen, at der foreligger tilstrækkelig viden om sammenhængen mellem emissionerne og de tekniske og kørselsmæssige forhold.

Det vurderes, at det vil være vanskeligt at tilvejebringe tilstrækkeligt detaljerede oplysninger om disse sammenhænge for de forskellige transportformer for stofferne: N₂O (lattergas) og NH₃ (ammoniak) samt for de forskellige undergrupper, som indgår i HC (kulbrinter).

På baggrund af punkterne a), b) og c) ovenfor er der valgt at medtage emissioner af følgende luftforureningskomponenter:

- CO₂
- CO
- NO_x
- HC¹
- SO₂
- Partikler.

Endvidere beregnes transporterens energiforbrug målt i MJ og volumen af det pågældende brændstof.

2.6 Transportformer og transportmidler

I rapporten skelnes der mellem transportformer og transportmidler. Transportformer bruger om den mere overordnede opdeling, jvf. nedenstående tabel, mens transportmidlerne er de enkelte typer, mærker osv *indenfor* hver transportform. Der medtaget ialt 5 person- og 5 godstransportformer med mulighed for valg mellem ialt 36 transportmidler. I nedenstående tabel er vist hvilke

¹ For vejsektoren er HC behandlet dels som HC-emission under kørsel og dels som et fast fordampningstab pr. km.

transportformer, der indtil videre er medtaget i modellen. I parentes er angivet hvor mange forskellige typer, der er medtaget for hver transportform.

Tabel 2.3 Medtagne transportformer.

Persontransport		Godstransport	
Personbil	(8 typer)	Stor varebil	(1 type)
Bus	(4 typer)	Lastbil	(5 typer)
Persontog	(5 typer)	Godstog	(2 typer)
Færge	(6 typer)	Færge	(5 typer)
Fly	(4 typer)	Fragtskib	(2 typer)

På godssiden er der set bort fra flytransport, da det udgør en ubetydelig del af det samlede godstransportarbejde.

Med hensyn til de enkelte transportmidler er der tale om konkrete typer eller modeller, eksempelvis VW Polo 1,3 fra 1993, og ikke gennemsnitsbetragtninger. Der er dog lagt vægt på, at der er tale om forholdsvis repræsentative typer, men samtidig at modellen skal afspejle den betydelige variation i emissionsfaktorer, der rent faktisk er tale om inden for hver transportform.

Så vidt muligt er medtaget såvel nye som gamle transportmidler, mens ny teknologi, der endnu ikke er udbredt på markedet, er udeladt i første version af modellen. For personbilerne er der endvidere medtaget både benzin- og dieseldrevne modeller.

2.7 Brugerspecificerede parametre - en oversigt

Afslutningsvist listes for hvert transportmiddel de parametre, som brugeren har mulighed for at påvirke. En mere detaljeret beskrivelse af brugerens input og baggrunden herfor henvises til de respektive kapitler i det følgende. For de fleste parametres vedkommende angiver modellen 'default'-værdier, der anvendes, med mindre brugeren aktivt ændrer deres værdi.

Personbiler

Bilmodel:	Blandt 8 modeller (Varierende mht.: Alder, benzin/diesel, størrelse og motorstørrelse, m./u. katalysator)
Strækning:	Totalt antal kørte kilometer
Køremønster:	Andel for hhv. by-, landevejs- og motorvejskørsel
Rejsehastighed:	For hhv. by-, landevejs- og motorvejskørsel

Belægning:	Antal personer i bilen
Antal koldstarter:	0, 1, 2 eller 3 koldstarter
Motorslitage:	Angivet i 10.000 km
Udetemperatur:	Enten i °Celsius eller som måneden i året

Busser

Strækning:	Samlet antal kørte kilometer
Busmodel:	Fire generationer af motorteknologi
Rejsehastighed:	10 - 80 km/t
Belægning:	Antal passagerer

Persontog

Segmenter:	Delstrækninger af Danmarks hovedjernbanenet
Produkt:	Lyn-, intercity-, regional eller S-tog
Togtype:	IC3, MR, ME, EA eller S-tog (nuv.)
Belægning:	0 - 100%

Færger

Færgerute:	Korsør-Nyborg ('Kronprins Frederik'), Halsskov-Knudshoved ('Heimdal'), Århus-Kalundborg ('Ask' el. 'Catlink'), Ebeltoft-Odden ('Mette Mols'), Bøjden-Fynshav ('Najaden')
Belægning:	0 - 100%
Sejlstrækning:	Angives i km, og kun hvis ruten anvendes som proxy for en ikke-inkluderet rute

Fly

Rute:	Blandt de 10 primære indenrigsruter
Flytype:	Blandt de fire mest benyttede: B737, MD80, DC9, F50
Belægning:	0 - 100%

Varebiler

Strækning:	Antal kørte kilometer
Køremønstre:	Som for personbiler
Hastigheder:	Som for personbiler
Belægning:	Last i ton

Lastbiler

Lastbiltype:	Blandt fem typer (lille, mellem el. stor samt ny eller gammel)
Strækning:	Som for personbiler

Rejsehastighed: Som for personbiler (men andre default hastigheder)
Belægning: Last i procent af maksimal last

Godstog

Strækning: Antal kørte kilometer
Belægning: Antal godsvogne

Færger

Færgerute: Korsør-Nyborg ('Kronprins Frederik'),
Århus-Kalundborg ('Ask'),
Ebeltoft-Odden ('Mette Mols'),
Grenå - Hundested ('Kattegat'),
Bøjden-Fynshav ('Najaden'),
Belægning: 0 - 100%
Sejlstrækning: Angives i km, og kun hvis ruten anvendes som tilnærmelse for en ikke-inkluderet rute

Fragtskibe

Strækning: Samlet antal kilometer
Skibstype: Coaster eller containerskib
Vægt af last: Den betragtede del af coasterens samlede last
Belægning: Den samlede last i forhold til max. lastevne, 0-100%

Del A. Persontransport

3 Personbiler

3.1 Metode og determinerende faktorer

Emissioner og energiforbrug for en rejse med personbil beregnes med udgangspunkt i den kørte distance multipliceret med gennemsnitlige emissionsfaktorer og energiforbrug pr. km. I beregningen af de gennemsnitlige faktorer tages der hensyn til rejsens køremønster, hvis sammenhæng med den gennemsnitlige rejsehastighed er undersøgt i et tidligere projekt (4). Endvidere er følgende determinerende faktorer inddraget i modellen:

- Bilmodel (herunder motortype og størrelse);
- Kørselens fordeling på by, landevej og motorvej;
- Den gennemsnitlige rejsehastighed indenfor hver af disse kategorier;
- Motorslitage;
- Antal koldstarter;
- Belægning, dvs. antal personer i bilen.

Sidstnævnte indgår kun beregningen i af resultaterne pr. personkilometer, og altså ikke i beregningerne af de samlede emissioner for turen.

3.1.1 Valg af bilmodeller

Normer for bilers emission er relateret til typegodkendelsen. Disse normer er løbende blevet skærpet, hvilket bevirker at nyere biler generelt har lavere emissionsfaktorer end gamle. Det skønnes (10), at 25-30% af den danske personbilpark (primo 1995) har katalysator med henblik på at leve op til de normer, der blev indført pr. 1.10.90. Yderligere 30-35% er godkendt efter R15-04, som var gældende fra 1.10.86 og indtil de nye emissionsnormer trådte i kraft. De resterende ca. 30% af bilparken er fra før R15-04 trådte i kraft.

For at belyse dette aspekt er der medtaget både nye og ældre biler. I udvælgelsen af bilmodeller er der lagt vægt på, at der er repræsenteret biler af forskellige størrelser. Endvidere er der medtaget både benzin- og dieseldrevne modelvarianter og med forskellige motorstørrelser. Endelig har der været lagt til grund, at der skulle være tale om bilmodeller, der har relativt stor udbredelse i Danmark.

Ved sammenligning af benzin- og dieseldrevne biler er det vigtigt at være opmærksom på, at benzin- og dieselmotorer med samme effekt ikke er lige store. For eksempel svarer en 1,7 liters dieselmotor normalt ikke til en 1,7 liters benzinmotor, men snarere til en 1,4 liters benzinmotor. En dieselmotor har således normalt lavere effekt i relation til slagvolumen end en benzinmotor.

3.1.2 Grunddata for energiforbrug og emissioner

Testmålinger af emissioner og brændstofforbrug er udgangspunktet for modellens beregninger. Bilerne emissioner måles under gennemførelse af et standardiseret køremønster i en forsøgsopstilling. Der foretages tests under anvendelse af flere forskellige kørecykler:

Til europæiske godkendelser:

UDC : Urban Driving Cycle, som er 4,05 km simuleret bykørsel med en maksimalhastighed på 50 km/t og en gennemsnitshastighed på 18,6 km/t. UDC udføres med start med varm eller kold motor og kaldes UDC-hot henholdsvis UDC-cold.

EUDC : Extra Urban Driving Cycle, som er 6,95 km simuleret landevejs- og motorvejskørsel med varm motor. Maksimalhastigheden er 120 km/t, og gennemsnitshastigheden er 62,5 km/t.

Eurotest : en kombineret kørecyklus sammensat af en UDC-cold efterfulgt af en EUDC (ialt 11,00 km med gennemsnitligt 33,6 km/t).

Til godkendelser i USA:

FTP : Federal Test Procedure er simuleret bykørsel, der anvendes til godkendelse i USA. Strækningen er 11,9 km lang, gennemsnitshastigheden er 31,4 km/t. Proceduren består af 3 faser, benævnt henholdsvis *cold transient*, *stable* og *hot transient*. Cold og hot transient er identiske med hensyn til køremønstre, men starter med kold henholdsvis varm motor.

HWFET: HighWay Fuel Efficiency Test er en amerikansk testcyklus til højere hastigheder (gennemsnit = 77,5 km/t) på 16,5 km.

Det svenske Motortestcenter under Svensk Bilprovning (MTC) har udført målinger på en lang række bilmodeller med henblik på at teste, om de overholder gældende normer under faktisk brug. De anvendte testprocedurer er FTP og HWFET.

Lignende målinger er foretaget af et hollandsk måleinstitut under den statslige analyseinstitution TNO (1). Bilerne er hentet ind "fra gaden" og målt med samme testprocedurer som ligger til grund for den europæiske godkendelsesnorm for (nye) personbiler. Der er foretaget målinger efter såvel de europæiske standardcykler såvel som FTP.

Den valgte opgørelsesmetode tager udgangspunkt i en beregning af energiforbrug og emissioner ved kørsel i en ny bil med varm motor, hvorefter der korrigeres for slitage og antal koldstarter. Det er således vigtigt for beregningerne, at den del af emissionerne, der skyldes koldstart, kan isoleres i de benyttede måledata.

For den svenske database, som vi er i besiddelse af, er dette muligt, da måleresultaterne er opgjort meget detaljeret. Emissioner og energiforbrug er målt efter de amerikanske testprocedurer, FTP og HWFET, hvor FTP-målingerne er opdelt på de tre faser. Desværre indeholder den kun måledata for katalysatorbiler samt enkelte dieslbiler.

De hollandske data har vi fra publicerede data, og kun i den tidligste af de offentliggjorte rapporter, er der opgivet måledata for testcykler med varm motor. Det drejer sig om de europæiske kørecykler UDC-hot og EUDC for række benzinbiler uden katalysator og et antal dieslbiler.

På baggrund af de tilgængelige data, er det valgt at benytte den hollandske kilde for dieslbiler og ældre benzinbiler (uden katalysator), mens de svenske tal anvendes for katalysatorbiler.

Blandt de bilmodeller, som der er foretaget målinger på, er der udvalgt 8 modeller på basis af de ovenstående kriterier. De biler, der er målt på, er alle almindelige i Danmark og er godkendt efter samme procedurer som er gældende for tilsvarende biler i Danmark.

Bilmodellerne er valgt til at repræsentere følgende klasser:

- Benzin m/kat, motor <1,4 ltr (VW Polo)
- Benzin m/kat, motor 1,4-2,0 ltr (Toyota Corolla & Nissan Primera)
- Benzin m/kat, motor >2,0 ltr (Ford Scorpio)
- Benzin u/kat, motor <1,4 ltr (Fiat Uno)
- Benzin u/kat, motor 1,4-2,0 ltr (Opel Omega)
- Diesel, motor >2,0 ltr (Mercedes 250D)
- Diesel, motor 1,4-2,0 ltr (VW Golf D).

Udvalget er foretaget således, at bilerne dækker variationer i både rummelighed og motorstyrke. De tekniske specifikationer for disse bilmodeller fremgår af nedenstående tabel.

Tabel 3.1 Tekniske specifikationer for de udvalgte bilmodeller

Model:	Årgang	Godkendelsesstandard	Motor-type	Motor størrelse	Motor ydelse	Egenvægt ¹⁾
VW Polo CL Coupé	1993	E2/U9	benzin m. 3-v. kat.	1,3 l	40 kW	750 kg
Toyota Corolla	1994	E2/U9	benzin m. 3-v. kat.	1,6 l	84 kW	1000 kg
Nissan Primera	1992	E2/U9	benzin m. 3-v. kat.	1,6 l	66 kW	1025 kg
Ford Scorpio	1993	E2/U9	benzin m. 3-v. kat.	2,9 l	107 kW	1300 kg
Fiat Uno	1987	R15-04	benzin u. kat.	1,1 l	44 kW	750 kg
Opel Omega	1987	R15-04	benzin u. kat.	2,0 l	85 kW	1200 kg
Mercedes 250D	1991	diesel	diesel	2,5 l	69 kW	1300 kg
VW Golf D	1991	diesel	diesel	1,9 l	47 kW	975 kg

1) Målingerne er foretaget i lastet tilstand, der er 28-35% højere end egenvægtene.

Kilder: Motortestcenteret, Svensk Bilprovning. TNO: "In Use Compliance Annual Reports 1989-90". Bilrevyen, diverse årgange.

I nedenstående tabel er præsenteret brændstofforbruget for de udvalgte bilmodeller ved henholdsvis lav og høj hastighed, som de kan beregnes på basis af testresultaterne. Disse opgøres i g/km som i tabellen er omregnet til km/l.

Tabel 3.2 Testresultater for energiforbrug

Energiforbrug	Testcyklus med lav fart			Testcyklus med høj fart			TEMA: 90km/t
	Model:	Cyklus	g/km (MJ/km) km/l	Cyklus	g/km (MJ/km) km/l	km/l	
VW Polo CL Coupé	FTP-hot ¹⁾	57 (2,49)	13,2	HWFET	40 (1,76)	18,7	19,7
Toyota Corolla	FTP-hot ¹⁾	63 (2,78)	11,8	HWFET	47 (2,04)	16,1	16,8
Nissan Primera	FTP-hot ¹⁾	71 (3,09)	10,6	HWFET	45 (1,97)	16,7	17,6
Ford Scorpio	FTP-hot ¹⁾	80 (3,51)	9,4	HWFET	60 (2,61)	12,6	13,2
Fiat Uno	UDC-hot	68 (2,96)	11,1	EUDC	47 (2,07)	15,9	18,1
Opel Omega	UDC-hot	95 (4,16)	7,9	EUDC	59 (2,59)	12,7	14,5
Mercedes 250D	UDC-hot	72 (3,09)	11,6	EUDC	51 (2,20)	16,3	19,3
VW Golf D	UDC-hot	51 (2,20)	16,3	EUDC	41 (1,74)	20,7	24,4

1) Fase 2 (stable) + fase 3 (hot transient)

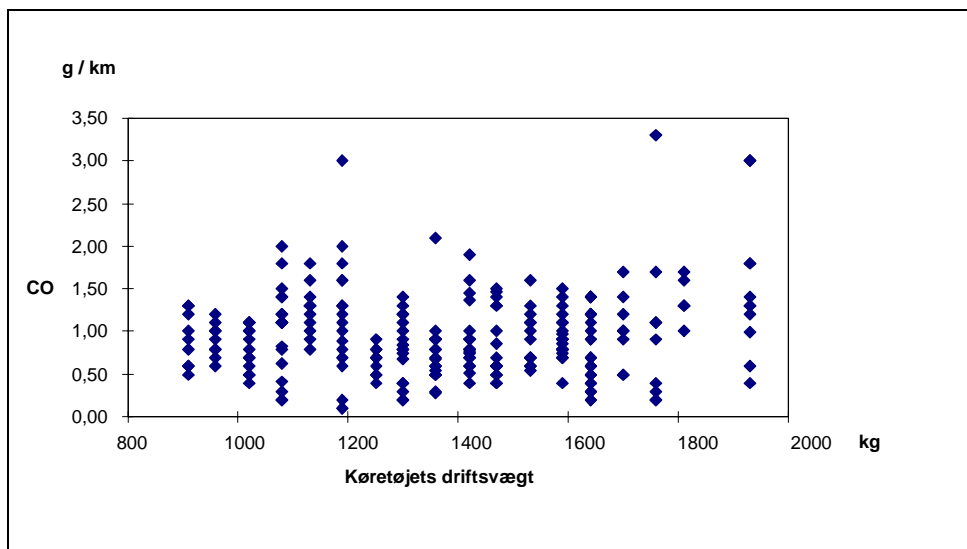
Kilde: Database fra Motortestcentret, Svensk Bilprovning, "In Use Compliance Annual Report 1989-90".

Tallenes størrelse og indbyrdes forhold svarer i det store hele til det forventede. Resultaterne ved lav og høj fart skal simulere almindelig kørsel i by og på land. De er altså ikke målt ved konstant fart, men kan groft sagt tolkes som brændstofforbruget ved henholdsvis by- og landevejskørsel. Forbruget ved lav fart er derfor højere. Dieslbiler kører generelt længere på literen end benzinerbiler. Tungere biler og biler med stor motor har større forbrug.

Forbrugstallene ved 90 km/t er anført som indikation af metodens gyldighed. Tallenes størrelse og indbyrdes forhold er omtrent som forventet - de afspejler bilmodellernes vægt, motorstørrelse og motortype. Et væsentligt forhold, som ikke fremgår af tallene i skemaet, er at variationen indenfor hver enkelt model er relativt lille hvad angår brændstofforbrug. Det betyder, at de enkelte tal er bestemt med god nøjagtighed, og dermed er det relevant at anvende konkrete værdier for de udvalgte bilmodeller. Den samme regelmæssighed genfindes imidlertid ikke, når man ser på emissionerne af CO, HC, NO_x og partikler. For det første har fabrikkerne mulighed for at justere balancen mellem NO_x på den ene side og HC og CO på den anden, blandt andet gennem blandingsforholdet mellem luft og brændstof.

For det andet bevirker lovkravene vedrørende begrænsning af emissionerne at forskellene mellem bilerne udlignes. Dette gør sig særligt gældende for katalysatorbilerne. Store biler med kraftige motorer vil alt andet lige have større emissioner end små, men for at opfylde lovkravene, der er ens for alle personbiler, må fabrikkerne bekoste mere effektivt emissionsbegrænsende udstyr på disse biler. For biler, der er godkendt efter samme normer, er der således principielt ingen grund til at forvente lavere emissioner fra de mere energieffektive biler.

Som illustration af, at denne problemstilling faktisk også gør sig gældende i praksis, er CO-emissionen i gram pr. km afbildet som funktion af køretøjsvægten i nedenstående figur, der er baseret på FTP-hot-tallene for katalysatorbilerne fra den svenske database.



Figur 3.1 Sammenhæng mellem CO-emissionfaktor og køretøjsvægt.

Ud fra figuren kan der ikke spores nogen sammenhæng mellem emissionernes størrelse og bilernes vægt. Endvidere er der selv for biler med omtrent samme vægt typisk en faktor 5 - 10 til forskel mellem den lavest og højeste emissionsmåling.

Der er foretaget statistiske analyser af de 229 katalysatorbiler i den svenske database. Betydningen af motorstørrelse, motoreffekt og bilernes vægt har været analyseret, uden at der har kunnet konstateres signifikante indflydelser på hverken CO, NO_x eller partikler. For HC kan der ses en signifikant, men ganske svag positiv indflydelse fra vægten af bilerne. Effekten er dog ubetydelig i forhold til den samlede variation i emissionsfaktorerne.

Ydermere kan den meget store variation, der er konstateret i emissionsmålingerne for katalysatorbilerne, kun i begrænset omfang tilskrives, at det er forskellige bilmodeller og motorer, der er målt på. Mens det for forbrugstallene kun er 10-15% af den samlede spredning, der ikke kan forklares med motor- og biltypen, er det for emissionsmålingerne omtrent halvdelen af den samlede spredning, der skyldes variationer inden for samme bilmodel. Ved målinger på samme målestation af teknisk set identiske biler - dvs. samme model- og motorvariant med samme alder og stort set samme kilometerstand - er der oftest en spredning på en faktor 2, og en faktor 10 eller mere mellem højeste og laveste emissioner er ikke ualmindeligt for katalysatorbiler.

Som eksempel kan nævnes, at for den udvalgte VW Polo er der foretaget målinger efter FTP-cyklen på tre ens modeller. Alle køretøjer er kontrolleret for korrekt motorjustering før test. Bilerne er nye og har kørt ca. 1000 km. For HC er de målte emissioner for de tre køretøjer 0,007/0,012/0,027 gram pr. km - dvs.

en faktor 4 mellem største og mindste værdi. Den største registrerede forskel er en faktor 20 mellem målinger på ens bilmodeller.

For biler uden katalysator og dieslbiler er forholdene lidt mindre udtalte, men det generelle billede er det samme.

På baggrund af ovenstående dokumentation af den meget store usikkerhed og mangel på systematik i emissionerne for enkelte bilmodeller, konkluderes det, at det ud fra den eksisterende viden ikke giver meget mening at operere med individuelle emissionsfaktorer for de enkelte bilmodeller. Udvalgelse af enkelte bilmodeller til TEMA-modellen vil give en urimelig høj grad af vilkårlighed, hvor eksempelvis VW Polo og Ford Scorpio ikke vil kunne siges at være repræsentative for henholdsvis små og store biler.

I stedet er der valgt at basere emissionsfaktorerne gennemsnitstal for testresultaterne fra hver af de tre motorteknologier diesel, benzin med og benzin uden katalysator. I praksis betyder dette, at valget af model inden for hver af disse tre kategorier kun har betydning for energiforbruget. Emissionerne vil derimod være ens for de fire katalysatorbiler: VW Polo, Toyota Corolla, Nissan Primera og Ford Scorpio, og ligeledes for de to biler uden katalysator (Fiat Uno og Opel Omega) og for dieslbilerne (Mercedes 250D og VW Golf).

Som udgangspunkt for beregning af disse gennemsnit er anvendt følgende materiale:

- *Benzin med katalysator*: svenske målinger af 55 biler med motor på under 3,0 liter. Kun disse målinger foreligger tilstrækkeligt detaljeret til, at de kan korrigeres for koldstart-bidraget som beskrevet i afsnittet om koldstart. Af de 55 målte biler er de 12 fordelt på de 4 bilmodeller med katalysator, der indgår i TEMA-modellen.
- *Benzin uden katalysator*: ældre hollandske målinger af 45 biler med motor fra 1,4 til 2,0 liter. Af de 45 målte biler er de 10 fordelt på de 2 bilmodeller uden katalysator i TEMA-modellen.
- *Diesel*: nyere hollandske målinger af 64 biler, hvoraf 16 er fordelt på de 2 diesebilmodeller, der er brugt i TEMA-modellen.

I nedenstående tabel er de anvendte gennemsnitsværdier for katalysatorbiler anført (MTC). Som for brændstofforbruget er der tale om summen af fase 2 og fase 3 fra . Til sammenligning er med udgangspunkt i samme testcykler vist beregningsresultaterne fra den model (SCS), der er anvendt i forbindelse med Køremønsterundersøgelsen, jf. afsnit 3.1.3.

Tabel 3.3 Testresultater: emissionsfaktorer fra benzinbiler med katalysator

Kilde:	(gram/km)		Antal		CO		HC		NO _x	
			biler modeller		FTP	HWFET	FTP	HWFET	FTP	HWFET
MTC:	FTP-hot		55	17	0,47	0,31	0,028	0,021	0,088	0,05
MTC(korr.):	FTP-hot		55	17	0,34	0,31	0,024	0,021	0,08	0,05
SCS-model ¹⁾ :	FTP-hot		ca. 60	n.a.	1,65	0,32	0,15	0,060	0,22	0,17

1) Resultater fra simuleringmodellen fra køremønsterundersøgelsen. Ikke korrigeret for de 10 minutters pause.

Ved testmålinger ud fra FTP-cyklen er der en 10 minutters pause mellem fase 2 og fase 3, hvilket naturligvis får motortemperaturen til at falde en smule. I VTI-rapport (400 A, 1994) er betydningen heraf undersøgt ved at sammenligne emissionerne fra fase 3 med tilsvarende måleresultater uden de 10 minutters pause. Resultatet var, at emissionerne af CO, HC og NO_x i fase 3 reduceredes med henholdsvis 43%, 24% og 13%, hvis den blev kørt umiddelbart efter fase 2. Linien med "MTC korr.: FTP-hot" resultaterne i ovenstående tabel er beregnet ved at korrigere fase 3 i FTP-målingerne med disse procentsatser inden det samlede gennemsnit for de 55 biler beregnes. Herved fås et mere korrekt billede af emissionerne med varm motor.

Selvom der er stor usikkerhed på emissionerne på de enkelte biler, er der derimod god overensstemmelse i niveauet mellem målingerne fra henholdsvis det hollandske og det svenske testcenter, hvilket fremgår af nedenstående tabel, der sammenligner den gennemsnitlige værdi for FTP. Tallene gælder med kold motor og kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes med de ovenstående.

Tabel 3.4 Sammenligning af FTP-cold testresultater for benzinbiler med katalysator.

Kilde:	Antal		CO	HC	NO _x
	biler modeller		gram/km	gram/km	gram/km
MTC totalt	229	70	0,92	0,13	0,19
TNO <1,4 l	205	41	1,39	0,15	0,24
TNO 1,4-2,0 ltr	390	78	1,31	0,15	0,22
TNO >2,0 ltr	65	13	1,42	0,16	0,22

TNO-resultaterne er endvidere opdelt på motorstørrelse, hvoraf det ses, at konklusionen om at emissionerne ikke afhænger af motorstørrelsen understøttes af de hollandske målinger.

For benzinbiler uden katalysator er målingerne naturligt nok af ældre dato. De ovennævnte 'In use compliance' rapporter fra TNO indeholder de mest omfattende og mest detaljerede data, hvorfor der er valgt at benytte et gennemsnit af disse resultater som grunddata. Målingerne er foretaget med varm motor efter de europæiske testcykler, UDC-hot og EUDC. Til sammenligning er tillige vist resultaterne fra en senere TNO-rapport, hvor der altså indgår flere biler, men hvor der kun er tal for UDC-cold, og altså ikke UDC-hot og EUDC. Endelig er vist tallene fra simuleringsmodellen fra køremønsterundersøgelsen.

Tabel 3.5 Testresultater for emissionsfaktorer fra benzinbiler uden katalysator

Kilde:	Antal		CO gram/km		HC gram/km		NO _x gram/km	
	biler	modeller	UDC-hot	EUDC	UDC-hot	EUDC	UDC-hot	EUDC
TNO 1990-91	45	9	8,4	4,9	2,20	0,97	1,53	2,58
SCS-model ¹⁾	n.a.	n.a.	27,5	12,8	2,8	1,1	2,2	2,6

1) Resultater fra simuleringsmodellen fra køremønsterundersøgelsen.

Bort set fra værdierne for CO er der rimelig overensstemmelse mellem køremønsterundersøgelsen og TNO-tallene. Afvigelsen kan skyldes, at de bilmodeller der ligger bag køremønster-modellen er noget ældre end for TNO-resultaterne.

Endelig viser nedenstående tabel de tilsvarende hollandske testresultater for dieslbiler. Igen er det kun resultaterne fra 1990-91-rapporten, som kan benyttes, idet de øvrige er med kold motor og uden EUDC-cyklen.

Tabel 3.6 Testresultater for emissionsfaktorer fra dieslbiler

Kilde:	CO gram/km		HC gram/km		NO _x gram/km		partikler gram/km	
	UDC-hot	EUDC	UDC-hot	EUDC	UDC-hot	EUDC	UDC-hot	EUDC
TNO 1990-91 (40 biler/8 mod.)	0,76	0,29	0,13	0,053	0,88	0,61	0,10	0,13
TNO 1993-94 (21 modeller)	0,96	n.a.	0,24	n.a.	1,00	n.a.	0,15	n.a.
SCS-model ¹⁾	1,38	0,61	0,15	0,06	1,17	0,65	0,28	0,18

1) Resultater fra simuleringsmodellen fra køremønsterundersøgelsen.

Sammenligning af værdierne for UDC ud 1990/91-tallene med varm motor og 1993/94-tallene med kold motor viser som forventet, at emissionerne også for dieslbilerne er højere med kold motor, men at forskellene er betydeligt mindre end for katalysator-bilerne

Som det fremgår af tabellen, er der for dieslbilerne foruden CO, HC og NO_x tillige målinger af partikelemissionerne. For benzinbiler er partikelemissionerne generelt så små, at det har været anset for et mindre problem. Der foreligger kun få målinger for partikler. Med udgangspunkt i data fra Køremønsterundersøgelsen (4), vil der i modellen blive benyttet en generel emissionsfaktor på 0,01 hhv. 0,02 g/km for benzinbiler med hhv. uden katalysator - uafhængigt af hastighed, slitage, koldstart m.v. Det må dog understreges, at der er tale om en meget grov tilnærmelse, der er begrundet i det relativt meget lave udslip fra denne motortype.

Sammenfattende anvendes altså følgende grundemissionsfaktorer i TEMA-modellen:

Tabel 3.7 Anvendte grundemissionsfaktorer for personbiler

(gram/km)	CO		HC		NO _x		Partikler	
	FTP	HWFET	FTP	HWFET	FTP	HWFET	FTP	HWFET
Benzinbiler m. kat.	0,34	0,31	0,024	0,021	0,08	0,05	0,01	
Benzinbiler u. kat.	8,4	4,9	2,20	0,97	1,53	2,50	0,02	
Dieslbiler	0,76	0,29	0,13	0,053	0,88	0,61	0,10	0,13

De ovenstående grunddata gælder kun ved de beskrevne test-kørecykler. Selv om testcyklerne er udformet med det formål at simulere realistiske kørselsmønstre, vil der være særdeles store variationer i de faktiske emissioner afhængigt af kørehastigheden og af hvor kraftige accelerationer og opbremsninger, der foretages under kørslen. Ovenstående testværdier kan derfor kun betragtes som grunddata, der så vidt muligt er sammenlignelige på tværs af bilerne.

De følgende afsnit beskriver, hvordan disse grunddata for emissionsfaktorer omsættes til estimerede værdier for emissionerne under forskellige kørselsforhold. Der korrigeres for variationer i de aktuelle køremønstre og rejsehastighed, for motorslitage, samt et tillæg for start af kold motor, og endelig redegøres for det fordampningstab, der sker fra motoren, og som ikke er med i de ovennævnte emissionstal.

3.1.3 Køremønstre

Hastigheden og køremønstret, dvs. variationer i hastigheden gennem acceleration og opbremsning, er ligeledes af afgørende betydning for energiforbrug og emissioner. Begge dele afhænger typisk af hvilken type af trafik, der er tale om. Ved bykørsel er der typisk en lavere gennemsnitlig hastighed, dels som følge af den lavere maksimale hastighed men også i kraft af de flere opbremsninger og efterfølgende accelerationer, som følge af lyskryds, vigepligt, frakørsler osv. Motorvejskørsel er på den anden side jævner og foregår som oftest med højere gennemsnitshastighed end landevejskørsel. For hver tur inddeles strækningen derfor i tre typer:

- Bykørsel
- Landevejskørsel
- Motorvejskørsel

idet såvel køremønstre som hastighed varierer karakteristisk over disse tre vejtyper.

Turens procentvise fordeling er som *default* sat lig landsgennemsnittet 35%-40%-25% på by-landeveje-motorveje. Dette gennemsnit er imidlertid ikke særligt typisk for konkrete ture, hvor andelen for bykørsel vil falde med turens længde. Fordelingen bør derfor angives af brugeren. *Default*-rejsehastighederne i programmet er sat til henholdsvis 30, 70 og 110 km/t for hhv. by, landevej og motorvej.

3.1.4 Rejsehastighed

I projektet *Køremønstre og luftforurening* (4) er der foretaget grundige analyser af sammenhængen mellem emissionerne og bilernes gennemsnitlige rejsehastighed. Undersøgelsen er baseret på dels målinger af ca. 800 faktiske køremønstre på en række udvalgte vejstrækninger (fordelt på by-, landevejs- og motorvejskørsel) og dels efterfølgende simulationer med en emissionsmodel udviklet af Laboratoriet for Energiteknik (fra 1996: Institut for Energiteknik). Modellen er baseret på målte momentane emissionsfaktorer for en lang række

forskellige kørselsforhold, målt som kombinationer af hastighed og acceleration.

Analyserne blev opdelt på seks køretøjstyper, hvoraf de tre var personbiler: benzinbiler uden katalysator, benzinbiler med katalysator og dieslbiler.

Det er vigtigt at bemærke, at rejsehastigheden især afspejler vejtypen (og de trafikale forhold), snarere end førerens valgte kørehastighed. En rejsehastighed på 30-40 km/t afspejler gerne kørsel i bymæssige omgivelser uden særlige fremkommelighedsproblemer. Lavere hastigheder er udtryk for problemer med trafikafviklingen. Bilister vælger ikke frivilligt at køre så langsomt. Tilsvarende er 70 km/t på landeveje og 100-110 km/t på motorveje udtryk for en problemfri trafikafvikling på gode veje, mens en lavere hastighed er udtryk for mindre end optimale køreforhold.

En vigtig konsekvens af dette er, at TEMA-modellen *ikke kan bruges til at vurdere effekten af at vælge en højere eller lavere kørehastighed*. For eksempel vil bilføreren ved normal uhindret landevejskørsel kunne reducere hastigheden og dermed spare energi. En reduceret hastighed vil for TEMA-modellen derimod være udtryk for et ujævnt køremønster, eventuelt med stop, og dermed medføre et øget energiforbrug. Ved rejsehastigheder på ca. 90 km/t og derover er der dog tale om kørsel med næsten jævn fart, og her vil rejsehastighed og aktuel hastighed være tæt på hinanden, og værdier for emissioner og energiforbrug vil kun variere lidt afhængigt af om der betragtes jævn hastighed eller aktuelle køremønstre.

I TEMA-modellen begrænses rejsehastighedsintervallet for bykørsel til 15-60 km/t, mens landevejs- og motorvejskørsel vil ligge mellem 50 og 120 km/t. Den øvre grænse er bestemt som den maksimale blandt de målte køremønstre.

Det bør endvidere nævnes, at der for kørsel med katalysatorbiler med høj fart er særlig stor usikkerhed på emissionsforholdene. De værdier, der angives her, er baseret på at katalysatoren bevarer sin fulde emissionsbegrænsende effekt ved alle hastigheder. I praksis sker der det for *nogle* biler, at katalysatoren "slår fra" ved høje hastigheder, begyndende ved ca. 80-90 km/t og er stort set ude af funktion ved ca. 140 km/t. Desværre er der tilsyneladende ikke noget mønster for, hvilke biler, som "slår fra", og hvilke som fungerer korrekt.

Til nærværende formål er der ud fra Køremønsterundersøgelsens resultater foretaget statistiske analyser af hhv. CO-, HC-, NO_x-, partikel-emissioner og brændstofforbrug som funktion af rejsehastighed og vejtype for hver bilkategori². Som dokumenteret i køremønsterundersøgelsen har rejsehastigheden klar indflydelse på emissioner og energiforbrug.

Selvom de høje hastigheder typisk findes ved motorvejskørsel, og de lave ved bykørsel, er der et vist overlap i hastighedsfordelingerne mellem de tre vejtyper. På baggrund af analyserne kan det konkluderes, at der ikke er nævnevæ-

³. I f.t. resultaterne i Køremønsterundersøgelsen er koldstartstillæget for bykørslen først elimineret, således at der er tale om sammenhænge med varm motor.

dig forskel på emissionerne ved kørsel på forskellige vejtyper, hvis man sammenligner ved en given rejsehastighed. Skelnen mellem by-, landevejs- og motorvejskørsel har således alene betydning gennem de gennemsnitlige rejsehastigheder, der specificeres for hver af disse vejtyper.

Der er for hver relation approksimeret polynomier gennem at minimere afvigelserne fra de enkelte punkter til polynomie-formen (OLS-estimation):

$$e'_{ij}(v) = f_{ij}(v),$$

for i = emissionstype (CO, HC, NO_x, partikler, fuel)

og j = motortype (u.kat., m.kat., diesel)

hvor e' er emissionen i gram pr. km og v er den gennemsnitlige rejsehastighed og $f()$ er polynomier af grad 3 - 6. Som illustration er på næste side vist energiforbrugskurven for benzinbiler med katalysator. De tilsvarende illustrationer for de øvrige sammenhænge er vist i Bilag 1.

Resultaterne fra køremønsterundersøgelsen afspejler emissionsforholdene for en gennemsnitlig bil i den danske bilpark inden for hver kategori. Imidlertid er der for benzinbiler med og uden katalysator indregnet en forværrelsesfaktor svarende til en slitage på 107.000 km, jvf. Køremønsterrapporten s. 40. Forværrelsesfaktorerne $d_{i,j}(107.000\text{km})$ fremgår af nedenstående tabel:

Tabel 3.8 Køremønsterundersøgelsens korrektionsfaktorer for slitage

Biltype:	CO	NO _x	HC
uden kat.	1,4	0,9	1,1
med. kat.	5,3	2,1	2,6
diesel	1	1	1

Anmrkn.: Korrektionsfaktorerne er beregnet for 107.000 km kørsel. Der er ikke regnet med slitage for partikler eller for diesel-biler.

Kilde: Køremønsterundersøgelsen, s. 40.

Da dette er en brugerparameter, som der på anden vis korrigeres for, må vi eliminere denne effekt, jvf. Afsnit 3.1.5. Ved at dividere med den anvendte forværrelsesfaktor $d_{i,j}$ fås hastighedspolynomier for nye biler:

$$e_{i,j}(v) = f_{i,j}(v)/det_{i,j}(107.000\text{km}) .$$

hvor i er emissionstypen, j er motortypen og $det_{i,j}(107.000\text{km})$ er køremønsterundersøgelsens forværrelsesfaktor, jvf. ovenstående tabel.

<<Vedlagt: "Personbil u kat Chart 11

- Energi, personbil uden katalysator">>

De konstruerede polynomier på basis af Køremønsterundersøgelsens resultater viser altså emissionernes og energiforbrugets variation med rejsehastigheden for det gennemsnit af biler, der ligger til grund for simuleringmodellen.

Som det fremgår af Afsnit 3.1.1 er der imidlertid forskel på niveauet for emissionsgrunddata der fremkommer ved simulering af de amerikanske og europæiske testkørecykler med den model, der ligger til grund for køremønsterundersøgelsen på den ene side og de hollandske (TNO) og svenske (MTC) testresultater, som nærværende model baseres på, jvf. Afsnit 3.1.1.

Derfor transformeres polynomierne med forholdet mellem testresultaterne fra Afsnit 3.1.1 og de tilsvarende resultater med simuleringmodellen:

$$e_{im}^{ny}(v) = e_{ij}^{ny}(v) \times e_{im}^{test} / e_{ij}^{model},$$

hvor indeks m er den specifikke bilmodel, $test$ angiver testresultaterne for den pågældende bil, mens $model$ angiver det tilsvarende beregnede resultat med simuleringmodellen. Det generelle *niveau* svarer således til TNO- og MTC-testresultaterne, samtidig med at køremønsterundersøgelsens resultater benyttes til at fastlægge emissionernes *relative* afhængighed af rejsehastigheden.

Teknisk set foretages transformationen af polynomierne ved at benytte FTP- og UDC-resultaterne for de lave hastigheder, dvs. under hhv. 31,4 km/t (v_{FTP}) og 18,6 km/t (v_{UDC}), og HWFET- og EUDC-resultaterne for de høje hastigheder, dvs. over hhv. 77,5 km/t (v_{HWFET}) og 62,5 km/t (v_{EUDC}).

Tabel 3.9 Transformationsnøgler for hastighedspolynomierne.

Benzin m. kat	Testcyklus	Benzin u. kat. & diesel	Testcyklus
$v \leq 18,6$ km/t	FTP	$v \leq 31,4$ km/t	UDC
$18,6$ km/t < v < $62,5$ km/t	interpolation	$31,4$ km/t < v < $77,5$ km/t	interpolation
$62,5$ km/t $\leq v$	HWFET	$77,5$ km/t $\leq v$	EUDC

For de mellemliggende intervaller beregnes emissionsfaktoren for den specifikke model ved interpolation. Det vil sige

$$e_{im}^{test} / e_{ij}^{model} = \left(1 - \frac{v - v_{FTP}}{v_{HWFET} - v_{FTP}} \right) \times \frac{FTP_{im}^{test}}{FTP_{ij}^{model}} + \frac{v - v_{FTP}}{v_{HWFET} - v_{FTP}} \times \frac{HWFET_{im}^{test}}{HWFET_{ij}^{model}}$$

for j = benzinbiler med katalysator, og

$$e_{im}^{test} / e_{ij}^{model} = \left(1 - \frac{v - v_{FTP}}{v_{HWFET} - v_{FTP}} \right) \times \frac{UDC_{im}^{test}}{UDC_{ij}^{model}} + \frac{v - v_{FTP}}{v_{HWFET} - v_{FTP}} \times \frac{EUDC_{im}^{test}}{EUDC_{ij}^{model}}$$

for j = benzinbiler uden katalysator og dieslbiler.

Testresultaterne for de tre biltyper er præsenteret i Afsnit 3.1.2, mens de tilsvarende resultater fra simuleringmodellen fra køremønsterundersøgelsen er vist i nedenstående tabel.

Tabel 3.10 Energi- og emissionsfaktorer for standardtestcyklerne, beregnet ved hjælp af simuleringmodellen fra køremønsterundersøgelsen.

gram/km	Benzin m. katalysator		Benzin u. katalysator		Dieselbiler	
	FTP	HWFET	UDC	EUDC	UDC	EUDC
Brændstofforbrug	78.5	50.8	107.9	55.3	88.1	47.2
CO	1.65	0.32	27.5	12.8	1.38	0.61
HC	0.146	0.06	2.82	1.11	0.15	0.06
NO _x	0.22	0.17	2.17	2.58	1.17	0.65
Partikler	-	-	-	-	0.28	0.18

Kilde: Beregninger foretaget af SCS-engineering, 1996.

3.1.5 Slitage

Bilernes emissioner ændrer sig efterhånden som motor og katalysator slides. Det korrigeres der for i beregningsmodellen. Brændstofforbruget er ikke påvirket af slitage ved moderate kørselsomfang ifølge hollandske undersøgelser (In-Use-Compliance annual report 1991-92).

Der er foretaget flere undersøgelser af slitagens betydning. Emissionsmålinger af brugte biler udføres først og fremmest med de to formål: For det første for at estimere de samlede emissioner af en større bilpark med en given aldersfordeling; og for det andet - især for katalysatorbilernes vedkommende - at undersøge, i hvilket omfang køretøjerne på gaden opfylder lovgivningens emissionsnormer, der kræves opfyldes inden for de første 80.000 km.

Der er nogen spredning på undersøgelsesresultater. En vigtig årsag hertil er formentlig, at det statistiske materiale har været begrænset, blandt andet på grund af problemer med at genfinde de samme biler 50.000 eller 80.000 km senere. Alle kilder antager, at forværelserne sker lineært med kørte kilometer, formentlig fordi hverken datamaterialet eller den teoretiske viden kan understøtte noget andet principielt forløb med nogen særlig vægt.

Endnu er der kun et spinkelt materiale til at belyse emissions-udviklingen ved meget høje kilometertal. I TEMA-modellen er det kun muligt at vælge en kilometerstand på mellem 0 og 120.000 km.

Katalysatorbiler

De fleste målinger af brugte katalysatorbiler har relation til en form for kontrol af katalysatorudstyr og motorens brændstof- og tændingssystem. Vurderingen af slitagens betydning på emissioner fra katalysatorbiler er baseret på et svensk datagrundlag fra Motortestcenteret under Statens Bilprovning i Sverige.

Statens Bilprovnings Motortestcenter (MTC) i Stockholm har to løbende måleprogrammer, benævnt A60 og CPA. CPA-testen foretages på nye eller næsten nye biler (de fleste har kørt under 1000 km). A60 er måling af biler i brug med det formål at kontrollere, at emissionsforholdene stadig opfylder lovkravene efter 50-80.000 km kørsel. Denne test viser først og fremmest, om katalysatoren og den automatiske regulering af brændstof og tænding stadig fungerer tilfredsstillende.

På grundlag af A60-målinger, som vi har modtaget fra MTC, er den gennemsnitlige emissionsforøgelse fundet som funktion af den kørte distance. I alt 211 biler fordelt på 54 typer er analyseret. Der er 2 til 8 biler af hver type. 20 af de 54 typer er suppleret med i alt 62 målinger af tilsvarende nye biler, altså CPA-målinger, af nogle af de samme modeller. I alt 273 målinger indgår altså i materialet, og bilerne har kørt fra 22 til 78.314 km.

Analysen er udført ved for hver bilmodel at udregne den gennemsnitlige emission og det gennemsnitlige kilometertal. I forhold hertil repræsenterer hver bil en kørt distance, der er et vist antal kilometer kortere eller længere, og en række emissionsværdier, der er en vis procentdel af gennemsnittet. Da der er tale om relative emissionsværdier, kan disse værdier sammenlignes for alle bilmodeller, og herudfra kan den gennemsnitlige relative ændring i emissionsværdier for hver 10.000 km bestemmes.

Resultaterne af analysen er vist i nedenstående tabel. Resultaterne fra en række andre kilder er anført til sammenligning.

Tabel 3.11 Analyser af slitageeffekten for katalysatorbiler

(ændring pr. 10.000km)	CO	HC	NO_x
Analyse af svensk materiale (MTC)	+10,7%	+6,8%	+9,8%
Laboratoriet for Energiteknik, 1987	+40%	+15%	+10%
Tysk undersøgelse ¹⁾	+23%	+13%	+4%
SFT ²⁾	+16%	+12%	+16%
Hollandsk undersøgelse ³⁾	+7%	+7%	+4%
Slitageeffekt anvendt i TEMA	+11%	+7%	+10%

1) Den tyske undersøgelse stammer fra et conferenceindlæg fra dr. Pischinger, FEV Motorenteknik, ved AUTO 2000-symposiet i Bruxelles 1992.

- 2) Norske målinger er publiceret i rapporten "Utslipp fra veitrafikken i Norge" af Statens Forurensningstilsyn (SFT), 1993.
- 3) Den hollandske kilde er In-Use-Compliance annual report 1991-92.

Benzinbiler uden katalysator

En væsentlig del af den danske bilpark er stadig benzinbiler uden katalysator, og en væsentlig del af emissionerne vil stadig komme fra denne gruppe køretøjer i de kommende år. Der er ikke nyere undersøgelser af emissionerne fra disse ældre køretøjer.

Tabel 3.12 Oversigt over slitageeffekt for biler uden katalysator

(ændring pr. 10.000 km)	CO	HC	NO_x
Laboratoriet for Energiteknik, 1987	+4%	+1%	-1%
Norsk undersøgelse (SFT 1993)	+3,3%	+2%	+0,7%
Slitageeffekt anvendt i TEMA	+4%	+1%	-1%

Lab. f. Energiteknik's tal er baseret på målinger ved km-stand på ca. 100.000 i forhold til *ny bil*. De norske tal er skøn foretaget i forbindelse med en undersøgelse publiceret af Statens Forurensningstilsyn, 1993. Det ses, at der er god overensstemmelse mellem de to kilder, hvorfor der ikke er nogen grund til at opdatere de ældre tal fra LfE.

Dieslbiler

Til belysning af motorslitagens betydning for emissioner og energiforbrug for dieseldrevne biler er anvendt den hollandske In Use Compliance rapport for 1993-94. Her er foretaget målinger på 64 biler fordelt på 8 modeller ud fra testcyklen Eurotest (= 4 gange UDC + 1 gang EUDC). Bilerne havde kilometertal fra 5.000 km til 191.000 km.

Disse data er analyseret ved at udregne den gennemsnitlige emission og det gennemsnitlige kilometertal for hver bilmodel. I forhold hertil repræsenterer hver observeret bil en kortere eller længere kørt distance med tilhørende relative afvigelser i forhold til den gennemsnitlige emissionsfaktor. Da der er tale om relative emissionsværdier, kan disse værdier sammenlignes for alle bilmodeller, og herudfra kan den gennemsnitlige relative forværrelse pr. 10.000 km for emissionsfaktoren bestemmes.

Resultaterne af analysen er sammenfattet i nedenstående tabel.

Tabel 3.13 Oversigt over slitageeffekt for dieslbiler

(ændring pr. 10.000 km)	CO	HC	NO _x	CO ₂	Partikler
Analyse af hollandske tal	-0,26%	-1,91%	0,16%	0,06%	- 1,96%
Slitage anvendt i TEMA	0%	0%	0%	0%	0%

Gennemsnitlige ændringer i emissioner fra dieslbiler pr. 10.000 km. Ændringer i CO₂ betragtes som udtryk for ændringer i energiforbrug.

Som vist er der tale om meget små ændringer, som har et meget lavt statistisk signifikansniveau. På baggrund heraf er der valgt ikke at regne med ændringer i dieslbilernes emissionsfaktorer som følge af slitage.

Sammenhæng mellem alder og kilometerstand

Forværrelsen af en bils emissioner over tiden afhænger blandt andet af vedligeholdelsesstandard. De viste tal er gennemsnit over meget store variationer fra bil til bil. Særligt katalysatorbiler, som er nogle år gamle, udviser store variationer i den relative stigning af emissioner.

Hvis det som brugerparameter i stedet for kørte km ønskes at bruge bilens alder i år (a), beregnes benyttes en skønnet kilometerstand (D) ud fra formlen:

$$D = 25.400 a \div 530 a^2$$

Denne formel er en god approksimation for den gennemsnitlige kilometerstand for den danske bilpark (3), for biler op til omtrent 18 år gamle. For en 5 år gammel bil kan der eksempelvis regnes med en km-stand på 114.000 km.

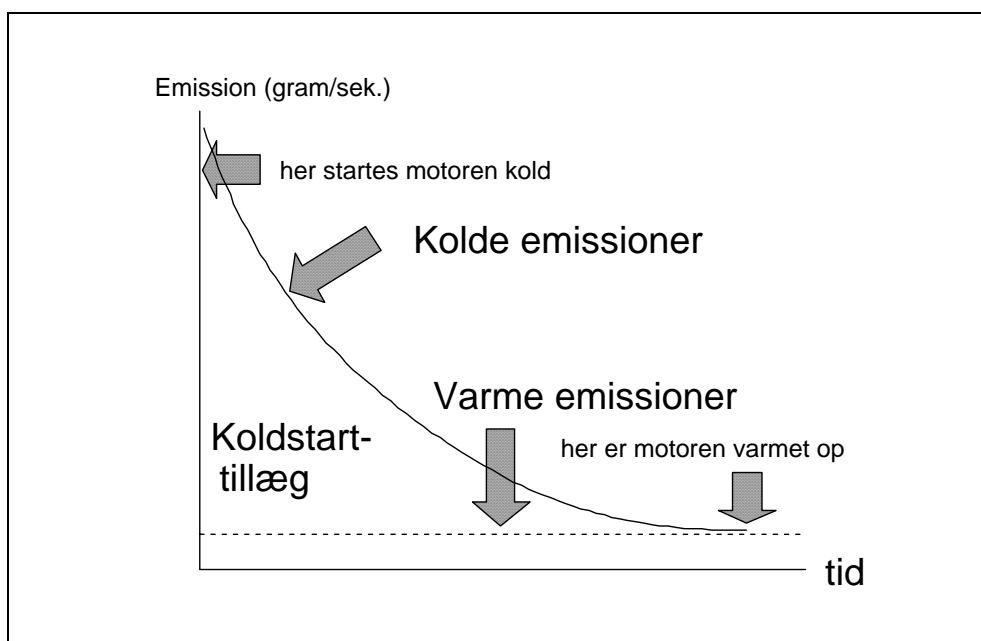
Som *default*-værdi benyttes 0 km for nye bilmodeller, og en værdi ifølge formelen ovenfor for modeller af ældre årgang.

3.1.6 Koldstarttillæg

Bilernes motorer er konstrueret til en driftstemperatur på ca. 90°C. Når en bil starter efter en tids stilstand vil motoren (og eventuelt katalysatoren) have samme temperatur som omgivelserne, dvs. den er "kold", og der vil gå en vis tid inden den er driftsvarm. I den periode vil energiforbrug og emissioner være forhøjede. Det skyldes, at motoren endnu ikke forbrænder brændstofblandingen optimalt, at den eventuelle katalysator først opnår fuld effekt, når dens indvendige temperatur er nået op på flere hundrede grader, og endelig den forhøjede indre friktion i motoren, der giver større energi- og dermed brændstofforbrug. For katalysatorbiler gælder det især for emissionerne af CO, HC og til dels NO_x, idet katalysatoren slet ikke er aktiv, når den er kold. Emissionsfaktorerne pr. km er for katalysatorbiler mange gange større med kold motor i forhold til med varm. Derfor bliver den relative betydning af koldstartemissionerne større, efterhånden som udbredelsen af katalysatorer stiger.

Betydningen af kolde starter er dog også vurderet for benzindrevne biler uden katalysator og for dieseldrevne biler.

Da opvarmningstiden til arbejdstemperatur for motor og katalysator er længere, jo lavere omgivelsenes temperatur er, er der en omvendt sammenhæng mellem koldstarttilæggenes størrelse og udetemperaturen. Dette er også vist i tabellerne nedenfor. Af beregningsmæssige og konsistensmæssige hensyn antages det, at denne sammenhæng altid er lineær, selv om én af kilderne (VTI) for nogle af emissionerne indikerer en ikke-lineær sammenhæng.



Figur 3.2 Illustration af koldstartstillægget

Koldstarttillæg regnes uafhængigt af bilmodel

Der er foretaget emissionsmålinger af en lang række biler af mange forskellige modeller med både varm og kold start. Det er derfor principielt muligt at finde koldstarttillæg for de enkelte bilmodeller, der er målt. Imidlertid tyder et nærmere studium af de konkret målte koldstarttillæg på, at det ikke giver mening at differentiere værdierne på forskellige bilmodeller. I TEMA-modellen afhænger de anvendte koldstarttillæg derfor kun af, om den pågældende bil er diesel- eller benzindrevet, og i sidstnævnte tilfælde, om den er med eller uden katalysator, mens tillæggene altså regnes uafhængigt af den konkret valgte bilmodel.

Vurderingen er gjort på den måde, at koldstarttillægget for 64 biler fordelt på 8 bilmodeller er analyseret dels samlet, dels hver model for sig. Koldstarttillæggene betragtet hver model for sig viser sig at have en indbyrdes relativ spredning på 39%, mens samtlige 64 biler gav en relativ spredning på koldstarttillæggene på 53%. Dette kan fortolkes derhen, at kun en lille del af variationen på koldstarttillægget fra bil til bil kan henføres til bilmodellen, mens den største del af variationen må henføres til andre forhold, herunder hvad man må betegne som tilfældige variationer. Hertil kommer, at det kun er meget få bilmodeller, hvor vi har mulighed for at finde koldstarttillæg for 8 biler. For de fleste målin-

ger, der foreligger separat fra de enkelte biler, er der kun 3 for hver model, og det ville betyde, at et modelspecifikt koldstarttillæg, bestemt som gennemsnit af de tre biler, ville blive endnu mere usikkert. Det ville derfor være falsk varedokumentation at tildele de enkelte bilmodeller deres egne koldstarttillæg.

Kildemateriale

Hensigten med dette afsnit er at give et overblik over de væsentligste nyere undersøgelser, der er foretaget omkring koldstartemissionernes omfang, og herudfra vurdere den mest hensigtsmæssige måde at behandle dette tillæg i TEMA-modellen. De undersøgelser, som er inddraget, er følgende:

VD: Vejdirektoratet, rapport 7, 1994: "Koldstartsanalyse". Undersøgelsen er baseret på materiale fra Laboratoriet for Energiteknik, DTU, Report RE 91-5: Individual and Public Transportation - Energy Consumption Models. Kilde "VD" opererer med et fast koldstarttillæg i gram pr. sekund og regner med en variabel koldstart-tid afhængig af temperaturen. De viste tal er ved 7,7°C, som anvendes som middeltemperatur på årsbasis i Danmark. En omregning af den anvendte temperaturafhængighed som vist giver en noget mindre temperaturafhængighed for CO og NC end de øvrige undersøgelser. Denne kilde er baseret på ældre data end de øvrige kilder.

VTI-rapport 400A: "Pollutant emissions from passenger cars - Influence of cold start, temperature and ambient humidity. Rapporten tager udgangspunkt i FTP-målingernes faseopdeling i *cold transient*, hvor motoren varmes op fra kold tilstand; *stationary*, hvor motoren regnes driftsvarm; og *hot transient*, hvor motoren efter 10 minutters stilstand gennemkører præcis samme cyklus som under *cold transient*. De viste tal er forskellen i emissioner mellem *cold transient* og *hot transient*. Den korte pause før *hot transient* tillader dog motorens temperatur at aftage noget, så den observerede forskel kan ikke udgøre hele koldstarttillægget. For at korrigere herfor er der udført modificerede FTP-tests uden de 10 minutters pause, således at *hot transient* i realiteten gennemkøres med helt driftsvarm motor. Resultaterne er anført under "do. korrigeret". Disse tal danner baggrund for de værdier, der benyttes i TEMA-modellen. Temperaturen indflydelse er undersøgt, og resultaterne er anført.

SFT: "Utslipp fra veitrafikken i Norge." Statens forurensningstilsyn, 1993. Rapporten betragter koldstartemissioner som uafhængige af temperaturen ved 20°C og derover, men øgende med faldende temperatur herunder. Rapporten refererer tyske undersøgelser, der ligesom VTI's undersøgelse som beskrevet ovenfor tager udgangspunkt i FTP-måleproceduren, dog uden at korrigere for, at motoren ved "varm" start har været slukket i 10 minutter. Den opgivne temperaturafhængighed svarer godt til øvrige undersøgelser, og det gør rapportens andre resultater (om dieslbiler og benzinbiler uden katalysator) også.

"Laveskog" er en mindre undersøgelse foretaget på Motortestcenteret under Statens Bilprovning, i 1993. Resultaterne er refereret både i SFT- og i VTI-rapporten. Den bygger på målinger af blot 5 benzindrevne biler med katalysator. Den er taget med her for overblikkets skyld, og dens resultater stemmer

godt med de øvrige, både hvad angår de absolutte værdier og hvad angår temperaturafhængigheden.

"TNO" i Holland har udgivet målerapporter med et stort materiale af emissionsmåleresultater fra personbiler. I 1993-94-rapporten findes målinger fra 64 dieseldrevne biler fordelt på 8 modeller (disse målinger er også udnyttet til at bestemme motorslitagens indflydelse på emissioner fra dieselmotorer). Det er disse målinger, der er grundlaget for tallene i tabellen. Målingerne er foretaget efter den ældre europæiske by-cyklus UDC, dels med kold start, dels med varm. Koldstart-tillægget er da bestemt som differencen mellem de to. For benzinerbiler er der ikke tilsvarende sammenhørende målinger med varm og kold motor. Datamaterialet kan derfor ikke uden videre benyttes til at fastsætte koldstart-tillæg for benzindrevne biler.

VTI-rapportens resultater for koldstarttillæggenes absolutte størrelser er metodemæssigt bedst beskrevet og er valgt til brug i TEMA-modellen. Temperaturafhængigheden er dog ikke vist så klart som i SFT-rapporten, hvorfor metoden beskrevet af SFT benyttes til temperaturkorrektur i TEMA-modellen. For temperaturer over 20°C korrigeres koldstarttillæggene ikke for temperatur.

Både "VD" og "VTI-400A" finder dog, at NO_x-tillægget ved en kold start er uden nogen sikker sammenhæng med den omgivende lufts temperatur. I TEMA-modellen er det derfor valgt at regne dette tillæg som uafhængigt af temperaturen.

Corinair indeholder også forskrifter til beregning af koldstarttillæg. Beregningsmetodikken er her at gange de varme emissioner med visse faktorer, for den periode, en bil er "kold". Der er altså ikke tale om faste tillæg opgivet i gram pr. start, men om at emissionerne af de respektive stoffer er så og så mange gange højere, indtil bilens motor er varm. Også Corinair-modellen beskriver koldstarttillæggene som temperaturafhængige. Modellen antager for flere af stof/køretøjskombinationerne, at der ikke forekommer koldstarttillæg ved 30 grader og derover. Der er oplyst koldstartkorrektioner for dieseldrevne biler og benzindrevne uden katalysator. Desværre kan disse tillæg ikke uden videre sammenlignes med de øvrige undersøgelser.

Personbiler med katalysator

I tabellen herunder er samlet nøgletal fra forskellige undersøgelser resultater af koldstarttillæg for personbiler med katalysator. Kommentarer og konklusioner er anført under skemaet.

Tabel 3.14 Kolstartstillæg for personbiler med katalysator.

Kilde	CO	HC	NOx	benzin
VD				
ved 7,7 °C	52g	16g	(+150%)	-
forøgelse pr. °C under 20°C	ca. 2,6%	ca. 2,6%	-	-
beregnet tillæg ved 20°C	35g	11g	-	-
VTI-400A				
ved 20 °C	21g	2,5g	1,26g	0,081 l
do. korrigeret	26,9g	3,7g	1,9g	-
forøgelse pr. °C u. 20°C	+23%	+17%	0	5-15%
SFT målinger				
ved 20 °C	13,7g	2,0g	1,1g	0,07 l
forøgelse pr. °C u. 20°C	+20%	+13%	+10%	+8%
Laveskog (1992)				
ved 20 °C	23g	4,0g	2,6g	-
do. -2 °C	96g	12,9g	4,6g	-
≈ forøgelse pr. °C u. 20 °C	+14%	+10%	+3½%	-
Anvendt i TEMA-modellen				
ved 20 °C	27g	3,7g	1,9g	0,08 l^{*)}
forøgelse pr. °C u. 20 °C	+20%	+13%	0%	+8%
ved 0 °C	135g	13,3g	1,9g	0,21 l^{*)}

^{*)} 0,08 l svarer til 2,56 MJ og 0,21 l til 6,7 MJ.

VTI-rapportens resultater er benyttet i TEMA-modellen. Metoden, der benyttes her, er at sammenligne FTP-cyklens varme og kolde del, og derefter korrigerer for, at den "varme" del ikke er helt varm, men afkølet i 10 minutter. For tillæggets temperaturafhængighed er benyttet den norske SFT-rapports tal, da de er klart dokumenteret. For temperaturer over 20°C benyttes ikke temperaturkorrektur.

Personbiler uden katalysator

I tabellen herunder er samlet nøgletal fra forskellige undersøgelser resultater af koldstarttillæg for personbiler uden katalysator. Kommentarer og konklusioner er anført under skemaet.

Tabel 3.15 Koldstartstillæg for personbiler uden katalysator.

Kilde	CO	HC	NO _x	benzin
VD				
ved 7,7 °C	74g	16g	-	-
forøgelse pr. °C u. 20°C	ca. 2,6%	ca. 2,6%	-	-
VTI-400A				
20°C	62g	5,4g	0,3g	0,086 l
forøgelse pr. °C u. 20°C	+ 0 - 25%	+ 0 - 25%	0	+5%
SFT				
ved 20 °C (ECE 15-04)	40g	3,4g	-0,9g	0,08 l
forøgelse pr. °C u. 20 °C	+11%	+9%	-5%	+5%
Anvendt i TEMA				
ved 20 °C	62g	5,4g	0,0g	0,086 l^{*)}
forøgelse pr. °C u. 20°C	+11%	+9%	0%	+5%
ved 0°C	198g	15,1g	0g	0,17 l^{*)}

^{*)} 0,086 l svarer til 2,75 MJ og 0,17 l til 5,44 MJ.

For NO_x angives små tillæg med både positive og negative fortegn. I TEMA-modellen regnes tillægget lig nul, og uafhængigt af temperaturen. Forøvrigt benyttes VTI's resultater for koldstarttillæggenes absolutte størrelser, og SFT's resultater til temperaturafhængighed. Bemærk den ret fine overensstemmelse mellem VTI og kilden SFT. For temperaturer over 20°C korrigeres koldstarttillæggen ikke for temperatur.

Dieseldrevne personbiler

I tabellen herunder er samlet nøgletal fra forskellige undersøgelser resultater af koldstarttillæg for dieseldrevne personbiler. Kommentarer og konklusioner er anført under skemaet.

Tabel 3.16 Koldstartstillæg for dieselmotorer.

Kilde	CO	HC	NOx	partikler	benzin
In-Use-Compliance (Holland)	1,0g	0,11g	0,4g	0,13g	0,06 l
VTI-400A (20°C)	1,9g	0,29g	0,58g	0,23g	0,069 l
SFT refererer Corinair 1991 biler fra før '91 (20°C)	1,2g	0,3g	0,2g	0,12g	0,06 l
biler fra 91 og senere	0,9g	0,16g	0,2g	0,05g	0,06 l
forøgelse pr. °C <20°C	+10%	+26%	18%	+82%	+4%
Anvendt i TEMA-modellen					
ved 20 °C	1,9g	0,29g	0,58g	0,23g	0,069 l^{*)}
forøgelse pr. °C u. 20°C	+10%	+26%	+18%	+82%	+4%
værdi ved 0°C	5,7g	1,80g	2,67g	4,00g	0,124 l^{*)}

^{*)} 0,069 l svarer til 2,5 MJ og 0,124 l til 4,4 MJ.

Dieseldrevne bilers koldstartforhold er klart mindre undersøgt end de benzindrevnes. Som det ses af skemaet antyder kun én af kilderne, hvordan temperaturen påvirker koldstarttillæggene. Partikelemissionerne ved koldstart er anført at være stærkt afhængige af temperaturen, men dette er ikke kommenteret i kilden. Det ville derfor være værdifuldt med andre undersøgelser til at understøtte dette resultat.

Som for de øvrige biltyper vedkommende udnyttes VTI's resultater til at angive emissionstillæggenes absolutte størrelser, mens "N"s resultater udnyttes hvad angår temperaturafhængigheden. For temperaturer over 20°C korrigeres koldstarttillæggene ikke for temperatur.

Sammenfatning

Følgende koldstarttillæg benyttes for personbiler i TEMA-modellen:

Tabel 3.17 Koldstarttillæg ved 20°C samt temperaturafhængigheden for personbiler

Motortype	CO	HC	NOx	partikler	brændstof
benzin uden katalysator	62g	5,4g	0g	-	0,086 l
forøgelse pr. °C under 20°C	+11%	+9%	+0%	-	+5%
benzin med katalysator	27g	3,7g	1,9g	-	0,080 l
forøgelse pr. °C under 20°C	+20%	+13%	+0%	-	+8%
diesel	1,9g	0,29g	0,58g	0,23g	0,069 l
forøgelse pr. °C under 20°C	+10%	+26%	+18%	+82%	+4%

Koldstarttillæg ved temperaturen t beregnes generelt på følgende måde:

$$\text{tillæg}(t) = \text{tillæg}(20^\circ\text{C}) (1 + \text{forøgelsesprocent} \times (20^\circ\text{C} - t))$$

dog sådan, at der ved temperaturer over 20°C benyttes koldstart-tillæg gældende for 20°C.

3.1.7 Fordampningstab

Foruden de HC-emissioner, der kommer ud af bilens udstødningssystem, forekommer der fordampning af kulbrinter fra motor og tank. Det følgende er hentet fra rapporten *BILEMIS - en prognosemodel til beregning af køretøjsemissioner* (6). Der regnes ikke med fordampningstab fra dieslbiler.

Der er 4 fordampningskilder:

- "Diurnal" - fra brændstoftanken på grund af variationer i udetemperaturen;
- "Hot soak" - fra motoren (karburatoren) efter stop af varm motor;
- "Running loss" - fordampning under kørsel;
- Tankningstab.

Den førstnævnte fordampningstype "Diurnal" medtages ikke her, da dette tab optræder uafhængigt af, om eller hvordan eller hvor meget bilen kører. Den sidste - fordampning ved tankning - behandles heller ikke her. Hot Soak afhænger af temperaturen og beregnes i TEMA-modellen efter nedenstående udtryk.

$$E_{m.kat}^H = \exp(-2,410 + 0,0230 RVP + 0,0941 T) \quad \{2,9 \text{ gram v. } 15^\circ\text{C}\}$$

$$E_{u.kat}^H = \exp(-1,644 + 0,0199 RVP + 0,0752 T) \quad \{3,6 \text{ gram v. } 15^\circ\text{C}\}$$

hvor

HotSoak er i gram emission for hver gang, motoren standses. De to formler gælder for biler **uden** hhv. **med** fordampningsbegrænsende udstyr;

RVP er brændstofflygtighed i kPa (90 kPa i eksemplerne)

T er den aktuelle udetemperatur (15 grader C i eksemplerne).

RVP fastlægges i specifikationen til benzin, og varierer mellem 80 og 95 kPa afhængigt af årstiden. Denne variation betyder relativt lidt for størrelsen af de resulterende fordampninger, og der regnes derfor i TEMA-modellen med RVP = 90 kPa som konstant.

I praksis kan man regne med, at biler udstyret med katalysator har fordampningsbegrænsende udstyr, mens biler uden katalysator ikke har dette udstyr.

Antallet af motorslukninger regnes lig antallet af koldstarter.

Running Loss er målt på en 45 km lang tur og udtrykt i gram:

$$\text{RunningLoss}_{45} = \exp(-5,967 + 0,0426RVP + 0,1773T) \quad \{1,7 \text{ gram v. } 15^{\circ}\text{C}\}$$

Det regnes kun aktuelt for køretøjer uden fordampningsbegrænsende udstyr. Det regnes uafhængigt af kørselsmønsteret, men proportionalt med strækningen. Udtrykt i gram pr. km bliver formeludtrykket derfor:

$$e^l = \exp(-9,774 + 0,0426RVP + 0,1773T) \quad \{0,038 \text{ g/km v. } 15^{\circ}\text{C}\}$$

COPERT-modellen (litt. 18) beregner efter lignende formler, men skelner i formlerne mellem Hot og Warm emissions - desværre uden at redegøre for betydningen af forskellen.

Tabellen herunder viser fordampningstabenes betydning i forhold til basisemissioner og koldstarttillæg ved forskellige temperaturer.

Tabel 3.18 Fordampningstab i perspektiv.

	m/katalysator		u/katalysator		enhed
	0°C	20°C	0°C	20°C	
Hot Soak	0,712	4,674	1,158	5,212	gram
Koldstarttillæg	13,32	3,7	15,1	5,4	HC
Running loss	0	0	0,003	0,091	gram/km
Forbrændingsemission v. bykørsel	0,06		1,8		HC

Måned	T
januar	0°C
februar	0°C
marts	3°C
april	6°C
maj	11°C
juni	15°C
juli	16°C
august	16°C
september	14°C
oktober	10°C
november	5°C
december	1°C
Månedsgennemsnit målt i København.	

Atmosfæriske forhold

Lufttemperaturen påvirker som nævnt koldstarttillæg og fordampningstab. Som brugerparameter kan vælges aktuell udetemperatur eller aktuell måned. Vælges måned, benyttes pågældende måneds gennemsnitstemperatur i beregningerne. Hvis brugeren hverken specificerer måned eller temperatur, benyttes gennemsnitstemperaturen i Danmark (7,7°C ifølge kilde 6) i beregningerne.

Temperaturer som månedsgennemsnit målt i København fremgår af skemaet til venstre (9).

Lave temperaturer giver høje koldstart-emissioner (især CO/kulilte), mens høje temperaturer giver høje fordampningstab (HC/kulbrinter). Temperaturen indflydelse er derfor ikke éntydig.

Vindforhold og luftfugtighed har også indflydelse på emissioner og energiforbrug på den enkelte tur, men inddrages dog ikke i beregningerne.

3.1.8 Belægning

Belægningen - altså antal personer i bilen - influerer på bilens aktuelle vægt og dermed til en vis grad på energiforbrug og emissioner. Den relative vægtvariation på op til omtrent 35% regnes dog ikke at påvirke emissioner og energiforbrug for rejsen (i modsætning til lastbiler, hvor vægtforøgelsen kan være over 200%). Derimod er bilens passagerbelægningen interessant i relation til emissioner i forhold til det udførte persontransportarbejde, angivet i personkilometer.

Belægningsgraden kan vælges af brugeren. Som *default*-værdi bruges det landsdækkende gennemsnitstal fra *Personer pr. bil* (Trafikministeriet & Vejdirektoratet, maj 1993): 1,70 personer pr. bil (1992-tal). Medtages de små personvognslignende varevogne, er gennemsnittet 1,68.

3.2 Brugerspecificerede parametre

På baggrund af det foregående afsnit kan der foretages en sammenfatning af hvilke brugerparametre, der indgår i modellen. Af de ialt syv brugerparametre skal de to specificeres af brugeren:

- **Bilmodel:** Blandt syv modeller (Eks.: VW Polo 1,3 l)
- **Strækning:** Total antal kørte kilometer

De øvrige fem er valgfrie, hvor programmet anvender default-værdier i overensstemmelse med de valg, der er foretaget af brugeren:

- (default:)
- **Køremønster:**
 - andel bykørsel (35%)
 - andel motorvejskørsel (15%)
 - andel landevejskørsel (55%)
 - **Rejsehastighed:**
 - for bykørsel (30 km/t)
 - for motorvejskørsel (110 km/t)
 - for landevejskørsel (70 km/t)
 - **Belægning:**
 - Antal personer i bilen (1,7 pers./bil)
 - **Antal koldstarter:**
 - 0, 1, el. 2 eller 3 koldstarter (1 koldstart)
 - **Motorslitage:** (afhængigt af alder)
 - Angivet i 10.000 km eller
 - Bilens alder
 - **Udetemperaturen:** (årgennemsnit)
 - Årgennemsnit 7,7°C eller
 - Måned eller
 - Udetemperatur (°C)

3.3 Beregningsgangen for energiforbrug og emissioner

De samlede emissions- og energiberegninger for personbiler udføres på følgende måde:

Generelt

$$E_{ij}^{total} = N \times [E_{ij}^K(T) + E_{HC}^H(T)] + \sum_r [S^r \times e_i^r + e_{HC}^r(T)]$$

med

index

i = for emissionstyper (CO, HC, NO_x, partikler og brændstofforbrug),

j = index for motortyper (m.kat, u.kat, diesel),

r = vejtyper (by, landevej, motorvej),

Emissioner i gram:

E_i^{total} = Samlede emissioner af type 'i' fra turen,

E^K = Koldstartstarttillæg,

E^H = *Hot soak* fordampningstab (kun HC),

Emissionsfaktorer i gram/km:

e_{HC}^r = 'Running loss' (kun HC),

e_i^r = Den slitagekorrigerede og hastighedsafhængige modelspecifikke emissionsfaktor, der beregnes som

$$e_i^r(v_r, D, m) = e_{im}^{test} / e_{ij}^{model} \times e_{ij}(v^r) \times [d_{ij}(D / 10.000km) + 1]$$

hvor d_{ij} den relative emissionsstigning af i for j pr. 10.000 kørt km. Beregningen af $e_{ij}(v)$ er beskrevet i afsnit 3.1.4.

Brugerspecificerede parametre:

S^r = kørte distance på vejtype r ;

v^r = gennemsnitlige hastighed på vejtype r ;

m = modelbetegnelsen (VW Polo ,);

N = antal koldstarter på turen;

D = motorslitagen i kilometer;

T = udetemperaturen i °C.

4 Busser

4.1 Metode og determinerende faktorer

Emissioner og energiforbrug for en given busrejse beregnes med udgangspunkt i EU-målinger foretaget på pågældende busmotorer, og korrigeret efter køretøjsdata og aktuelle køremønstermålinger foretaget for busser. Herudfra dannes emissionsfaktorer, der tager hensyn til de typiske forhold i forbindelse med faktiske rejser. Emissionsfaktorerne kombineret med rejsens længde giver dermed det samlede energiforbrug og de samlede emissioner.

I beregningerne kan der vælges mellem 4 busmodeller. Foruden valg af busmodel indgår rejsehastigheden samt belægningen, dvs. antal passagerer i bussen.

De faktorer, der for en given rejse bestemmer energiforbrug for og emissioner fra en bus, kan hensigtsmæssigt deles i tre grupper:

- ny eller gammel teknologi (moderat betydning for energiforbrug og emissioner)
- motor- og busfabrikat (mindre betydning for energiforbrug og emissioner)
- køremønster og hastighed (stor betydning for energiforbrug og emissioner).

Betydningen af de to første uddybes nedenfor. Betydningen af køremønster og hastighed beskrives i et senere afsnit.

Hertil kommer diverse faktorer som passagerbelægning, vejr og terræn - de er ikke behandlet nærmere i TEMA-modellen. Modvind og stigninger kan naturligvis give dramatiske stigninger i energiforbrug og emissioner, men medvind og fald regnes generelt at opveje disse forhold. Betydningen af passagerbelægningen er ikke undersøgt nærmere, og forholdet er ikke inddraget i de tidligere projekter om energiforbrug og emissioner fra kollektiv transport ((2)&(8)). Derfor er dette forhold heller ikke inddraget i TEMA-modellen. Det er dog ikke udtryk for, at det ikke skønnes at have nævneværdig betydning. En undersøgelse af betydningen af passagerbelægningen vil uden tvivl forbedre beregningen af bussernes energi- og emissionsforhold.

4.2 Ny eller gammel teknologi

Det er først og fremmest udviklingen i motorteknologi, der har haft betydning for emissionerne i de seneste år. Emissionsværdierne er generelt blevet reduceret, og motorernes brændstofudnyttelse er også blevet lidt bedre. Enkelte nye projekter udnytter ny teknologi på karrosserisiden - nye materialer med særlig lav vægt - til at sænke energiforbruget.

4.3 Motor- og busfabrikat

Udviklingen er foregået nogenlunde parallelt hos de store motorfabrikanter, og forskellen fra fabrikat til fabrikat er nærmest forsvindende i forhold til forskellen mellem de ældre og de nyere motorer (af samme fabrikat), der findes i dagens buspark.

Vægten af bussen har en reel betydning for energiforbruget, særligt ved bykørsel med hyppige start og stop, men derudover betyder busfabrikat og -type i sig selv kun lidt for energiforbruget. I modsætning til personbiler, hvor hver bilfabrik som regel har sit eget program af motormodeller, kan de fleste busmodeller forsynes med tre-fire forskellige motorfabrikater - og flere motorvarianter indenfor hvert fabrikat (Volvos busser kører dog med Volvos egne motorer). Det er derfor motortypen, der primært er afgørende for den del af energi- og især emissionsforholdene, der er knyttet til busmodellen.

4.4 Bus-/motor-valgmulighederne i TEMA-modellen

Volvo har den største markedsandel af alle mærker i Danmark (pr. 1.1.95 ca. 35%, svarende til lidt over 2200 busser), og da Volvo også er relativt åbne med hensyn til udlevering og diskussion af motordata, er dette mærke valgt til overvejende at repræsentere de danske busser.

Der kan vælges mellem 4 motorvarianter: en gammel (fra ca. 1980), en typisk (ca. 5 år gammel), en ny (fra 1994 eller senere), og den sidste med katalysator monteret.

Det var hensigten også at kunne vælge en separat langtursbus. Det er imidlertid fundet, at forskellen i energiforbrug og emissioner for en Volvo bybus og for en langtursbus er lille, når der korrigeres for forskel i køremønster - den er formentlig mindre end usikkerheden i beregningen vil være. De langturs- og regionalbusser, der er på markedet, fås generelt med flere mulige motormodeller, og valg af motor spiller generelt en større rolle for emissioner og energiforbrug end forskel i bustype. Motorteknologien til langtursbusser er ikke generelt forskellig fra bybusserne.

For beregninger af energiforbrug og emissioner fra langtursbusser kan man altså vælge en af de nævnte Volvo-modeller, som egentlig er bybusser.

4.4.1 Grunddata for emissioner

Indtil nu er der ikke udført emissionsmålinger på hele busser, sådan som det er sket for personbiler. Data for busmotorer foreligger som standardiserede såkaldte 13-punkts-målinger, hvor motorenes brændstofforbrug og emissioner er målt for 13 forskellige belastningssituationer, som foreskrevet i en ECE-norm (R49). Hvor EU-standarder for personbiler og varevogne udtrykker emissionsforholdene i gram pr. kørt kilometer, bruges der for lastbilmotorer i stedet specifikke mål; dvs. emissioner i forhold til det mekaniske arbejde, som motoren leverer. Enheden er normalt gram pr. kilowatt-time (g/kWh). Tallene for de lastbilmodeller, der kan vælges mellem, er baseret på svenske målinger af en lastbilmotor med turbolader og intercooler og med brug af almindeligt dieselbrændstof uden særligt lavt svovlindhold.

Ud fra disse testresultater samt ud fra fysiske data om busserne samt ud fra registrerede køremønstre målt på busser i trafikken, er emissioner og forbrug beregnet med en simulationsmodel, der er udviklet af Laboratoriet for Energiteknik og kort beskrevet i (2), (4) og (8).

Som nøgle-emissionstal for bus-motorerne benyttes en standard-vægtning af 13-punkts-målingerne. Denne vægtning bruges til at sammenligne motorer indbyrdes, og til at vurdere den enkelte motortype i forhold til gældende grænseværdier.

Det skal bemærkes, at de 13 *modes*, som motorerne er målt ved, alle er konstante belastningssituationer. Vi ved imidlertid, at ved belastningsændringer - de såkaldte *transienter* - forøges både energiforbrug og emissioner, men vi ved ikke hvor meget. I fremtiden vil motorenes egenskaber ved belastningsændringer formentlig komme til at indgå i godkendelsesbetingelserne. Af denne grund må vi antage, at de beregnede emissioner er noget undervurderede som de her beregnes, i hvert fald ved kørsel med hyppige belastningsændringer (bykørsel).

Emissionsfaktorerne (i gram pr. km) er fundet ved en regressionsanalyse af de emissioner, der i Køremønsterundersøgelsen (4) er beregnet ud fra de observerede køremønstre. Det er gjort ved en statistisk metode, der giver den bedste tilnærmelse af et såkaldt Taylor-polynomium til de emissioner der svarer til de konkrete observerede køremønstre fra Køremønsterundersøgelsen. Dette er gjort for hver kombination af køretøjstype og emissionstype.

4.4.2 Brændstofforbrug

Det aktuelle brændstofforbrug afhænger dels af bussens mekaniske energiforbrug: hvilken effekt skal motoren levere? dels af motorvirkningsgraden: hvor effektivt omdanner den brændstoffets energiindhold til mekanisk effekt.

Bussens mekaniske energiforbrug bestemmes af køremønster, vægt, rullemodstand, luftmodstand og transmissionstab. I praksis er variationer i køremønsteret den dominerende faktor.

En forbrændingsmotors specifikke brændstofforbrug i forbrugte gram brændstof pr. leveret kilowattime mekanisk arbejde er et udtryk for dens virkningsgrad. Ser man på busflådens spektrum af motorer, er der en tendens til, at motorerne grupperer sig i to med hensyn til specifikt forbrug: de fleste ligger på omkring 240 g/kWh, svarende til en virkningsgrad på 35%; mens en del af de nye ligger meget nær 200 g/kWh, svarende til en virkningsgrad på 42%.

4.5 Data for de udvalgte busser

De 4 valgte busmodeller er følgende:

- Volvo-1980'er. Bybus benyttet af HT. Turbolader, ikke intercooler. Repræsenterer de ældste bybusser, der bruges herhjemme. Modellen er under udfasning i HT, men kører stadig i betydeligt antal.
- Volvo-1992. Meget brugt af HT. Turbolader, ikke intercooler. Opfylder EEC 88/77-normerne - de som var gældende før EURO I trådte i kraft.
- Volvo-1994. Typisk nyanskaffelse fra 1994. Opfylder EURO-II-emissionsnormerne bortset fra partikelemissionerne.
- Volvo-1994-KAT. Svarer til Volvo-1994, men har påmonteret en såkaldt oxiderende katalysator, der halverer partikeludslippet og reducerer kulilte-emissionerne markant. Opfylder Euro-II-normerne.

De 4 busser er alle solobusser (ikke ledbusser) med ens karosseri og vægt. Egenvægten er ca. 11 ton, og vægten med fuld last (ca. 70 passagerer plus brændstof) bliver da ca. 16 ton.

Herunder angives de *motorspecifikke emissioner* for hver bustype - det vil sige emissionerne i forhold til motorens ydelse - enheden er gram pr. kilowatt-time (g/kWh). De sammenvejede 13-punkts-målinger - også kaldet R49-faktorer - for de 4 busmodeller er angivet i skemaet herunder.

Tabel 4.1 Emissionsdata for udvalgte Volvo-busser

Bus-model	Motor	NOx	HC	CO	Partikler	Energiforbrug
Volvo-1980	THD 100	18,0	0,65	1,90	0,30	238
Volvo-1992	THD 101 KF	13,8	0,50	1,3	0,36	210
Volvo-1994	THD 103 KF	6,14	0,36	0,63	0,16	207
Volvo-1994-KAT	THD 103 KF + kat	6,14	0,06	0,024	0,083	207
Pre-EURO (1988)		14,4	2,4	11,2	÷	
EURO I (1993)		8,0	1,1	4,5	0,36	
EURO II (1996)		7,0	1,1	4,0	0,15	

Kilde: Dansk Teknologisk Institut og fra Volvo Busser. Tallene gælder ultralet diesel.

4.6 Emissionernes hastighedsafhængighed

Emissionerne regnes om til gram pr. kilometer ved at udnytte ovenstående test-resultater og desuden bruge en 10-ton-lastbil som referencekøretøj. Energiforbruget og emissionerne ved forskellige hastigheder er kendte for 10-ton-lastbilen, og er redegjort for i afsnittet om lastbiler.

Bussers energiforbrug er i projekt *Energiforbrug ved individuel og kollektiv trafik i bygader* (8) kun bestemt op til 25 km/t. Det er antaget, at bussers energiforbrug og emissioner varierer med hastigheden efter samme mønster som en lastbil på ca. 10 t. Værdierne for lastbilen er korrigeret for forskellen i energiforbrug, forskellen i motorvirkningsgrad og forskelle i de motorspecifikke emissioner mellem den aktuelle bus og lastbilen (referencekøretøjet). Ud fra de foreliggende data (for busser kun ved lave hastigheder) giver denne fremgangsmåde god overensstemmelse hvad angår energiforbrug samt emissioner af CO og HC - mens sammenligningen antyder, at metoden overvurderer bussers emissioner af NO_x og partikler ved hastigheder over ca. 20 km/t. Dette kan afhjælpes ved gennemførelse af særskilte simulationer af buskøremønstre ved højere hastigheder.

4.7 Øvrige korrektioner

Bussers emissioner og brændstofforbrug korrigeres ligesom andre dieselskøretøjer *ikke* for motorslid eller for fordampningstab. Der opereres heller ikke med koldstart-tillæg for busser, især fordi start af kold motor vurderes at forekomme så sjældent (få gange om dagen), at effekten heraf på det gennemsnitlige dieselforbrugs-tal kan ignoreres. Desuden bliver brug af varmeramper (motorvarmere) stadig mere og mere almindelig i garagerne.

4.7.1 Strækningslængde

Beregningsmæssigt kan den samlede busrejse opdeles i indtil 3 delstrækninger, med hver deres rejsehastighed. Det vil typisk dreje sig om én strækning med bykørsel, én med landevejskørsel og én med motorvejskørsel. For hver delstrækning regnes emissioner og energiforbrug proportionale med længden i kilometer. De samlede udslip findes altså ved at gange emissionsfaktorerne (gram pr. km) med længden af de enkelte delstrækningerne, og addere.

4.7.2 Belægning

Bussers passagerbelægning varierer meget - især afhængigt af rute og klokkeslet. En fuld bus vejer ca. 40% mere end en tom. Belægningen påvirker energiforbrug og emissioner på to forskellige måder. For det første arbejder motoren hårdere (og/eller længere tid) under hver acceleration, når bussen er fuld, og for det andet vil en fuld bus (myldretid) normalt stoppe ved hvert eneste stoppested, mens en bus, der er næsten tom, normalt ikke vil have behov for at stoppe ved alle stoppesteder. Da rejsehastigheden bestemmes af køreplanen, vil disse to forskellige kørselsmønstre ikke afspejle sig i forskellige rejsehastigheder, og der er derfor behov for at korrigere ad anden vej.

Der er ikke foretaget konkrete analyser af, hvor meget det betyder for energiforbrug og emission om bussen kører fuld eller tom. Derfor er dette forhold ikke inddraget her - ligesom det heller ikke var inddraget i undersøgelsen af kollektiv vs. individuel trafik (2)(8).

Derimod udnyttes passagerbelægningen til beregning af emissioner (energi) i forhold til persontransportarbejdet, altså i gram (MJ) pr. personkilometer.

De udvalgte busser har som bybusser typisk plads til 70-75 passagerer, heraf omkring 1/2 stående. På landsplan er den gennemsnitlige belægning for rutebusser 9,9 ("Bustrafik 1994", Trafikministeriet 1995). Dette tal benyttes som *default*-værdi til beregningerne. Af tabellen nedenfor fremgår blandt andet gennemsnitlige passagerbelægnings for forskellige typer af rutebusser. Også de anførte hastigheder, som altså er rejsehastigheder inkl. tid ved stoppesteder, kan være af interesse for brugeren af TEMA-modellen.

Tabel 4.2 Busrutekarakteristik. Gennemsnitsværdier.

	Ekspres- busser	Regio- nalbusser	Lokal- ruter	By- busser	I alt
Rute-længde (km)	92,8	32,9	24,4	13,4	22,4
Rejselængde (km)	38,5	11,9	9,4	3,8	6,5
Hastighed (km/t)	51,5	38,4	36,8	21,1	30,9
Belægning (p.km/buskm)	10,3	9,4	6,1	12,6	9,9
Siddepladser	50	46,3	41,5	37,6	43,2

4.7.3 Eksempler på energiforbrug og emissioner

I skemaet herunder vises eksempler på emissionsfaktorer ved tre forskellige rejsehastigheder, for to forskellige Volvo-busser, en gammel model fra 1980, og en ny 1994-model med katalysator.

Tabel 4.3 Emissionsfaktorer for busser ved alternative hastigheder.

BUS- emissioner		Volvo 1980			Volvo 1994 / KAT		
	km/t	20	40	60	20	40	60
CO	g/km	3,5	2,1	1,6	0,051	0,031	0,023
HC	g/km	0,89	0,51	0,39	0,094	0,054	0,041
NOx	g/km	27,5	20,1	17,0	10,8	7,9	6,7
Partikler	g/km	0,38	0,28	0,21	0,122	0,089	0,068
Energi	MJ/km	14,7	11,1	9,9	12,8	9,7	8,6

HT oplyser gennemsnitlige brændstofforbrug ved bykørsel (nær 20 km/t) på 1,75-2,25 km/l, og for busser i landdistrikter (nær 40 km/t) på 2,5-3 km/l.³ 2 km/l svarer til 15 MJ/km, og 2,75 km/l til 11 MJ/km. Der er altså god overensstemmelse mellem HT's erfarede forbrug og de her beregnede tal, jf. skemaet ovenfor.

Bybusser, omegnbusser og provinsbusser har naturligvis forskellige køremønstre. Dette er dog indbygget i rejsehastighederne, sådan at tallene for en hastighed på omkring 20 km/t gælder en typisk bybus, mens tallene for 40 km/t er mere repræsentative for en typisk provins- eller regionalbus, og langtursbusser kan komme op på 60 km/t eller mere som rejsehastighed.

4.8 Brugerspecificerede parametre

På baggrund af det foregående afsnit kan der foretages en sammenfatning af hvilke brugerparametre, der indgår i modellen. Én brugerparameter skal specificeres af brugeren:

- Strækning: Total antal kørte kilometer

Hvis strækningen ikke specificeres på bykørsel, landevejskørsel og motorvejskørsel, vil programmet fordele den samlede strækning efter følgende nøgle: 35% by, 50% landevej og 15% motorvej.

De tre øvrige parametre *kan* angives af brugeren. I modsat fald indsætter beregningsprogrammet default-værdier i overensstemmelse med de valg, der er foretaget af brugeren:

- Bus-model (default: Volvo 1992-model)
- Rejsehastigheder: 10-80 km/t (default: bykørsel 15 km/t)

³ Oplyst telefonisk af Kristian Strand, HT, februar 1995.

- landevejskørsel: 50 km/t
- motorvejskørsel: 80 km/t
- Belægning (antal passagerer) (default: 9,9 pass./bus)

4.9 Beregningsgangen for energiforbrug og emissioner

De samlede emissions- og energiberegninger for en busrejse udføres på følgende måde:

$$E_{tot,i} = \sum_j (S_j \cdot e_{i,j}(v))$$

hvor

$E_{tot,i}$ indikerer totale emissioner/energiforbrug (gram eller MJ) af typen i ,

S_j er længden af tursegment j (km),

$e_{i,j}$ er emissions-/energifaktorer (gram/km el. MJ/km) af typen i for tursegment j , som funktion af

v = rejsehastigheden.

I det følgende bruges indeks med følgende betydning:

r referencekøretøjet (10-ton-lastbil)

b en bus. Følgende indices bruges om konkrete busmodeller:
8,2,4,k = 1980, 1992, 1994 og 1994/KAT - modeller.

A betegner motorens mekaniske arbejde (kWh/km), E brændstofforbruget (g/km) og sfc er motorens specifikke brændstofforbrug (*specific fuel consumption*), her i gram/kWh.

Der gælder følgende generelle sammenhæng:

$$E = A \cdot sfc$$

Tabel 4.4 Sammenligning af brændstofforbrug for busser og lastbiler.

	Specifikt brændstofforbrug (sfc)	Brændstofforbrug ved anførte rejsehastighed	
		10 km/t	20 km/t
Bus (Volvo-1980)	238 g/kWh	18 MJ/km	15 MJ/km
Lastbil (Volvo F616)	236 g/kWh	13 MJ/km	10,8 MJ/km
Bus/lastbilforhold		1,385	1,389

Anmrkn.: Bus/lastbilforholdet regnes ud fra ovenstående til 1,387, uafhængigt af hastigheden v. Til brug for beregningerne antages dette forhold også at gælde ved højere hastigheder.

Noget af forskellen mellem to køretøjers observerede brændstofforbrug skyldes motorens forskellige specifikke forbrug. Volvo-1980-modellens brændstofforbrug (E_8) er vist ovenfor at være 1,387 gange referencekøretøjets. Korrigeres der for forskelle i specifikt forbrug, fås at busmotorarbejdet A_8 for en Volvo-1980 (i kWh/km) er

$$A_8 = E_8 / E_r \cdot sfc_r / sfc_8 \cdot A_r$$

$$= 1,387 \cdot 236 \text{ g/kWh} / 238 \text{ g/kWh} \cdot A_r = 1,375 \cdot A_r$$

altså knapt 1,4 gange større end lastbilmotorens. Dette gælder alle bustyper, da motorens mekaniske arbejde ved et bestemt kørselsmønster kun regnes at afhænge af transmissionstab, bussens vægt og luftmodstand, og disse størrelser forudsættes at være ens for alle de udvalgte busmodeller.

Brændstofforbruget for en 1994-bus med motor med specifikt brændstofforbrug sfc_4 :

$$E_4(v) = A_4(v) \cdot sfc_4 = A_b(v) \cdot sfc_4 = 1,399 \cdot A_r(v) \cdot sfc_4$$

idet A_b er det samme for alle busser, ved samme rejsehastighed. Da $A_r(v) = E_r(v) / sfc_r$, fås

$$E_4(v) = 1,399 \cdot E_r(v) / sfc_r \cdot sfc_4$$

For eksempel er brændstofforbruget fra denne Volvo-bus fra 1994 med en rejsehastighed på 60 km/t:

$$E_4(60) = 1,375 \cdot E_r(60) / sfc_r \cdot sfc_4$$

$$= 1,375 \cdot 7,29 / 236 \cdot 207 = 8,79 \text{ MJ/km}$$

eller 4,1 km/l, idet 1 l diesel indeholder 36 MJ⁴. Konstanten 1,375 gælder busser af den pågældende type. For en ledbus eller en anden tungere bus vil konstanten være større, mens den for en letvægtsbus vil være mindre.

Til beregning af bussens emissioner ($e_{i,b}$ i g/km) tages der udgangspunkt i referencekøretøjets (lastbilens) beregnede emissioner, og korrigerer dette for forholdet mellem bussens og referencekøretøjets emissionsfaktorer ($n13_i$ i g/kWh) samt for forholdet mellem bussens og referencekøretøjets motorarbejde.

$$\begin{aligned} e_{i,b}(v) &= e_{i,r}(v) \cdot n13_{i,b}/n13_{i,r} \cdot A_b/A_r \\ &= e_{i,r}(v) \cdot n13_{i,b}/n13_{i,r} \cdot 1,375 \end{aligned}$$

Betragtes for eksempel NO_x, hvor $n13_{i,b} = n13_{NO_x,b} = 6,14\text{g/kWh}$ (for en Volvo-1994-bus), og $n13_{NO_x,r} = 12,7\text{g/kWh}$ (se afsnittet om lastbiler), fås

$$e_{NO_x,b}(60\text{km/t}) = 8,55\text{g/km} \cdot 6,14\text{g/kWh} / 12,7\text{g/kWh} \cdot 1,375 = 5,68\text{g/km}.$$

⁴Energistyrelsen

5 Fly

I modsætning til andre transportformer kompliceres beregningen af energiforbrug og emissioner fra fly af, at flyvningerne rumligt jo foregår i tre dimensioner. Hastigheden ved en given trykkraft fra motoren afhænger af stigningsrate og højde. Motorens trykkraft afhænger af både lufttryk og temperatur af den omgivende luft og dermed af den aktuelle højde. Af ovennævnte grunde er der derfor ikke nogen entydig sammenhæng mellem motorbelastning og hastigheden i forhold til jorden. Endvidere afhænger emissionerne af motorbelastningen, som varierer over de forskellige faser af flyvningen.

5.1 Metode og determinerende faktorer

For flyenes emissioner er TEMA's output baseret på kalkulationer med et computersimulationsprogram, ATEMIS, der kan beregne brændstofforbrug samt emissioner af HC, CO og NO_x på basis af brugerspecificerede oplysninger om: flyveprofil samt oplysninger om flytype, hastighed og stigningsrate. SO₂ samt CO₂ er beregnet ud fra energiforbruget samt oplysninger om svovlindholdet og den ækvivalente CO₂-mængde i jetfuel. Partikelemissionerne beregnes ikke af programmet. Programmet er udviklet som et eksamensprojekt af en østrigsk ingeniør, Richard Feller, der i dag er ansat ved Wien's lufthavn. Det er bygget op omkring de komplicerede sammenhænge, der er skitseret ovenfor, og brugen af det kræver derfor en del detailviden omkring flyvning⁵. Selve beregningsproceduren er derfor udført af Richard Feller på baggrund af input om flytyper, flyveprofiler, m.v. indsamlet af COWI.

Da der kun er ca. ti indenrigsruter i Danmark, er det valgt at basere emissionerne i TEMA modellen direkte på beregninger vha. ATEMIS programmet frem for selv at opstille mere simple, approximative relationer.

De væsentlige indenrigsruter i Danmark er de ti nedenstående, der alle har udgangspunkt eller destination i København:

Tabel 5.1 Ruteoversigt for fly.

Rute	Alm. Flytype	Turlængde	Mio. pers.km ¹⁾
------	--------------	-----------	----------------------------

⁵ I Sverige har Roger Andersson lavet et eksamensprojekt, der i nogen udstrækning er parallelt til ATEMIS. Dette arbejde anvendes til kvalitetscheck af ATEMIS-resultaterne.

		(NM)	
Aalborg	MD82	129	(112)
Aarhus (Tirstrup)	MD82	84	(81)
Karup	MD82	126	(77)
Rønne	F50	85	(22)
Billund	B737	128	(55)
Esbjerg	F50	153	(37)
Odense	F50	87	(26)
Vojens(Skrydstrup)	F50	141	(11)
Sønderborg	ATR42	120	(16)
Thisted	BA31	175	(5)

1) 1991-tal, jvf. Personstatistik 19980-1991, Trafikministeriet.

I tabellen er endvidere angivet turlængden mio. personkm (som et mål for den samlede aktivitet på ruten) samt den almindeligste flytype på ruten. I programmet anvendes sidstnævnte anvendes som 'default'flytype for den pågældende rute. Herudover findes få mindre ruter, så som Esbjerg-Billund, Kbh.-Anholt/-Læsø, Kbh.-Tåsinge og Kbh.-Ærø, hvor der typisk anvendes helt andre, meget mindre flytyper. Disse ruter udgør en ubetydelig del af det samlede transportarbejde med fly.

Som input til ATEMIS simulationsmodellen kræves en flyveprofil for hver flyvning. Der er derfor via Statens Luftfartsvæsen rettet forespørgsel de fire luftfartsselskaber med indenrigsruter i Danmark (dvs. SAS, Maersk, Cimber og Sun-Air), hvor de er bedt om at oplyse typiske flyveprofiler for hver af deres ruter med de flytyper, som de hovedsagligt benytter.

Et eksempel på flyveprofil er illustreret nedenfor:

Tabel 5.2 Eksempel på datablad for flyveprofil.

Airport from:	Copenhagen	Aircraft:	MD-82			
Airport to:	Aalborg	Engines:	two JT8D-219			
		Takeoff weight:	62 tonnes			
		Seats: 156		Occ.rate: 65.8%		
Flight phase	Power setting	Time (min.)	Fuel flow ¹⁾ (kg/sec)	Altit.(1) (ft)	Altit.(2) (ft)	Distance NM
Take-Off	100%	1.00	1.292	0	1,500	2
Climb 1	100%	0.35	1.286	1,500	3,000	1
Climb 2	72%	6.00	0.926	3,000	20,000	32
Cruise	27%	10.00	0.348	20,000	20,000	30
Descent	6%	7.50	0.083	20,000	3,000	43
Approach	33%	4.00	0.425	3,000	0	17
Taxiing	14%	10.00	0.179	0	0	4
Total flight		37.35				129

1) pr. motor

Endvidere benytter ATEMIS de geografiske koordinater (længde og bredde) samt elevation (meter over havet) for de pågældende lufthavne. Disse data er indsamlet fra Statens Lufthavnsvesen.

De medtagne ruter betjenes næsten udelukkende med én af seks flytyper⁶:

- McDonnald-Douglas MD80, DC9: Aalborg, Tirstrup, Karup,
- Boing B737, Fokker F50: Billund, Esbjerg, Odense Skrydstrup, Rønne,
- Jetstream BA-31: Thisted,
- ATR42: Sønderborg.

For de to sidstnævnte flytyper har det vist sig vanskeligt at opnå de tilstrækkelige grunddata. Da disse kun flyver på to af de mindst benyttede ruter, er de ikke er medtaget i modellen, som derfor medtager fire flytyper:

- MD82
- B737-500
- Fokker 50
- DC9-41

⁶ Maersk benytter to versioner (300, 500) af B737 indenrigs i Danmark, men version 500 er valgt som den mest repræsentative B737.

MD 81/82/83/87 er klart dominerende på SAS-ruterne med ca. 90% af samtlige flyvninger, mens DC-9 samlet udgør under 1%. DC-9 vil dog alligevel blive inddraget, da man herved kan illustrere forskellene mellem gamle og nye flytyper og fordi SAS stadigvæk benytter DC-9 på andre ruter.

Da hver af de ovenstående flytyper kun benyttes på nogle af de ti ruter, er der med udgangspunkt i de modtagne flyveprofiler konstrueret profiler for de kombinationer af rute og flytype, som ikke i praksis benyttes i dag.

Samlet er der således i TEMA-programmet medtaget emissionsberegninger for ialt $4 \times 10 = 40$ flyveprofiler.

Der er endvidere foretaget beregninger for default flytyperne for hver rute med realistiske ændringer i flyveprofilerne med hensyn til cruisehøjde og -hastighed. Formålet hermed har været at vurdere, i hvilket omfang emissionerne afhænger af flyvehastighed og -højde, der eksempelvis kan forekomme ved forsinkelser eller hvis den typiske flyvehøjde er optaget. Konklusionen af disse beregninger har været, at det kun har beskedent indflydelse på beregningsresultaterne, så længe der er tale om ændringer af størrelsesordenen ± 3.000 fod.

Endelig er der foretaget analyser af, i hvilket omfang temperaturændringer påvirker emissionerne⁷. Der er således foretaget fire supplerende beregninger med B737: ISA+10°C og ISA-10°C for hhv. den længste og den korteste flyvning. For lavere temperaturer er der et helt ubetydeligt fald i emissioner ($< 1/2\%$) og energiforbrug ($< 1 1/2\%$), mens der for højere temperaturer er tale om en mindre stigning på ca. 5% for energiforbrug og under 3% for emissionerne. Afvigelse må derfor betragtes som klart mindre end den generelle usikkerhed, der er forbundet med beregningerne.

Hverken flyvehastighed, -højde eller temperaturen vil derfor blive inddraget som brugerparametre i første version af modellen. Resultaterne er derfor beregnet med en ISA-standardatmosfære som forudsætning. Det indebærer tillige, at der ikke tages højde for vindforhold, lufttryksforskelle m.v., der som bekendt varierer betydeligt mellem de konkrete flyvninger og har stor betydning for emissionerne for den enkelte flyvning. Endelig vil de faktiske flyvninger afvige mere eller mindre fra de typiske flyveprofiler, der er forudsat i beregningerne. Eksempelvis 'holding' (dvs. afventning af landingstilladelser i luften), take-off vægten og vindretning, der er bestemmende for landingsretningen.

Afslutningsvist bør det nævnes, at på de relativt korte afstande, som der er tale om på danske ruter, vil energiforbruget være en del højere for jetfly end for propel maskiner. Det skyldes, at kun en lille andel af turen foregår som cruise i stor højde på korte afstande, hvor jetfly er mindre energiforbrugende. På længere distancer vil energieffektiviteten for jetfly være relativt bedre.

5.2 Brugerspecificerede parametre

Den eneste parameter, der nødvendigvis skal specificeres af brugeren af TEMA-modellen er:

- afgangslufthavn *eller* ankomstlufthavn (blandt de 10 ovenstående)

⁷ ATEMIS-programmet anvender som udgangspunkt ISA-standardatmosfære som forudsætning, hvilket svarer til 15 grader Celsius ved havoverfladen, jævnt aftagende til $\div 56^\circ\text{C}$ i 11 km højde.

Der flyves altid til eller fra Kastrup i København.

Nedenstående parametre skal ikke nødvendigvis specificeres af brugeren, idet defaultværdier kan benyttes, når først ruten er defineret:

- Flytype: MD80, DC9, B737, F50
- Belægning: mellem 0% og 100%

Som defaultværdier benyttes luftfartselskabernes oplysninger om de hyppigst benyttede flytyper for hver af ruterne med de tilhørende gennemsnitlige belægningsgrader.

5.3 Beregningsgangen for energiforbrug og emissioner

Brændstofforbrug samt emissioner er således beregnet uden for TEMA af ATEMIS simulationsprogrammet for de kombinationsmuligheder, som brugeren har mulighed for at specificere. Programteknisk skal TEMA derfor blot anvende defaultværdier for de variable, som brugeren ikke har specificeret, og derefter finde den rigtige linie i en liste på ca. 75 records indeholdende de relevante totalemissioner og brændstofforbrug for flyvningen. Efterfølgende beregnes emissioner pr. transportmiddelkilometer og personkilometer på linie med fremgangsmåden for de øvrige transportmidler.

Afslutningsvist gives en kort beskrivelse af beregningsproceduren i ATEMIS-programmet. En mere uddybende dokumentation findes i et baggrundsnotat⁸.

Fremgangsmåden i ATEMIS er baseret på at beregne det øjeblikkelige værdier for brændstofforbrug og emissioner pr. sekund på ethvert tidspunkt under hele flyveturen, hvorefter de samlede værdier beregnes ved integration (addition) over tiden. Emissionerne af HC, CO og NO_x beregnes via brændstofforbruget ud fra emissionsfaktorer, der er opgjort som gram HC, CO eller NO_x pr. kilogram jetfuel.

Flyenes partikelemissioner beregnes ikke, da der ikke foretages standardiserede målinger af motorernes partikeludslip. I TEMA-modellens resultatark for flyene vil det således fremstå, som at der ikke er partikelemissioner fra fly, hvilket naturligvis ikke er korrekt, imidlertid har partikeludslippet fra flytrafikken relativt lille betydning.

Emissionsfaktorerne (g/kg jetfuel) såvel som brændstofforbruget (kg jetfuel pr. sekund) afhænger af motorbelastningen. For de enkelte flytyper er der foretaget målinger af emissionsfaktorer og brændstofforbrug ved fire forskellige motorbelastninger under standardiserede betingelser. Disse målinger er tilgængelige i ICAO's Engine Exhaust Emission Databank. Nedenfor er illustreret værdierne for MD82 med JT8D-219 motorer (pr. motor):

⁸ Richard Feller: 'ATEMIS Air Traffic Emission Simulation - carried out on behalf of COWIconsult Consulting Engineers and Planners', 1995.

Tabel 5.3 Eksempel på emissionsdata fra ICAO's EEE database.

PS [%]	Fuelflow [kg/s]	HC [g/kg]	CO [g/kg]	NO _x [g/kg]
100%	1,354	0,27	0,73	27,0
85%	1,085	0,42	1,2	20,8
30%	0,3817	1,59	4,07	9,13
7%	0,1344	3,48	12,63	3,6

Det ses, at emissionerne pr. kg forbrugt jetfuel aftager med motorbelastningen for HC og CO, mens den er stigende for NO_x. For NO_x afhænger emissionsfaktoren endvidere af lufttemperaturen og dermed af højden, hvilket der er korrigeret for i ATEMIS-programmet.

Emissionerne af SO₂ beregnes direkte ud fra brændstofforbruget under forudsætning af et svovlindhold på 0,01% (vægt), hvilket medfører emissioner på 0,02 g SO₂ pr. kg jetfuel. For CO₂-emissionerne er der forudsat en emissionsfaktor på 3,132 kg pr. kg brændstof.

De fire motorbelastninger er det typiske under forskellige flyvefaser:

100% ≈ take-off, 70% ≈ stigning, 30% ≈ cruise, 7% ≈ nedstigning.

Den nøjagtige motorbelastning på et givet tidspunkt afhænger imidlertid på kompliceret vis af flyveprofilen, take-off vægten samt motortekniske faktorer. I ATEMIS-programmet udtrykkes brændstofforbruget som en funktion af den øjeblikkelige hastighed i f.t. lyden, dvs. Mach-tallet (M), flyvehøjde (h) og motorbelastning (ps).

Sammenhængen fra M , h og ps til brændstofforbruget pr. sekund (bf) er i ATEMIS-programmet approximeret ved et Taylor-polynomium, hvor parametrene er kalibreret separat for hver flytype i overensstemmelse med oplysningerne flyveprofilerne for de enkelte ruter.

De samlede emissioner af hver forureningskomponent kan derefter beregnes ved at summere over tiden, t , fra flyvningens start til slut. Formelt kan de samlede emissioner for flyvningen beregnes som:

$$E_i = N \times \int bf(M_t, h_t, ps_t) \times e_i(ps_t) dt$$

hvor

N = antal motorer

bf = det aktuelle brændstofforbrug pr. sekund

e_i = emissionsfaktoren for hhv. HC, CO, NO_x

M = den aktuelle hastighed, målt som Mach-tallet

h = den aktuelle flyvehøjde

ps = motorbelastningen i % i f.t. fuld belastning

Indekset i er hhv. HC, CO, NO_x, mens t er tiden, der løber fra start til slut af flyveturen, incl. taxitid i afgang- og ankomstlufthavn. Partikelemissionerne beregnes ikke af programmet.

6 Persontog

6.1 Metode og determinerende faktorer

Energiforbrug og emissioner fra en togrejse afhænger af flere forhold så som strækningen der tilbagelægges, hvilken type tog der benyttes, hastigheden, hvor ofte der stoppes samt af togets belægningsgrad. Banelegemets beskaffenhed, dvs. hvor meget det krummer eller hvor bakket terrænet er, har dog også afgørende betydning, da dette påvirker hastighed og motorbelastning over en given afstand. Grundlæggende påvirkes energiforbrug og emissioner af de ovennævnte forhold alene via motorbelastningen.

En TEMA-bruger vil oftest ikke være i besiddelse af den nødvendige information til at kunne vurdere eksempelvis banelegemets karakter for en given rute, hvorfor der er valgt at basere modellen på udefra beregnede energiforbrug og emissioner for et stort set landsdækkende antal **segmenter** (se Tabel 6.1 samt Figur 6.1).

Hvis brugeren f.eks. ønsker resultater for **ruten** "København H - Århus", fås dette ved enten at vælge Segmenterne 6, 8 og 11 (+ færgeruten "Korsør - Nyborg") eller alternativt Segment 7 (+ færgeruten "Kalundborg-Århus").

Er brugeren derimod interesseret i turen "Roskilde - Horsens", vil denne ikke umiddelbart fremkomme som summen af et antal segmenter. Resultater for denne rute vil imidlertid kunne beregnes på baggrund af den første af de ovenstående "København H - Århus" ruter, hvor Segment 6 (København H - Korsør) er reduceret til den andel, der estimeres at udgøre "Roskilde - Korsør". På tilsvarende vis reduceres Segment 11 (Fredericia - Århus).

En tredje mulighed er, at der ønskes resultater for en af de få strækninger der ikke er omfattet af et af segmenterne i Tabel 6.1, f.eks. "Ribe - Tønder". I dette tilfælde vælges et segment der antages at "ligne" dette, f.eks. "Struer - Thisted (med regionaltog)", hvorefter strækningen tilpasses. Her vil de beregnede resultater dog være forbundet med noget større usikkerhed.

Tabel 6.1 Togrutesegmenter i TEMA

Segmenter	Strækning i km
1. København H - Holte	19
2. København H - Østerport	3
3. Østerport - Helsingør	44
4. København H - Valby	4
5. Valby - Rødby F	179
6. København H - Korsør	110
7. København H - Kalundborg	110
8. Nyborg - Fredericia	89
9. Fredericia - Sønderborg	136
10. Fredericia - Esbjerg	88
11. Fredericia - Struer	155
12. Fredericia - Århus	109
13. Esbjerg - Struer	146
14. Århus - Langå	86
15. Langå - Struer	102
16. Langå - Ålborg	94
17. Ålborg - Frederikshavn	84
18. Struer - Thisted	73
19. Korsør - Nyborg	15

Bemærk at Segment 19. *Korsør - Nyborg*, der repræsenterer den faste forbindelse over Storebælt, er inkluderet. Brugen af dette segment må dog ske med nogle meget kraftige forbehold:

- Køreplanen vil sandsynligvis ændres kraftigt når forbindelsen åbnes, dvs. de nuværende segmenter vil have nye Litra og Produkter, fx. vil de nye IR4 (e)tog køre regionalkørsel mellem Sjælland og Fyn, mens de eneste dieseltog, der vil krydse bæltet, er IC3, samt at det er sandsynligt, at EA lokomotiverne kun vil blive brugt til godstransport.
- Både IR4 og IC3 togene vil sikkert køre hurtigere (måske 180 km/t) dvs. vores måleresultater ikke vil gælde længere.

Energiforbrugs- og emissionsestimater fra et eksamensprojekt fra 1990 er anvendt for dette segment (Kilde: Jesper Arkil, DSB). Resultaterne pr person-km er noget større end for de andre segmenter. Dette skyldes dels, at der specielt i tunnelen køres nedad i tomgang og opad med fuld tryk, dels at der er stor luftmodstand i tunnelen.

På de fleste af de ovenstående rutesegmenter vil en togpassager have mere end en valgmulighed vedrørende **produkt** (se Tabel 6.3). Oftest er det indlysende, hvilket produkt der vælges. Hvis man skal fra København til Århus vil det ske med enten lyntog eller intercity på f.eks Segment 6 (København - Korsør) og

ikke med regionaltog. Hvis man i stedet skal fra København til Sorø, også på Segment 6, må dette ske med regionaltog, da de andre ikke standser i Sorø.

For de fleste produkter dækkes kørslen overvejende af én **litra**-type (se Tabel 6.3). Dog for produktet "Regionaltog øst for Storebælt" anses det for nødvendigt at medtage tre litra-typer.

Figur 6.1 Togrutesegmenter i TEMA.

(DK-kort indsættes i ramme)

Tabel 6.2 Produkter, Litra samt relevante Segmenter i TEMA

Produkt	Litra	Relevante Segmenter
Lyntog	IC3	6, 8, 10, 12, 14, 16 ¹⁾
Intercity	IC3	6 - 18, 19
Regionaltog		
vest for Storebælt	MR	8 - 18
øst for Storebælt	IC3, ME, EA	2 - 7 ²⁾
S-tog		
gennemgående	S-tog	1
hyppigt standsende	S-tog	1

- Note: 1. Lyntoget stopper ikke ved alle endepunkterne af segmenterne.
 2. Ikke alle tre Litra er relevante for Segmenterne.

IC3 Dieseldrevet togsæt af tre vogne med en passagerkapacitet på 140-152, designet til fjernrejser.

MR Dieseldrevet togsæt af to vogne, designet til regionaltogskørsel.

ME Dieseldrevet lokomotiv.

EA Eldrevent lokomotiv, der kører regionaltogskørsel: København H - Helsingør og København H - Korsør.

S-tog Eldrevent nuværende S-togsæt.

DSB har foretaget **emissions- og energiforbrugsmålinger** af **dieseltogene** med motorerne i otte forskellige belastningspositioner, hvor position 8 bruges, når toget er forsinket og skal starte så hurtigt som muligt. Normalt triller toget ud af stationen i position 3-4, og når toget nærmer sig en station, slås motorerne fra, dvs. i princippet position 0.

For de eldrevne tog beregnes emissionerne indirekte fra kraftværkernes emissioner under hensyntagen til transmissionstab.

Som nævnt ovenfor vil TEMA-brugeren ikke kende et togs køremønster og vil derfor ikke være i stand til at overføre motorbelastningsresultaterne til en givet strækning. DSB har leveret emissions- og energiforbrugsresultater for Segmenterne i Tabel 6.1 for de relevante Produkter og Litra. Skemaer med beregningsresultater findes i Bilag 3.

For ME og MR vil køremønstret (og dermed perioder med forskellig motorbelastning) blive givet ved togenes "black-box"-målinger (der ellers anvendes ved havariundersøgelser). For IC3-togsættene er køremønstret for de forskellige segmenter estimeret ved hjælp af en simulationsmodel, mens der for eltogene

bygges på tidligere resultater. For alle resultater antages kørslen at ske efter køreplanen (se nedenfor under brugerparametre).

6.2 Brugerspecificerede parametre

Inddelingen i segmenter samt, at der kun er målingsresultater for kørsel ved normal hastighed gør, at antallet af brugerparametre er begrænset. Disse vil i det følgende blive beskrevet. Der vil også blive diskuteret mulige men ikke-inkluderede parametre.

6.2.1 Inkluderede brugerparametre

Segmenter

Brugeren opbygger sin togrute ved brug af de i Tabel 6.1 givne segmenter. Ønskes kun en del af et segment, reduceres denne med en procentsats. Denne sats vil så blive tilregnet emissions- og energiforbrugsresultaterne forholdsmæssigt. Satsen vil kunne bestemmes ved hjælp af en køreplan, således at det derved antages, at emissionerne for et givet segment er proportionale med køretiden.

Produkt

I det omfang, det er muligt i.f.t. nuværende køreplan, vælges der mellem: lyn-tog, intercity og regionaltog. For et givet segment gives som default det mest sandsynlige. Segmentet "København - Holte" er leveret, hvorefter brugeren med procentsatsen kan skabe den ønskede strækning. For S-tog kan der vælges mellem et gennemkørende og et hyppigt-standsende.

Litra

Som det fremgår af Tabel 6.3 er egentlig litra-valg kun mulig for "Regionaltogskørsel øst for Storebælt", idet det ellers er bestemt af produktet. Som default værdi gives den mest almindelige.

Belægningsgrad

Kapaciteten og den gennemsnitlige belægningsgrad er givet for de relevante segment-produkt-litra-kombinationer. Det vil være muligt for brugeren at ændre belægningsgraden og således beregne f.eks. ændrede emissioner pr personkm. For de fleste togtyper er den ændrede vægt som følge af flere eller færre passagerer ubetydelig for energiforbruget. For de relativt lette IC3-togsæt kan det have en mindre betydning. Der er ved beregningerne her antaget en belægningsgrad på 50%.

El-emissionskoefficienter

I TEMA vil brugeren derfor have valgmuligheden som i Tabel 6.3 nedenfor. Der kan anlægges flere betragtningsmåder på, hvorvidt man skal benytte en gennemsnits- eller en marginalbetragtning. Ved en gennemsnitsbetragtning beregnes emissionskoefficienterne (for et givet år) ved at dividere de totale emissioner med det totale elforbrug på dansk grund. Der tages hensyn til importeret

el samt, at en del af emissionerne fra produktionen tillægges varmedelen fra den kombinerede kraftvarmeproduktion. Ved en marginalbetragtning ses der på de ekstra emissioner genereret ved det ekstra (marginale) elforbrug. TEMA-brugeren har valgmuligheden mellem de to betragtningmåder, da man ikke kan sige, at den ene betragtningstype er ubetinget mere rigtig end den anden.

I et historisk perspektiv viser gennemsnitsbetragtningen den *faktiske* emission fra elkraftværkerne, der kan tillægges eltogene ud fra det faktum, at man ikke kan se, hvilke kraftværker det brugte el kommer fra. Emissionskoefficienterne for gennemsnitsbetragtningen er leveret af DSB.

Med udgangspunkt i en marginalbetragtning vil en *ændring* i elefterspørgslen påvirke de marginale kraftværker, hvorfor det er disse emissioner, der bortfalder hhv. øges ved fald eller forøgelse af elforbruget. Tabellens emissionskoefficienter baseret på marginalbetragtningen stammer fra Energistyrelsen.

Som det fremgår af Tabel 6.3, er det ikke uvæsentligt, hvilken betragtningstype der vælges, idet CO₂-emissionskoefficienten ved marginalbetragtningen er cirka dobbelt den for gennemsnitsbetragtningen. For de andre emissionskoefficienter er forskellen endog endnu større.

Tabel 6.3 El-emissionskoefficienter

Emission	Gennemsnitbetragtning ¹	Marginalbetragtning ²
CO ₂	463 g/kWh	900 g/kWh
SO ₂	1,66 g/kWh	5 g/kWh
NO _x	1,44 g/kWh	5 g/kWh
CO	0,0668 g/kWh	0,16 g/kWh
HC	0,0198 g/kWh	0,05 g/kWh
Partikler	0,0446 g/kWh	0,11 g/kWh

Note (1) Kilde: DSB,(2) Koefficienterne stammer fra Referencemodellen, baseret på oplysninger fra Energistyrelsen (koefficienterne for CO og HC er beregnet ud fra forholdet mellem Partikelemissionskoefficienterne)

Sammenfattende er de mulige brugerparametre derfor:

- segmenter (se Tabel 6.1)
- andel af segment
- produkt (lyntog, intercity, regionaltog, S-tog)
- liter (IC3, MR, ME, EA, S-tog)
- belægningsgrad (0-100 %)
- el-emissionskoefficienter (gennemsnits- eller marginalbetragtning)

6.2.2 Ikke-inkluderede brugerparametre

Højere hastighed er ikke realistisk, da faktisk kørsel på en strækning (køreplanen) er tilrettelagt efter, hvad der er teknisk muligt (f.eks hvor meget banen krummer). En højere hastighed ville derfor skulle forbindes med banelegemeinvesteringer. Hvis toget er forsinket, vil motorbelastningen naturligvis være større end normalt i perioder (ved acceleration). Køremønstret her afhænger dog i høj grad af forsinkelsens karakter, således at en enkelt brugerparameter "forsinket tog" ikke synes fyldestgørende.

Toget kan naturligvis tænkes at kunne køre med **lavere hastighed** (og dermed reduceret energiforbrug og emissioner). Men da intet tog kører med lav hastighed som normalkørsel, er der ingen data for dette (ME og MR motorbelastninger er faktisk registrerede via en "black box"). Der er ingen planer om at gennemføre yderligere målinger, da dette er relativt kostbart.

Der er ved segmentresultaterne taget hensyn til **antal stop**. Dette er derfor kun implicit en brugerparameter gennem produktvalget.

Der er ved resultaterne for et givet segment indirekte taget hensyn til **togets vægt**, idet der anvendes faktiske motorbelastningsmålinger. For lokomotiverne vil det gælde, at jo flere vogne, der skal trækkes, jo større energiforbrug, mens dette ville repræsentere ikke-normal kørsel, altså ikke køreplankørsel som er grundlaget i den første TEMA-version.

Af omkostningshensyn har DSB indtil videre kun foretaget målinger ved en **lufttemperatur** mellem 10 og 20 grader, hvorfor denne ikke kan være en brugerparameter.

6.3 Beregningsgang for energiforbrug og emissioner

DSB leverer som beskrevet emissions- og energiforbrugsresultater for segmenterne i Tabel 6.1. Resultaterne vil fremkomme som følger:

$$E_{spli} = \sum_b e_{bli} \cdot tid_{bspl}$$

hvor:

- E : emissions-(energi)-mængde i kg (joule)
- e : emissions-(energi)-koefficient pr minut
- tid : periode (med konstant motorbelastning lig b)
- s : index for segment
- p : index for produkt
- l : index for liter
- i : index for emissions-(energi)-type
- b : index for motorbelastningsposition

For en rute der ikke er direkte fremkommet ved de givne segmenter vil resultaterne for første eller sidste segment blive beregnet som følger:

$$E_{spli} = E_{Spli} * \frac{sats}{100}$$

hvor *sats* er en procentdel af segmentet og *S* er det "fulde" segment, som *s* er en del af.

Resultater for en given rute er således summen af de enkelte segmenter (evt. delsegmenter):

$$E_{pli} = \sum_s E_{spli}$$

Resultaterne vil også blive præsenteret som f.eks. emissioner pr personkm:

$$E_{pkm_{pli}} = \frac{\sum_s E_{spli}}{\sum_s (kap_{spl} * blg_{spl} * strækning_s)}$$

hvor: *E_{pkm}* er emissions-(energi)-mængde pr person km
kap er kapacitet
blg er belægningsgrad
strækning er segmentlængde i km

6.4 Kilder

DSB S-togsdivisionen (1993), Luftemissioner ved Personbilkørsel contra S-togskørsel.

DSB (1994), Årsberetning 1993.

DSB, diverse fotokopier.

DSB, Eksamensprojekt for 1990.

Ingeniøren, diverse artikler.

Trafikministeriet (1993), Transportstatistik 1980-91.

7 Færger

7.1 Metode og determinerende faktorer

I første version af TEMA er udvalgt et antal **færgeruter** samt en repræsentativ færge for seks ruter (to for "Århus - Kalundborg"). Tabel 7.1 beskriver dækningsgraden af valget. Hovedruterne over Storebælt og Kattegat er medtaget, mens "Najaden" på ruten "Bøjden - Fynshav" repræsenterer en mindre færge og "Cat-Link" og "Kattegat" de moderne hurtigfærger.

Tabel 7.1 Dækningsgraden af de medtagne ruter (færger): andel af samlede personkm og antal passagerer i 1991

Færgerute	Færge ¹	Andel af pkm	Andel af passagerer
Korsør-Nyborg	Kronprins Frederik	21%	21%
Halskov-Knudshoved	Heimdal	16%	22%
Århus-Kalundborg	Ask Cat-Link	11%	3%
Ebeltoft-Sjællands Odde	Mette Mols	16%	10%
Grenå - Hundested	Kattegat	8%	3%
Bøjden-Fynshav	Najaden	1%	1%
Andre:			
København-Rønne		11%	2%
"resten"		16%	38%
I ALT		100%	100%

1) Der sejles også med andre færger på flere af ruterne. Data angiver ruten som helhed.

Kilde: Transportstatistik 1980-91 (tabel 5.6 & 5.7), Trafikministeriet

Figur 7.1 Færgerutesegmenter i TEMA.

(DK-kort indsættes i ramme)

Selvom kun 60% af passageroverførslen med færger er dækket, er 73% dækket, når der ses på person-km. Valget anses derfor for tilstrækkeligt dækkende.

Måleresultater for færgers **emissioner** er sparsomme, mens der generelt er rimeligt godt kendskab til **energiforbruget**.

Hovedkilden til emissionsberegningerne, der præsenteres her, er DSB (1993). Her opgøres måleresultater for færgen "Kronprins Frederik" både ved brug af fuelolie og dieselolie. Sidstnævnte er nu relevant for alle indenlandske færger, da der siden 1. januar 1995 ved lov skal sejles på færgemiljødiesel.

For HC-emissionerne, der ikke er omfattet af ovenstående, anvendes koefficienter fra Lloyd's (1993). Disse koefficienter vedrører emissioner fra dieselmotorer, der bruges til middel-hastighedssejllads. Herunder hører færger samt f.eks. coaster og fiskerbåde.

En nøjagtig beskrivelse af emissionerne fra de øvrige færger, der har vidt forskellige alder, størrelse og motorisering, fordrer at der gennemføres tilsvarende målinger på disse. I DSB (1993) er der foretaget estimater for nogle af de her medtagne færger, mens for de resterende er resultaterne baseret på emissionerne pr MJ fra "Kronprins Frederik", jvf. Tabel 7.2. I tabellen vises desuden emissionskoefficienter, hvor hovedmotorerne anvender fuelolie. Koefficienterne svarer til Lloyd's, hvor der her gives data pr kWh motoreffekt dvs. efter transmissionstab. Det ses, at det især er for SO₂ og partikler, at der opnås en forbedring ved overgang til møljdiesel, mens NO_x-emissionerne bliver forøget en smule.

Tabel 7.2 Emissionskoefficienter ved færgemiljødiesel "Kronprins Frederik"

Emission	Færgemiljødiesel g/MJ	Fuelolie ¹ g/MJ
CO ₂	75	75
CO	0,15	0,23
NO _x	1,38	1,20
HC	0,07	n.a.
SO ₂	0,05	0,72
Partikler	0,02	0,05

1) Inkluderer brugen af marinediesel i hjælpemotorerne.

Kilder: DSB (1993), Lloyd's (1993).

Måleusikkerheder

Emissionsresultaterne, der er gengivet i Tabel 7.5 i det følgende, er således beregnet **på baggrund af målingerne fra "Kronprins Frederik"**. For de store færger, "Heimdal", "Ask" og "Mette Mols" er resultaterne fra "Kronprins Fre-

derik" formodentligt rimeligt tilfredsstillende, mens det især for "Cat-Link" og "Kattegat" må formodes at være meget grove estimater.

Ved anvendelsen af de ovennævnte emissionskoefficienter er der ikke taget hensyn til, at der ved et givent energiforbrug kan være forskel på emissionerne ved **manøvrering og ved cruising**. Da forholdet mellem disse kan variere, giver det anledning til yderligere usikkerhed. DSB (1993) antyder, at NO_x-emissionerne i høj grad er bestemt af, i hvilket omfang en færge manøvrerer under en overfart. For en lang overfartstid, f.eks. "Århus - Kalundborg" burde NO_x-emissionerne (pr km) derfor være relativt lavere end for en kortere tur, f.eks. "Korsør - Nyborg". Trozzi (1994) gør ligeledes opmærksom på, at der er et betydeligt større energiforbrug (her pr time) ved manøvrering end ved cruising. Derimod konkluderer Lloyd's (1993), at det ikke har været muligt at finde signifikante forskelle mellem emissionsfaktorer for manøvrering og cruising. I den første version af TEMA er opdelingen udeladt, men parameteren kan inkluderes, hvis rimelige estimater tilvejebringes.

7.2 Brugerparametre

Antallet af brugerparametre er begrænset, da der er tale om konkrete færgeruter. Disse vil i det følgende blive beskrevet, mens der også vil blive diskuteret mulige men i første omfang udeladte parametre.

7.2.1 Inkluderede brugerparametre

Når en valgt rejse indebærer, at en del af turen vil foregå med **færge**, er der oftest kun få alternativer. F.eks. vil en tog- eller bilrejse mellem Jylland og Sjælland i dag indebære, at enten Storebælt eller Kattegat må krydses med færge. De inkluderede **færgeruter** er derfor de mest relevante for kombinerede ture, hvor flere transportmidler indgår.

Kapaciteten og den gennemsnitlige **belægningsgrad** gives i Tabel 7.5. Det vil være muligt for brugeren at ændre belægningsgraden og således få f.eks. ændrede emissioner pr personkm.

Med henblik på tillige at kunne beregne mere skønsmæssige resultater for andre ruter end de medtagne vil det endvidere være muligt at ændre **sejlstrækningen**. Energiforbrug og emissioner beregnes som proportional med strækningen med udgangspunkt i energiforbrug og emissioner pr. km for den faktiske strækning på den valgte rute. Herved fortages formentlig en overvurdering for længere og en undervurdering for kortere strækninger, idet energiforbrug i havn og i forbindelse med manøvrering givetvis har relativt større betydning for kortere sejlture. Resultaterne må derfor betragtes, som et skøn for en tænkt situation, hvor den pågældende færge blev overflyttet til den rute, man er interesseret i. Er der stor forskel i færgestørrelse og/eller belægning i forhold til den faktiske situation, bliver det naturligvis meget vanskeligt at vurdere resultaternes repræsentativitet. For de mindre ruter, som udgør hovedparten af de resterende vil, "Najaden" være mest relevant at benytte som repræsentant for en mindre færge.

De mulige brugerparametre er derfor:

- færge(rute) (se Tabel 7.1)
- belægningsgrad (0-100 %)
- sejlstrækning (km, hvis ikke-default-rute)

7.2.2 Ikke-inkluderede brugerparametre

Færger er konstruerede til en given (maksimal) servicefart, hvorfor **højere hastighed** er ikke nogen realistisk mulighed. En færge kan naturligvis tænkes at sejle med **lavere hastighed** (og dermed reduceret energiforbrug og emissioner); men med den usikkerhed der er forbundet med estimaterne ved normal hastighed, udelades dette.

Vindretningen har betydning for brændstofforbruget (se DSB, 1993). Omfanget er dog vanskelig at opgøre, medmindre der foretages målinger ved faktisk sejlads under forskellige **vejrforhold**. Iøvrigt anses det ikke for at være væsentligt for brugeren at kunne ændre denne parameter.

7.3 Beskrivelse af beregningsgangen

For de givne færgeruter og færger er emissionsresultaterne i Tabel 7.5 direkte fra DSB (1993) eller beregnet som følger:

$$E_{fi} = e_i * energi_f$$

hvor: E er emissionsmængde i g
 e er emissionskoefficient i g/MJ
 $energi$ er energiforbrug i MJ
 f er index for færge
 i er index for emissionstype

Resultaterne kan præsenteres som **energiforbrug og emissioner pr. færgekilometer** (E_{km})

$$E_{km_{fi}} = \frac{E_{fi}}{strækning_f}$$

hvor: $strækning$ er i sejlkm

Resultaterne kan også opgøres **pr. personkm** (E_{pkm}). Problematikken er her, at passagererne kan komme ombord på forskellig vis f.eks. som gående eller i bil (se Tabel 7.3). Det bemærkes, at ombordstigning på "Kattegat" via bus er udeladt (og er derfor også udeladt i godstransportdelen af TEMA) til trods for, at denne mulighed rent teknisk er til stede. Dette skyldes dels, at andelen er lav omend stigende samt at de faktiske forhold på færgen gør, at en bus fx. optager pladsen at 8-9 biler, hvor personbilsækvivalenten på DSB færgerne er 4 (se Tabel 7.4).

Tabel 7.3 Ombordstigningsmuligheder.

	Gående	Personbil	Bus	Tog
Korsør-Nyborg (Kronprins Fred.)	X			X
Halskov-Knudshoved (Heimdal)	X	X	X	
Århus-Kalundborg (Ask)	X	X	X	
Århus-Kalundborg (Cat-Link)	X	X		
Ebeltoft-S. Odde (Mette Mols)	X	X	X	
Grenå-Hundested (Kattegat)	X	X		
Bøjden-Fynshav (Najaden)	X	X	X	

Fordelingen af emissionerne på forskellige trafikanter bør ske i forhold til færgerens kapacitetsbegrænsning. Den relevante kapacitetsbegrænsning for de seks sidstnævnte overgange er personbilkapaciteten, mens passagerbegrænsningen er relevant for førstnævnte (via togene). Tabel 7.4 viser de anvendte personbilsækvivalenter (ikke relevant for togfærgen Korsør-Nyborg):

Tabel 7.4 Personbilækvivalenter for færgernes kapacitet.

	Personbilækvivalenter
Personbil	1
Varebil	1,5
Bus	4
10 tons Lastbil	2
27 tons Lastbil	3
48 tons Lastbil	6
Gående	1/10

Kilde: Anders Sørensen, DSB Rederi, og COWI

Det antages således, at en gående pålægges samme vægt som en passager i en bus med 40 passagerer.

Beregninger af resultater for som **energiforbrug og emissioner pr. personkilometer** (E_{pkm}) bliver således:

$$E_{pkm_{fio}} = \frac{Ekm_{fi}}{kap_f * blg_f} * \frac{p\alpha_o}{antpas_o}$$

hvor: *E_{pk}* er emissions-(energi)-mængde pr person km
kap er personbilskapacitet
blg er belægningsgrad (regnet i personbiler) i %
pæ er personbilsækvivalten
antpas er antal passagerer i bil eller bus (=1 for gående)
o er index for ombordstigningsmetode

For en ikke-default rute beregnes resultaterne som på baggrund af en af de medtagede ruter anvendes *E_{pk}* direkte.

7.4 Kilder

DSB (1993), DSB - Miljøprojekt: Måling af luftforurening fra færger.

DSB (1994), Årsberetning 1993.

DSB - "Mens du sejler" 5.94.

Grenå - Hundested A/S (Morten Larsen)

Ingeniøren nr 38 - 23. september 1994.

Ingeniøren nr 39 - 30. september 1994.

Lloyd's (1993), Marine Exhaust Emissions Programme - Phase II Air Quality Impact Evaluation.

Trafikministeriet (1993), Transportstatistik 1980-91.

Trozzi et al (1994), Air pollutants emissions from maritime traffic in harbours: the Italian harbours of Venice and Piombino, 3rd International Symposium on Traffic and Air Pollution, Avignon 6-10 June.

Tabel 7.5 Emissions- og Energiforbrugsresultater for færger.

	Korsør-Nyborg Kron. Fred.	Halskov-Knuds. Heimdal	Århus-Kalund. Ask	Århus-Kalund. Cat-Link	Ebelt.-S.Odde Mette Mols	Grenå-Hund. Kattegat	Bøjden-Fynshav Najaden
Strækning km	26	19	89	89	54	78	14
Sejltid min	65	60	195	85	95	90	50
Antal passagerer: kapacitet belægningsgrad	2000 12%	500 42%	610 24%	700 51%	1376 ¹⁾ 20%	600 35%	372 ¹⁾ 15%
Antal biler: kapacitet belægningsgrad	NA NA	290 53%	300 38%	151 50%	390 45%	160 40%	55 30%
Lastbiler ja / nej	nej	ja	ja	nej	ja	(ja)	ja
Energi MJ pr overfart MJ pr km MJ pr min	66543 2559 1024	38000 2000 633	215360 2420 1104	175908 1976 2070	164652 3049 1733	230000 2949 2556	9707 693 194
CO ₂ kg pr overfart kg pr km kg pr min	4990 192 77	2850 150 48	16152 183 83	13193 148 155	12349 229 130	17250 221 192	728 52 15
CO kg pr overfart g pr km g pr min	10,1 388 155	7,4 389 123	32,7 367 168	26,7 300 314	25,0 463 263	34,5 442 383	2,0 143 40
NO _x kg pr overfart g pr km g pr min	91,9 3535 1414	47,5 2500 792	297,4 3342 1525	242,9 2729 2858	227,4 4211 2394	317,4 4069 3527	14,0 1000 280
HC kg pr overfart g pr km g pr min	4,5 173 69	2,6 137 43	14,5 163 74	11,9 134 140	11,1 206 117	16,1 206 179	0,7 50 14
SO ₂ kg pr overfart g pr km g pr min	3,3 127 51	1,9 100 32	10,7 120 55	8,7 98 102	8,2 152 86	11,5 147 128	0,5 36 10
Partikler kg pr overfart g pr km g pr min	1,2 46 18	1,0 53 17	4,0 45 20	3,3 37 39	3,0 56 32	4,6 59 51	0,2 14 4

1) Årsgennemsnit.

Kilder: DSB - Miljøprojekt. Måling af luftforurening fra færger, 1993.

DSB Årsberetning 1993, "Mens du sejler" 5.94.

Ingeniøren nr 38 - 23. september 1994, nr 39 - 30. september 1994.

Lloyd's Register (1993), "Marine Exhaust Emissions Programme -

Phase II Air Quality Impact Evaluation".

Grenå-Hundested A/S (Morten Larsen).

Del B. Godstransport

8 Lastbiler og varebiler

8.1 Lastbiler

8.1.1 Metode generelt

Emissioner og energiforbrug for en given tur beregnes med udgangspunkt i målinger foretaget på lastbilmotorer under forskellige belastninger, og korrigeret efter køretøjsdata og aktuelle køremønstermålinger foretaget for lastbiler. Herudfra dannes emissionsfaktorer, der tager hensyn til de typiske kørselsforhold i forbindelse med faktiske transportere. Emissionsfaktorerne kombineret med turens længde giver dermed det samlede energiforbrug og de samlede emissioner.

I modellen kan der vælges mellem tre lastbilstørrelser: ca. 10 ton (distributionsvogn), ca. 25 ton (sololastvogn) og ca. 48 ton (sættevogn eller vogntog). Endvidere kan der for den lille og den mellemstore lastbil vælges mellem ny og ældre motorteknologi. På samme måde som for personbilerne tages der endvidere hensyn til transportens køremønster via turens fordeling på by-, landevejs- og motorvejskørsel samt den gennemsnitlige rejsehastighed for hver af disse. Endvidere inddrages belægningsgraden, dvs. hvor meget læs der er på køretøjet.

Ud fra testmålinger og fra fysiske data om lastbilerne har Laboratoriet for Energiteknik udviklet en simulationsmodel, der på basis af input om køremønstre kan beregne energiforbrug og emissioner for konkrete ture. Modellen er kort beskrevet i (2), (4) og (8). Simuleringer er foretaget med fuldt læs, halvt læs samt for tomkørsel.

8.1.2 Lastbilmodellerne

Som nævnt i indledningen er der mulighed for at vælge én af 5 lastvognstyper:

- 10gl: 10 ton totalvægt, 2 aksler, 5½ l motor, ca. 1987
- 26gl: 26 ton totalvægt, 3 aksler, 9 l motor, ca. 1987
- 11ny: 11 ton totalvægt, 2 aksler, 6 l motor, EURO I
- 24ny: 24 ton totalvægt, 3 aksler, 9 l motor, EURO I
- 48ny: 48 ton totalvægt, 6 aksler, 12 l motor, EURO I

Den væsentlige forskel mellem gl- og ny-modellerne er motorteknologien.

De gamle lastbilmodeller (10gl og 26gl), som Laboratoriet for Energiteknik oprindeligt har taget udgangspunkt i (4), er fra ca. 1987, dvs. af ældre dato i forhold til nutidens typiske lastbil. Der er derfor supplerende hentet oplysninger om nyere lastbiler af samme type tillige med en stor lastbil (48ny), som står for hovedparten af alle internationale lastbiltransporter samt en stor del af de lange transportere inden for Danmark. I Danmark er den maksimalt tilladte totalvægt 48 ton, men internationalt (eksportvognmænd) køres der kun med 40 ton.

Lastvogne med totalvægt omkring 10 t udfører kun en mindre del af lastbilernes samlede transportarbejde. For sololastbiler med totalvægt fra 6 til 18 t er der tale om 33% af trafikarbejdet (vogn-kilometer) og 12% af transportarbejdet (ton-kilometer). En stor del af disse biler er dog større end 10 t totalvægt. De anvendes typisk til distributionskørsel, og en stor del emissionerne finder derfor sted i byerne.

Lastbilstørrelsen svarende til 24 t er repræsentativ for en stor del af sololastbilerne samt de mindre sættevogne. 33% af trafikarbejdet og 20% af transportarbejdet af de samlede tal udføres af lastbiler mellem 18 og 36 ton totalvægt.

De store lastbiler med 48 t totalvægt er det tungeste, der er tilladt i Danmark. De repræsenterer sættevogne og vogntog over 42 t totalvægt. Deres trafikarbejde er 34% af alle lastbilers, og ser man på det transportarbejde, de udfører (ton-kilometer), er deres andel hele 57%. På den baggrund er det klart, at det er vigtigt at kunne inddrage de store vogntog som godstransportmiddel i TEMA-modellen.

De valgte konkrete lastbiler er alle af et meget udbredte fabrikat i Danmark.

Skemaet herunder viser nogle nøgledata for de 5 valgte lastvognstyper.

Tabel 8.1 Tekniske specifikationer for lastbilerne.

Lastvogn	10gl	11ny	26gl	24ny	48ny
Beskrivelse	Bydistribution m. lukket kasse		Sololastbil med lukket kasse		Sættevogn
Totalvægt	9,5 ton	11,0 ton	26,5 ton	23,5 ton	48,0 ton
Tomvægt	3,4 ton	3,9 ton	8,4 ton	7,4 ton	14,0 ton
Nyttelast	6,1 ton	7,1 ton	18,1 ton	16,1 ton	34,0 ton
Lastrum mål	ca. 19 m ³		ca. 43 m ³		ca. 70 m ³
Kritisk last-massefylde ¹⁾	ca. 300 kg/m ³		ca. 415 kg/m ³		ca. 480 kg/m ³
Motortype	Diesel med turbolader		Diesel med turbolader og intercooler		
Godkendelse	pre-EURO	EURO I	pre-EURO	EURO I	EURO I
Årgang	ca. 1987	1995	ca. 1987	1995	1995
Slagvolumen	5½ l	6 l	12 l	9 l	12 l
Effekt	ca. 125 kW (170 HK)	ca. 140 kW (180 HK)	ca. 280 kW (380 HK)	ca. 225kW (300 HK)	ca. 290 kW (400 HK)

¹⁾ Kritisk last-massefylde: hvis lastrummet på en lastvogn fyldes helt op med varer med netop denne massefylde, bliver vognen læsset svarende til størst tilladt totalvægt.

Kilde: INUFA 1995 International Catalogue of Commercial Vehicles.

8.1.3 Grunddata for emissioner

Der foretages ikke emissionsmålinger for konkrete lastbiler, sådan som det er tilfældet for personbiler. Derimod har man data for lastbil*motorer*, der foreligger som standardiserede målinger, hvor emissioner og energiforbrug er registreret for 13 forskellige belastningssituationer i den såkaldte 13-mode-test, som er beskrevet i en ECE-norm (R49). Som nøgle-emissionstal for lastbilmotorerne benyttes en standard-vægtning af 13-punkts-målingerne. Denne vægtning bruges til at sammenligne motorer indbyrdes, og til at vurdere den enkelte motortype i forhold til gældende grænseværdier.

Før EURO-I-kravene trådte i kraft 1. oktober 1993, var der ikke bindende krav til lastbilers emissioner. Der var et ECE/EU-direktiv (nr. 88/77), som var gældende fra 1. oktober 1990, men kun med status af anbefaling. Det skønnes dog, at de lastbiler, der solgtes i Danmark på det tidspunkt, overholdt disse normer.

Tabel 8.2 Emissionsnormer for lastbiler

Norm-betegnelser	pre-EURO	EURO I	EURO II
EU-direktiv nr.	88/77	91/547	
dato for ikrafttrædelse	90.10.01	93.10.01	96.10.01
CO g/kWh	11,2	4,5	4,0
HC g/kWh	2,4	1,1	1,1
NOx g/kWh	14,4	8,0	7,0
partikler g/kWh	÷	0,36	0,15

Ovenstående emissionsnormer skal lastbilerne af en given model som gennemsnit overholde for at kunne blive typegodkendt. Ved kontrol af serier fra produktionslinjer anvendes lidt højere grænseværdier for at tage højde for den statistiske usikkerhed.

Det skal bemærkes, at de 13 *modes*, som motorerne er målt ved, alle er konstante belastningssituationer. Ved belastningsændringer - de såkaldte *transienter* - forøges både energiforbrug og emissioner, men der er ikke klarhed over omfanget af denne forøgelse. Af denne grund er det muligt, at de emissioner, der kan beregnes ud fra 13-modemålingerne er noget undervurderede, i hvert fald ved kørsel med hyppige belastningsændringer (bykørsel). I fremtiden vil motorernes egenskaber ved belastningsændringer formentlig komme til at indgå i godkendelsesbetingelserne.

Til brug for den simuleringsmodel, der er anvendt til beregning af hastighedsafhængigheden i Afsnit 8.1.4 er der indhentet detaljerede måleresultater for energiforbrug og emissioner samt tekniske specifikationer fra en stor europæisk lastbilproducent. På baggrund af statistik over den aktuelle fordeling på mærker salget af nye lastbiler og lastbilparken som helhed i Danmark.

Endelig skal opmærksomheden henledes på kvaliteten af den diesellojen. I dag kører lastbilerne i Danmark kun på let-diesel. Måleresultaterne for de gamle motorer, der er udført med normal diesel, er derfor korrigeret med de følgende faktorer:

Tabel 8.3 Reduktion af emissioner ved anvendelse af let-diesel i forhold til normal diesel

CO	15%
HC	0% ¹⁾
NOx	5%
partikler	20%

Anmrkn.: De anførte reduktioner er oplyst af Dansk Teknologisk Institut (Flemming Bak).

1) Målinger har vist små afvigelser, både reduktioner og mindre stigninger.

Energiforbruget regnes uafhængigt af dieseltypen.

De nye modeller udviser forbedringer på alle punkter i forhold til de gamle. Særligt hvad angår partikler er reduktionen markant. De nye motorer kommer tæt på at overholde de kommende EURO II grænseværdier.

8.1.4 Hastighedsafhængighed

For at kunne omsætte emissionsmålingerne (gram pr. kWh) til emissioner ved konkrete transportere må man kende køremønstret, karakteriseret ved hastigheder og accelerationer, og motorbelastningen under disse forhold. Den ovennævnte simuleringsmodel, udviklet på Laboratoriet for Energiteknik, foretager denne transformation for konkrete køremønstre.

I Køremønsterundersøgelsen er der også for lastbiler observeret en lang række køremønstre på forskellige vejtyper, som er benyttet som input i simuleringsmodellen. I forbindelse med køremønsterundersøgelsen blev benyttet data for de lastbiltyper, der her er kaldt 10gl og 26gl. Som led i nærværende projekt er tilsvarende emissionsberegninger foretaget for de samme køremønstre med de tre lastbiltyper, som her er kaldt 11ny, 24ny og 48ny. For de store lastbiler er anvendt samme køremønstre som for de mellemstore. De anvendte måledata for de nye lastbilmotorer er mere detaljerede end for de gamle. I forbindelse med beregningerne for de nye er der derfor benyttet i en revideret og forbedret version af modellen.

Analyser af de emissionsfaktorer, som simuleringsmodellen beregner på basis af disse køremønstre, viser, at der er en klar sammenhæng mellem hastighed og emissioner og energiforbrug pr. kilometer.

En særlig kommentar skal knyttes til køremønstrene for de store og mellemstore lastbiler ved meget lave hastigheder. Hovedparten af trafikarbejdet med disse lastbiltyper foregår uden for byerne, hvilket har været medvirkende årsag til, at der er få observationer med lave hastigheder. For gennemsnitlige rejsehastigheder under 50 km/t er der kun fem observationer, hvoraf kun én er under 20 km/t (18 km/t). Ydermere er køremønstret for denne usædvanligt jævnt, idet der stort mangler de hyppige stop og efterfølgende accelerationer (vejkryds), som er ty-

piske for køremønstrene ved lave hastigheder, der næsten udelukkende er bykørsel. Konsekvensen er, at energiforbrug og emissioner fra denne ene observation givetvis er en undervurdering af, hvad der typisk for kørsel ved meget lave hastigheder. For at få et mere repræsentativt billede er der foretaget en korrektion af de beregnede emissioner og energiforbrug til brug for de efterfølgende statistiske analyser, der beskrives i det følgende⁹.

Idet det antages, at de observerede køremønstre er repræsentative for kørsler ved varierende gennemsnitshastigheder, er der approksimeret en funktional sammenhæng mellem den gennemsnitlige emissionsfaktor pr. km og den typiske rejsehastighed. Approksimationen er foretaget ved OLS-estimation af et såkaldt Taylor-polynomium for hver kombination af emissionstype og lastbil.

En grafisk præsentation af resultaterne i form af de estimerede kurver er vist i Bilag 2. For alle sammenhænge ses det, at variationerne for en stor dels vedkommende kan forklares af den gennemsnitlige rejsehastighed.

En sammenligning af resultaterne bekræfter, at der er markant forskel på emissionerne mellem de nye og de gamle lastbiler.

For CO, der generelt ligger meget lavt for diesellastbiler, er der ikke nævneværdig forskel mellem de tre lastbilstørrelse, hvorimod sammenligning mellem nye og gamle klart viser at EURO-I har nedbragt CO-emissionerne. For HC og partikler ligger den store lastbil, som har den mest moderne motor, relativt lavt. For NO_x-emissionerne følger mønstret fra energiforbruget bort set fra, at de nye ligger klart lavere end de gamle lastbiler.

For energiforbruget er der kun en svag forbedring for de små lastbiler, mens forbedringen er væsentligt større for de mellemstore lastbiler, idet niveauet for den nye 24 ton lastbil ligger væsentligt under den gamle 26 ton lastbiler, som derimod er på niveau med den nye 48 ton lastbil. Dette tyder på, at energiforbruget for de gamle 26 ton lastbiler er overvurderet med den simple model og mere summariske data som blev anvendt ved simuleringen af denne.

8.1.5 Belæsning

Ovenstående analyser af sammenhængen mellem emissioner og rejsehastighed er foretaget for fuldt lastede køretøjer (totalvægt). For en given tur vil energiforbrug og emissioner imidlertid afhænge af den aktuelle vægt og dermed af belæsningsgraden. Dette gælder i princippet alle køretøjer, men for lastbiler får det særlig stor betydning, fordi der er betydelig forskel mellem tomvægt og totalvægt for disse køretøjer - ofte omkring en faktor 3, og forholdet er generelt større, jo større køretøj der er tale om.

⁹ Korrektionen er foretaget med udgangspunkt i de øvrige fire observationer under 50 km/t, der alle ligger omkring 40 km/t (gennemsnit 41,5 km/t). Disse er korrigeret ud fra det relative forhold $e_{\text{små}}(18\text{km/t}) / e_{\text{små}}(41,5\text{km/t})$, hvor $e_{\text{små}}$ er det approksimerede polynomium for den tilsvarende emissionsfaktor for de små lastbiler.

Den del af energiforbruget, der skyldes lastbilens luftmodstand, er ikke afhængig af vægten, men stiger kraftigt med stigende hastighed. Med hensyn til rullemodstand og især accelerationer har vægten derimod stor betydning for den nødvendige motorkraft og dermed også for energiforbrug og emissioner.

En hollandsk undersøgelse (litt. 17) viser, at for et bestemt lastvognstog stiger energiforbruget fra 35,3 l/100km til 39,7 l/100km - (11%), når køretøjsvægten øges fra 40 til 50 t, (dvs. 20%). Der blev målt over en strækning på 529 km, men desværre foreligger der intet om køremønster eller hastigheder under forøget.

En svensk artikel (litt. 15) med de samme mangler med hensyn til registrering af kørselsmønster, refererer en undersøgelse fra 1984, som angiver en forbrugsreduktion på 24% ved at nedsætte last-mængden fra 33 t til 20 t. Den samlede vægt af vogntoget angives ikke. Der refereres også en undersøgelse fra 1989, hvor emissionerne fra et 52 tons lastvognstog er anført ved to lastmængder:

Tabel 8.4 Sammenligning af emissioner ved fuld og delvis last fra svensk undersøgelse.

Vægt af last	MJ/km	NOx g/km	HC g/km	CO g/km
33 t	16,6	25,4	1,0	2,0
20 t	13,7	20,8	0,8	1,6
÷39%	÷17½%	÷18%	÷20%	÷20%

Det antages, at vogntoget med 33 t last har totalvægten 52 t. Vægtreduktionen med 20 t last er dermed 25%.

Analyser af de kørebøger, der føres for alle lastvogne med mere end 6 t totalvægt viser at lastbilernes gennemsnitlige belæsning er ca. 40%. En undersøgelse af såkaldte fragttaxier fra 1991 (litt. 16) peger på en gennemsnitlig belæsning på ca. 20%. Der er altså et potentiale for at reducere kørselsmængden og dermed miljøbelastningen uden nødvendigvis at reducere transportarbejdet. Men til en korrekt vurdering af en sådan strategi er det nødvendigt at kende sammenhængen mellem belæsning og emissioner, henholdsvis energiforbrug.

I Køremønsterundersøgelsen blev emissionerne fra lastbilerne kun beregnet under forudsætning af fuld last. Til nærværende formål er det også relevant at se på kørsler uden maksimal vægtbelastning. For det første forekommer der ofte kørsel med halvtomme biler. For det andet kan bilerne ikke lastes til fuld vægt, hvis der er tale om varer med lav vægtfylde eller meget emballage, og for det tredje kan der være tale om tomkørsel på tilbagevejen fra en leverance.

Til brug for nærværende projekt har SCS Engineering foretaget simuleringer beregninger med fuld, halvt læsset og tom lastbil for alle fem lastbiler i model-

len. Beregningerne er foretaget med udgangspunkt i lastbilernes køremønstre fra køremønsterundersøgelsen og er derfor nogenlunde sammenlignelige. I praksis vil køremønstret dog være påvirket af lastbilens belæsning p.gr.a. variationen i forholdet mellem samlet vægt og motorkraft. Motorbelastningen er justeret i overensstemmelse med den lavere trækraft, der er påkrævet med den mindre vægt.

På baggrund heraf er der i beregningsmetoden for emissionsfaktorerne e_b for lastbiler med en belæsningsgrad b mellem 0 og 1 baseret på lineær interpolation mellem de approximerede polynomier $e_{100\%}$ og $e_{0\%}$ for henholdsvis fuldt lastede og tomme lastbiler:

$$e^b(v) = b \times e^{100\%}(v) + (1-b) \times e^{0\%}(v)$$

hvor v er rejsehastigheden. De approximerede polynomier for hhv. 100% og 0% belæsning er angivet i Afsnit 8.3.

De simulerede emissioner for 50% belæsning er anvendt til kontrol af, at interpolationen er en rimelig approximation. Ud fra grafiske plot af energiforbrug (hhv. emissioner) for 50% og 0% belæsning relativt til fuldt læs er det vurderet, at emissionsfaktorerne for 50% belæsning med visse afvigelser ligger midt mellem 100% og 0%. Interpolationen anses derfor for at være en rimelig approksimation, når man tager den generelle usikkerhed på resultaterne i betragtning.

Dette gælder dog ikke for CO, HC og partikler for de små lastbiler. For disse emissionsfaktorer er der ikke nogen klar afhængighed af belæsningen¹⁰, og der er i stedet forudsat emissionsfaktorer svarende til simuleringerne med 100% belæsning uafhængigt af rejsehastigheden.

8.1.6 Strækningsslængde

Beregningsmæssigt kan den samlede godstransport ligesom for personbilerne opdeles i 3 strækningstyper. For hver strækningstype regnes emissioner og energiforbrug proportionale med længden i kilometer. De samlede udslip findes ved at gange emissionsfaktorerne (gram pr. km) med længden af de enkelte delstrækningerne, og addere. Strækningstyperne defineres ud fra deres gennemsnitshastigheder og svarer typisk til en opdeling i by-, landevejs- og motorvejskørsel, som beskrevet under personbiler.

8.1.7 Ikke andre korrektioner

Lastbilers emissioner og brændstofforbrug korrigeres ligesom andre dieselkøretøjer *ikke* for motorslid eller fordampningstab.

¹⁰ For nogle hastigheder er der snarere tale om en øgning af visse emissioner, når belæsningen reduceres. Årsagen er antageligt dårligere forbrænding, når motortemperaturen falder som følge af lavere ydelse.

Der korrigeres heller ikke for koldstart. Der er kun mangelfulde data om betydningen af koldstart, men da lastbiler gennemsnitligt kører relativt langt mellem hver koldstart, får koldstarttillægget en meget lille betydning.

8.2 Brugerspecificerede parametre

På baggrund af det foregående afsnit kan der foretages en sammenfatning af hvilke brugerparametre, der indgår i modellen. To brugerparametre *skal* specificeres af brugeren:

- **Strækning:** Total antal kørte kilometer
- **Køretøj:** 10 ton gl., 11 ton ny, 26 ton gl., 24 ton ny eller 48 ton ny

De øvrige to *kan* angives af brugeren. I modsat fald indsætter beregningsprogrammet default-værdier i overensstemmelse med de valg, der er foretaget af brugeren:

- **Rejsehastigheder** (default)
 - bykørsel (25 km/t)
 - landevejskørsel: (70 km/t)
 - motorvejskørsel: (80 km/t)
- **Belæsning** (last i ton) eller % (maks. last)

8.3 Beregningsgang for energiforbrug og emissioner

De samlede emissions- og energiberegning for en godstransport med en lastbil af type j udføres på følgende måde:

$$E_{ij}^{total} = \sum_r S_r \times [b \cdot e_{ij}^{100\%}(v_r) + (1-b) \cdot e_{ij}^{0\%}(v_r)]$$

hvor

E_{ij}^{total} er totale emissioner/energiforbrug (gram eller MJ) af typen i ,

S_r er længden af tursegment r (km),

$e_i^{0\%}(v)$ er emissions-/energifaktorer (gram/km el. MJ/km) af typen i for hhv. 0% og 100% belæsning som funktion af v = rejsehastigheden, jvf. nedenstående tabel,

b er belæsningsgraden (0 - 100%) relativt til fuld læs.

Tabel 8.5 Parametre til polynomier for emissionsfaktorerne $e_{ij}(v)$:
0% angiver tomvægt, 100% er fuldt laste.t

10gl , 100%	4. gradsled	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	0	-2.646E-4	7.824E-2	-7.099	3.661E2
CO	9.711E-8	-3.135E-5	3.891E-3	-2.305E-1	7.058
HC	3.526E-8	-1.053E-5	1.188E-3	-6.257E-2	1.632
NO _x	1.711E-7	-5.23E-5	7.384E-3	-5.132E-1	2.229E+1
Partikler	8.558E-9	-1.751E-6	1.877E-4	-1.487E-2	7.920E-1

10gl , 0%	4. gradsled	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	8.130E-6	-2.617E-3	2.973E-1	-1.380E1	3.53E2
CO	1.046E-7	-3.409E-5	4.162E-3	-2.365E-1	6.808
HC	3.675E-8	-1.108E-5	1.242E-3	-6.378E-2	1.583
NO _x	2.948E-8	-3.366E-5	6.786E-3	-4.418E-1	1.499E1
Partikler	0	-1.080E-6	2.175E-4	-1.225E-2	3.681E1

11ny , 100%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	-2.930E-4	7.675E-2	-6.316	3.352E2
CO	-5.208E-6	1.162E-3	-9.089E-2	3.246
HC	-4.250E-6	9.10E-4	-6.4E-2	1.997
NO _x	-3.749E-6	1.141E-3	-1.288E-1	8.430
Partikler	-1.082E-6	2.343E-4	-1.651E-2	5.238E-1

11ny , 0%	4. gradsled	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	0	-4.596E-4	1.035E-1	-6.558	2.296E2
CO	1.109E-8	-9.427E-6	1.588E-3	-1.072E-1	3.750
HC	0	-4.091E-6	8.574E-4	-6.051E-2	1.994
NO _x	0	-1.196E-5	2.490E-3	-1.596E-1	5.349
Partikler	0	-1.036E-6	2.160E-4	-1.495E-2	4.968E-1

26gl , 100%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	4.004E-4	1.802E-2	-1.057E1	8.831E2
CO	-5.19E-6	1.49E-3	-1.48E-1	6.194
HC	-3.18E-6	8.65E-4	-8.17E-2	3.248
NO _x	0	5.89E-3	-9.20E-1	5.8E1
Partikler	-3.30E-6	9.79E-4	-9.08E-2	3.514

26gl , 0%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	5.223E-6	4.997E-2	-7.544	5.16E2
CO	-4.708E-6	1.304E-3	-1.274E-1	5.318
HC	-2.821E-6	7.459E-4	-6.961E-2	2.770
NO _x	0	3.543E-3	-4.755E-1	2.850E1
Partikler	-2.061E-6	5.570E-4	-4.655E-2	1.694

24ny , 100%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	4.918E-4	-2.391E-2	-5.522	5.764E2
CO	-2.020E-6	7.478E-4	-8.093E-2	3.574
HC	-3.153E-6	8.344E-4	-7.092E-2	2.605
NO _x	0	2.681E-3	-4.208E-1	2.612E1
Partikler	-1.405E-6	3.804E-4	-3.325E-2	1.270

24 ny , 0%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	2.650E-4	-1.248E-2	-2.381	2.660E2
CO	-2.326E-6	6.424E-4	-5.746E-2	2.317
HC	-1.923E-6	5.655E-4	-5.151E-2	2.029
NO _x	0	2.034E-3	-2.604E-1	1.374E1
Partikler	-6.528E-7	2.253E-4	-2.243E-2	9.451E-1

48ny, 100%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	1.132E-3	-1.091E-1	-5.126	8.586E2
CO	-2.415E-6	6.896E-4	-7.081E-2	3.073
HC	-1.246E-6	3.200E-4	-2.792E-2	1.071
NO _x	0	3.386E-3	-6.195E-1	3.979E1
Partikler	-8.896E-7	2.169E-4	-1.806E-2	6.771E-1

48ny, 0%	3. gradsled	2. gradsled	1. gradsled	0. gradsled
Energi	2.838E-4	-5.297E-4	-4.224	3.709E2
CO	-1.558E-6	4.473E-4	-4.243E-2	1.751
HC	-1.376E-6	3.248E-4	-2.583E-2	9.265E-1
NO _x	0	1.577E-3	-2.400E-1	1.494E1
Partikler	-7.047E-7	1.789E-4	-1.513E-2	5.798E-1

8.4 Varebiler

Dieseldrevne varebilers energiforbrug og emissioner beregnes ved en kombination af COPERT-modellen (18) og Køremønsterundersøgelsen (4).

Køremønsterundersøgelsen indeholder et godt datagrundlag til bestemmelse af betydningen af rejsehastigheden, mens *niveauet* af energiforbrug og emissioner til gengæld er bestemt efter en meget grov metode.

COPERT-modellen udnyttes derfor til at sætte niveauet af energiforbrug og emissioner, mens Køremønsterundersøgelsen udnyttes til at angive betydningen af rejsehastigheden.

I modsætning til de øvrige køretøjstyper, tages der for varevogne **ikke** udgangspunkt i konkrete vognmodeller, men derimod i en køretøjsklasse, der i COPERT-modellen er defineret som *dieselvarebiler mellem 2½ og 3½ ton totalvægt*. Nedenfor er anført data for 3 dieselvarevognsmodeller, der er almindelige i Danmark.

De eneste variable i energi- og emissions-beregningerne for varebiler er afstanden og rejsehastigheden. Belæsningen er ikke inddraget i beregningerne af to grunde: belæsningens betydning for energi og emissioner er vurderet at være relativt lille - mindre end for lastbiler; og det ville desuden være metodemæssigt vanskeligt med det anvendte datagrundlag.

Tabel 8.6 Data for typiske dieseldrevne varevogne.

Dataoversigt Varevogne	Fiat Ducato 14	Ford Transit 120	Toyota Hiace
Fuldvægt	3,1 t	2,8 t	2,5 t
Lasteevne	1,6 t	1,1 t	1,0 t
Ladrumfang	6,5 m ³	6,0 m ³	5,9 m ³
Motor	2½l -	2½l 52kW	2,4l 57kW
brændstoføkonomi *) 90km/t	11,8 km/l (~60g/km)	14,7 km/l (~48g/km)	11,9 km/l (~60g/km)

*) De anførte forbrugstal gælder ved konstant fart, og er som forventet lidt lavere end COPERT-modellens tilsvarende tal (65g/km v. 90km/t).

Den kritiske last-massefylde for disse tre varevogne er 130-220 kg/m³. Hermed menes den massefylde, der medfører, at når lastrummet er fyldt helt op med varer af den pågældende massefylde, er vognen læsset til fuld vægt.

Brugerspecificerede parametre

Til beregningerne skal to brugerparametre specificeres af brugeren:

- Strækning: Total antal kørte kilometer
- Rejsehastigheder: 10-110 km/t

Strækningen kan specificeres med op til tre delstrækninger med respektive rejsehastigheder, jævnfør beskrivelsen for personbilerne.

Beregningsgangen for energi og emissioner

COPERT-modellens angiver energiforbrug og emissionsværdier for tre hastigheder: 20, 60 og 100 km/t. Værdierne er angivet i skemaet herunder sammen med værdierne fra Køremønsterundersøgelsen i parentes.

Tabel 8.7 Emissionfaktorernes afhængighed af rejsehastighed.

Alle værdier gram/km	Rejsehastighed		
	20 km/t	60 km/t	100 km/t
HC ^{*)}	0,40 (1,34)	0,25 (0,57)	0,13 (0,34)
CO	2,00 (16,7)	0,80 (7,37)	0,60 (5,81)
NOx	1,60 (2,34)	1,20 (1,50)	1,25 (1,72)
part.	0,25 (0,29)	0,25 (0,18)	0,16 (0,21)
energi	106 (139)	68 (70)	64 (65)

^{*)} Grundværdier for varevogne mellem 2½ og 3½ t ifølge COPERT, med tal fra Køremønsterundersøgelsen i parentes. *: HC er i COPERT-modellen opgivet som VOC = Volatile Organic Compounds. Disse værdier regnes identiske med HC. Forskellen er CH₄ (methan) - som dieselmotor kun udsender i lille omfang.

For visse af værdierne er der store forskelle mellem COPERT-modellens tal og Køremønsterundersøgelsens tal - det gælder særligt CO-emissionerne. Det skal ses i sammenhæng med, at Køremønsterundersøgelsens tal tager udgangspunkt i en vægtning af benzin- og dieseldrevne varevogne, mens COPERT-modellen beregner specifikt for dieseldrevne.

Det ses, at hvad energiforbruget angår, er der god overensstemmelse mellem COPERT og Køremønsterundersøgelsen, hvad angår de relative værdier ved 60 og 100 km/t, men ikke for 20 km/t. Det kan forklares med, at der er god overensstemmelse mellem de to kilders køremønstre ved 60 og 100 km/t, mens køremønstrene ved 20 km/t er ret forskellige. Det er derfor valgt kun at bruge forholdene mellem emissionsværdierne for 60 og 100 km/t til at justere køremønsterundersøgelsens tal ifølge COPERT:

$$e = e_{kørem.} \times k_i$$

hvor k_i er korrektionsfaktor for emissionstype i :

$$k_i = (\frac{1}{2} e_{60.COP}/e_{60.kørem} + \frac{1}{2} e_{100.COP}/e_{100.kørem})$$

Beregningen af for eksempel k_{NOx} ser da således ud:

$$k_{NOx} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 / 1,5 + \frac{1}{2} \cdot 1,25 / 1,72 = 0,76.$$

Herved fås følgende korrektionsfaktorer, som skal anvendes på Køremønsterundersøgelsens værdier:

Tabel 8.8 Korrektionsfaktorer k_i

HC	0,41
CO	0,106
NOx	0,76
part.	1,07
energi	0,98

Ud fra de registrerede køremønstre i projekt *Køremønstre og luftforurening* (4) er tilnærmede Taylor-polynomier for energiforbrug og de fire emissionsformer fundet. Korrigeret med ovenstående faktorer ser formeludtrykkene således ud:

$$e_{CO} = 0,106 \cdot (5,103 \cdot 10^{-10} \cdot v^6 - 2,275 \cdot 10^{-7} \cdot v^5 + 4,035 \cdot 10^{-5} \cdot v^4 - 3,625 \cdot 10^{-3} \cdot v^3 + 0,1748 \cdot v^2 - 4,468 \cdot v + 59,35)$$

$$e_{HC} = 0,41 \cdot (2,822 \cdot 10^{-11} \cdot v^6 - 1,303 \cdot 10^{-8} \cdot v^5 + 2,402 \cdot 10^{-6} \cdot v^4 - 2,252 \cdot 10^{-4} \cdot v^3 + 1,138 \cdot 10^{-2} \cdot v^2 - 0,3078 \cdot v + 4,400)$$

$$e_{NOx} = 0,76 \cdot (2,178 \cdot 10^{-9} \cdot v^5 + 7,971 \cdot 10^{-7} \cdot v^4 - 1,111 \cdot 10^{-4} \cdot v^3 + 7,589 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 - 0,2634 \cdot v + 5,342)$$

$$e_{energi} = 0,98 \cdot (3,758 \cdot 10^{-9} \cdot v^6 - 1,652 \cdot 10^{-6} \cdot v^5 + 2,912 \cdot 10^{-4} \cdot v^4 - 2,623 \cdot 10^{-2} \cdot v^3 + 1,282 \cdot v^2 - 33,47 \cdot v + 464,1)$$

$$e_{partikel} = 1,07 \cdot (1,552 \cdot 10^{-11} \cdot v^5 - 5,950 \cdot 10^{-10} \cdot v^4 - 7,232 \cdot 10^{-7} \cdot v^3 + 1,485 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 - 1,109 \cdot 10^{-2} \cdot v + 0,4597)$$

Alle værdier er i gram pr. km. Værdierne indenfor parenteserne er udledt ud fra data fra Køremønsterundersøgelsen, mens faktoren foran hver parentes bevirker omregningen ifølge COPERT-data.

For en hel rejse udføres emissions- og energiberegningerne på følgende måde:

$$E_{tot,i} = \sum_j (S_j \cdot e_{i,j}(v))$$

hvor

$E_{tot,i}$ indikerer totale emissioner/energiforbrug (gram eller MJ) af typen i ,

S_j er længden af tursegment j (km),

$e_{i,j}$ er emissions-/energifaktorer (gram/km el. MJ/km) af typen i for tursegment j , som funktion af

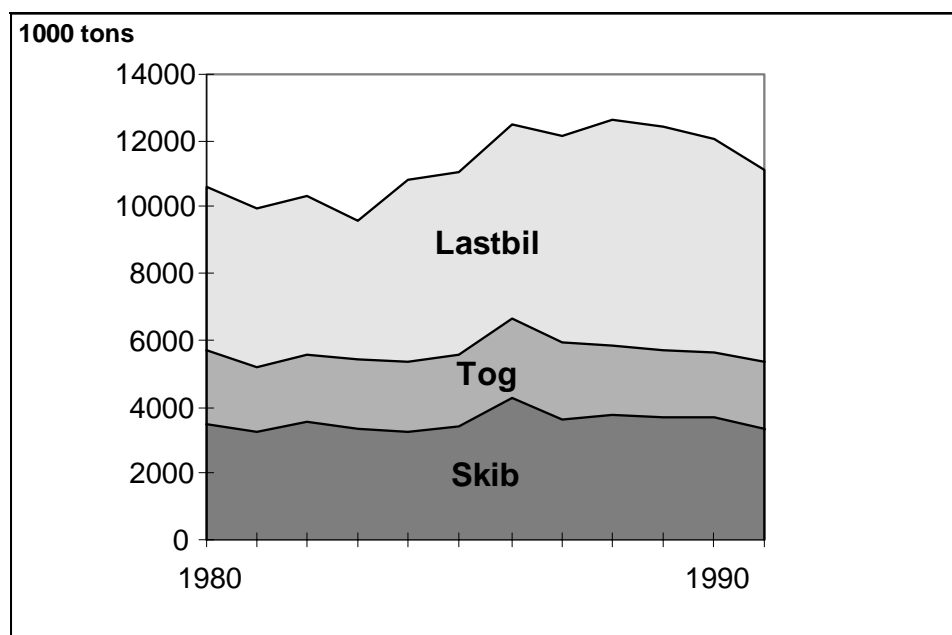
v rejsehastigheden, jf. ovenstående polynomier.

9 Fragtskibe

9.1 Metode og determinerende faktorer

Godstransporten med skib mellem Øst- og Vestdanmark har været forholdsvis konstant i perioden 1980-91 (se Figur 9.1) og andelen af den samlede transport er omkring 30%. Togenes andel er faldet lidt til fordel for lastbilerne, en udvikling der dog er ændret i slutningen af perioden.

Figur 9.1 Godstransport mellem Øst- og Vestdanmark.



Kilde: Transportstatistik 1980-1991 (tabel 6.2), Trafikministeriet

Lidt over halvdelen af godstransporten med fragtskibe er foretaget af tankskibe, hovedsageligt transport af råolie. Tankskibe er dog ikke medtaget i TEMA, da der her fokuseres på en sammenligning af miljøeffekterne ved forskellige transportformer. I TEMA medtages derfor skibstyper, hvor der er en reel mulighed for at godset alternativt kunne transporteres med tog eller lastbil, og der muliggøres således overflytningsanalyser.

Tabel 9.1 beskriver to typiske fragtskibe, en coaster og et containerskib, som er typiske i de danske farvande. Levetiden for et fragtskib er 20-30 år, men hos de

større rederier (f.eks. Knud I Larsen Rederiet A/S) er de fleste skibe bygget efter 1980. Levetiden anses ikke for at have den store betydning for ydeevne, da vedligeholdelsestilstanden typisk er høj.

Tabel 9.1 Data for Fragtskibe i TEMA

	Coaster 499 BRT	Containerskib 4960 BRT
Motortype ^{a)}	Medium Speed	Slow Speed
Serviceeffekt, kW	810	8.800
DWT ^{b)} , tons	1.580	11.000
Displacement ^{c)} ved fuld last, tons	2.257	15.714
Typisk servicefart, knob	11,0	17,5
km/t	20,4	32,4
Energiforbrug ^{f)} , tons olie pr døgn	4,1	30,0
MJ/ton-km ^{d)}	0,21	0,14
Emissioner i g/ton-km ^{f)}		
CO ₂	17,225	11,097
CO	0,042	0,032
NO _x	0,313	0,295
HC	0,014	0,009
SO ₂ ^{e)}	0,111	0,169
Partikler	0,004	0,007

Noter: a) Medium og Slow Speed relaterer til fire-takts henholdsvis to-takts motorer og ikke servicefart.
 b) DWT = Dead Weight Tonnes, er skibets last-bæreevne i tons.
 c) Displacement er skibets totalvægt ved fuld last (der er her regnet med forholdet: skiblast = 30% + 70% = 100%).
 d) Der er regnet med en brændværdi på 40 MJ pr kg fuelolie.
 e) Svovlindhold på 1% og 2,3% for henholdsvis coaster og containerskib
 f) Ved fuld last og typisk servicefart

Kilder: Trafikministeriet (1990), Transporthandlingsplan for Miljø og Udvikling.
 Telefonsamtale med Stefan Henriksen, Knud I Larsen, Rederiet A/S.

Til beregning af emissionerne i Tabel 9.1 er der anvendt **emissionskoefficienter** fra Lloyd's Register (se Tabel 9.2) og energiforbrug i MJ/ton-km ved fuld last og typisk servicefart.

Tabel 9.2 Lloyd's Emissionskoefficienter.

Motortype	Medium Speed Engine g/MJ	Slow Speed Engine g/MJ
CO ₂	81,25	79,13
CO	0,20	0,23
NO _x	1,48	2,10
HC	0,07	0,06
SO ₂ ^{b)}	0,53*S	0,53*S
Partikler ^{c)}	0,02	0,05

Noter: a) Der er regnet med en brændværdi på 40 MJ pr kg fuelolie. Hvis energiforbruget angives i elektrisk effekt (W), som det ofte gøres i bl.a. Lloyd's, må der regnes med en effektivitet på omkring 40%.
b) S er svovlindhold i %
c) Emissionskoefficienten for partikler er taget fra DSB målinger på færgerne for henholdsvis dieselolie og fuelolie.

Kilder: Lloyd's Register

Ved beregningen af energiforbrug og emissioner for fragtskibe i TEMA vil der blive taget hensyn til, at skibene ikke altid sejler med fuld last. Især for tankskibe, som ikke er med i TEMA, gælder det, at de næsten altid må sejle tomme tilbage til lastepladserne. For coastere og containerskibe vil der næsten altid være last på alle turene. Vægten af lasten vil dog både være bestemt af **kapacitetsudnyttelsen** af skibets lastrum, samt af vægtfylden.

For TEMA, hvor der fokuseres på **energiforbrug og emissioner pr ton-km gods** transporteres, har det nogen betydning om en overflytning af f.eks. et tons gods fra lastbil til fragtskib sker til et lavt- eller højtudnyttet skib. Figur 8.2 viser sammenhængen mellem energiforbrug pr ton-km (og dermed emissioner) og kapacitetsudnyttelsen. Ved 50% kapacitetsudnyttelse er forbruget 0,32 og 0,21 MJ/ton-km for henholdsvis coasteren og containerskibet, hvor tallene er 0,21 og 0,14 MJ/ton-km (se Tabel 9.1) ved fuld last.

Graf 8.2 er fremkommet via formlen for **Admiralitetskoefficienten (A)**, der rimeligt kan anses for konstant for den type skibe, hvorunder coastere og containerskibe hører. Derimod er f.eks. færger bygget så dybdegangen ikke øges betydeligt med lastvægten:

$$A = \frac{D^{\frac{2}{3}} * H^3}{ME}$$

Dette medfører

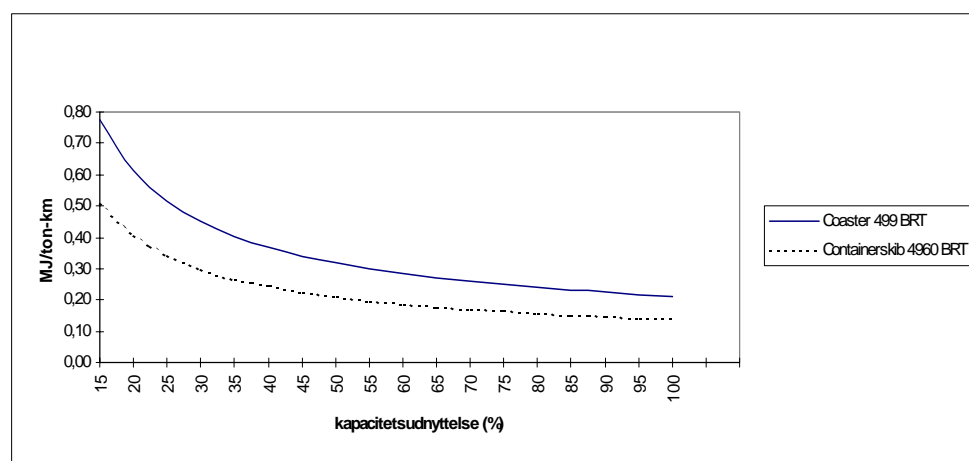
$$ME = \frac{D^{\frac{2}{3}} * H^3}{A}$$

hvor, A = Admiralitetskoefficient
 D = Displacement (skibet vægt inklusive last) [tons]
 H = Hastighed [knob]
 ME = Effekt fra motorerne [kW]

Således øges motoreffekt, energiforbrug og emissioner med potensen 2/3 for Displacement og potensen 3 for hastigheden.

Hastighed og motoreffekten er holdt konstante i Graf 8.2, mens formelen viser, at energiforbruget stiger meget kraftigt med hastigheden.

Figur 9.2 Energiforbrug pr ton-km for fragtskibe



9.2 Brugerspecificerede parametre

Tabel 9.1 viser, at energiforbruget ved godstransport er lavere for containerskibet end for coasteren. Valget af **skibstype** vil dog normalt afhænge af hvilken type last, der skal transporteres. Drejer det sig om stykgods, træ eller f.eks. en mindre ladning kul anvendes coasteren, mens containerskibet i sagens natur transporterer containere. Containerne er ofte pakket direkte på fabrikken og transporteres uden håndtering undervejs direkte til modtageren.

Formlen for admiralitetskoefficienten viser som sagt, at **hastigheden** har stor betydning for energiforbruget og dermed emissionerne. Skibene har dog en typisk servicefart (se Tabel 9.1); især containerskibene, der ofte sejler rutefart, overholder denne. Det vil dog være muligt for TEMA-brugeren at ændre denne parameter.

Brugerne kan specificere **kapacitetsudnyttelse**, der ifølge Graf 8.2 har nogen betydning for energiforbruget pr ton-km. Som default-værdi anvendes 2/3 (67%) for begge skibstyper.

Brugeren skal naturligvis opgive **vægten af lasten**, der ønskes transporteret, samt den **afstand** der skal tilbagelægges.

De mulige brugerparametre er derfor:

- skibstype (Coaster eller Containerskib)
- hastighed (default = "typisk servicefart")
- kapacitetsudnyttelse (default = 66%)
- vægten af lasten der ønskes transporteret
- afstand

9.3 Beregningsgang for energiforbrug og emissioner

Formlen for Admiralitetskoefficienten samt oplysningerne i Tabel 9.1 indeholder grundlaget for beregningerne af energiforbrug og emissioner ved en given fragtmængde over en given afstand.

Eksempel: Der skal transporteres 1 ton gods 100 km med en coaster der har en kapacitetsudnyttelse på 50% og som sejler ved normal servicehastighed. Benævnelsen af Admiralitetskoefficienten er i det følgende udeladt (fuld last idet der her er måleresultater):

$$A = \frac{(2.257\text{tons})^{\frac{2}{3}} * (11\text{knot})^3}{810\text{kW}} = 283$$

Data fra Tabel 9.1 medfører, at det totale energiforbrug ved fuld last og 11 knob for den givne rute er:

$$E_{fuldlast} = 0,21\text{MJ} / \text{ton} - \text{km} * 100\text{km} * 1.580\text{tons} = 33,2 \text{ GJ}$$

Motoreffekten ved halv last er derimod:

$$ME_{halvlast} = \frac{(2.257\text{tons} - 0,5 * 1.580\text{tons})^{\frac{2}{3}} * (11\text{knot})^3}{283} = 607\text{kW}$$

således at energiforbruget ved halv last og 11 knob er:

$$E_{halvlast} = \frac{ME_{halvlast}}{ME_{fuldlast}} * E_{fuldlast} = 25,0 \text{ GJ}$$

Energiforbruget pr ton er således (ved 11 knob):

$$E_{\text{halvlast pr ton}} = \frac{25,0 \text{ GJ}}{790 \text{ tons}} = 32 \text{ MJ / t}$$

Dette svarer således til Figur 8.2 (hvor det er opgjort pr km).

Indkluderes hastighedsafhængighed bliver den ovenfor beregning:

$$E_{\text{halvlast}}(f_knob) = \frac{ME_{\text{halvlast}}}{ME_{\text{fuldlast}}} * E_{\text{fuldlast}} * \left(\frac{f_knob}{11knob}\right)^3 = 25,0 \text{ GJ}$$

Emissionerne beregnes ud fra energiforbruget med faste emissionsfaktorer pr. kWh, jvf. Tabel 9.2

10 Godstransport med Færger

10.1 Metode og determinerende faktorer

En del af godstransporten med lastbil eller tog kan foregå på en færge.

10.1.1 Lastbil

Som beskrevet i Kapitel 7 kan der overføres lastbiler med følgende færger:

- Halskov-Knudshoved (Heimdal)
- Århus-Kalundborg (Ask)
- Ebeltoft-S. Odde (Mette Møls)
- Bøjden-Fynshav (Najaden)

Det antages, at en lastbil i gennemsnit fylder mellem 3 og 6 personbiler (se Tabel 7.4), således at et beregningseksempel, hvor en lastbil skal over Halskov-Knudshoved med 10 tons last (default belægningsgrad 53%), giver følgende beregning:

Energiforbrug pr personbil-km = 13 MJ

Energiforbrug pr lastbil-km = 13 MJ * 2 = 26 MJ

Energiforbrug pr ton-km = 2,6 MJ

10.1.2 Tog

Overførsel af gods med tog sker normalt om natten på færgetyper, der antages at have samme karakteristika som "Kronprins Frederik". Emissionerne pr ton-km beregnes derfor ud fra:

- vægten af gods i den enkelte godsvogn;
- kapacitetsudnyttelsen af færgen (kapacitetsbegrænsningen på færgen er sporelængden og ikke lastvægten, og det antages at længden af en godsvogn i gennemsnit er 15 meter; og sporelængden på "Kronprins Frederik" er 495,80m).

11 Godstog

11.1 Metode og determinerende faktorer

Graf 8.1 i Kapitel 8 viste, at godstogenes andel af den samlede godstransport mellem Øst- og Vestdanmark er faldet lidt i perioden 1980-91, mest til fordel for lastbilerne.

Godstrafikken på de danske jernbaner foregår som *Stykgods, Hellast, Kombi* eller *Transit*. I Kapitel 8 blev det diskuteret, at typen af gods kan have betydning for valget af fragtskib, dvs. coaster eller containerskib. For godstog gælder det, at en givet kørsel ofte er en blanding af de forskellige typer, som det kan være svært at skelne mellem. Forskellig vægtfylde af lasten kan dog have betydning, men dette ses bort fra i den første version af TEMA.

I modsætning til persontransporten med tog foregår det meste af godstransporten ikke efter en køreplan med en bestemt lokomotivtype med et konstant antal vogne eller lastvægt. For TEMA er der valgt at medtage et antal repræsentative lokomotiver med et typisk antal vogne. Dette valg er i høj grad styret af faktiske energiforbrugs- og emissionsmålinger DSB har foretaget på et antal godstogskørsler.

Da ca. 60% af godstransporten foretages med MZ lokomotivet medtages i TEMA kun én *Litra*:

- MZ

mens der for antal vogne skelnes mellem (*Produkt*):

- et langt tog (35 vogne)
- et kort tog (3 vogne)

således at en analyse af effekten af mere eller mindre godstransport (overflytning) med tog kan foretages. Det må dog bemærkes, at det "typiske" godstog har 10-15 vogne, men der er indtil videre ingen tilgængelige målinger for disse (DSB er igang med sådanne målinger). I praksis kan fragt-senderen dog ikke altid vide om transporten sker med et kort eller langt tog. For en given strækning kan antallet af vogne desuden svinge, da der sker til- og frakobling.

Godstrafikken med tog kompliceres yderligere af, at godstog til tider fremføres med både to og tre lokomotiver af forskellig slags.

I modsætning til lastbiler er tomvognskørsel af mindre betydning. I 1994 udgjorde kørslen med tomme vogne 15,8% af den samlede kørsel, opgjort som bruttotonkm (vægt på krogen).

Det anses ikke at være nødvendigt at opdele det danske jernbanenet i faste segmenter, som gjort ved persontransporten. Dette betyder dog ikke, at der ikke er forskel på energiforbrug og emissioner mellem f.eks. hovedlinierne og de mere lokale linier, hvorfor der i en senere version kunne indføres en "brugerparameter" til at give denne forskel.

DSB har nogle målinger for forskellige segmenter af hovedlinierne, men for første version af TEMA anses forskellene at være for ubetydelige til at udvide modellens omfang.

Tabel 11.1 herunder viser DSBs faktiske måleresultater.

Tabel 11.1 Data for Godstog.

Litra	MZ	
Produkt	3 vogne	35 vogne
Vægt af lokomotiv, tons	121,2	
Vægt pr vogn, tons	19	24
Lastrummål, m ³	34 - 105,2	
Vægt af vogne ialt, tons	56,7	830,2
Vægt af last, tons	28,7	1047,9
Total vægt af tog, tons	206,6	1999,3
Servicefart, km/t	47	39
Energiforbrug i MJ/ton-km (ved default kapacitetsudn.)	2,8	0,17
Emissioner i g/ton-km (ved default kapacitetsudn.)		
CO ₂	202	13
CO	0,46	0,026
NO _x	3,0	0,21
HC	0,17	0,0071
SO ₂	0,065	0,0041
Partikler	0,090	0,0064

Kilde: DSB (Jesper Arkil).

11.2 Brugerspecificerede parametre

Ovenstående diskussion leder til følgende brugerparametre medtages:

- Produkt (kort eller langt tog)
- Vægten af lasten der ønskes transporteret
- Afstand

På længere sigt kunne disse tænkes udvidet med:

- Godstype (Stykgods, Hellast, Kombi eller Transit)
- Yderligere Litra (MY eller ME)
- Segmentinddeling af det danske jernbanenet.

11.3 Beregningsgang for energiforbrug og emissioner

Emissioner for en given godstransport beregnes på baggrund af data i Tabel 11.1. Der skelnes mellem beregningen for det lange og det korte tog, hvor det for førstnævnte antages at energiforbruget og emissionerne vokser proportionalt med last-vægten, således at resultaterne er konstante pr tonkm. Denne antagelse bygger på resultater fra DSB for to lange tog med forskellig lastvægt. For det korte tog derimod anses en (lidt) ændret lastmængde kun at have en marginal betydning for det totale energiforbrug og emissionerne, således at disse målt pr tonkm falder proportionalt med lastmængden (denne antagelse gælder dog kun for små ændringer af lastvægt):

langt tog

$$E_{ij} = e_{ij} * vægt * afstand$$

kort tog

$$E_{ij} = e_{ij} * 28,7t * afstand$$

hvor, E = totale emissioner for turen i gram af type i for produkt j
 e = emissionskoefficient i g/ton-km for type i for produkt j
 $vægt$ = vægten af lasten i tons
 $afstand$ = afstand lasten skal transporteres i km.

Bilag 1 Tekniske omregningsfaktorer

Olieprodukt	Vægtfylde	Brændværdi, MJ/kg	CO ₂ , g/MJ	SO ₂ , vægtprocent og g/kg	
Motorbenzin	0.75	43.8	73	0.02 %	0.4
Gas-/dieselolie	0.84	42.7	74	0.05 %	1.0
JP1	0.80	43.5	72	0.01 %	0.2
Fuelolie	0.98	40.4	78	1.0%	20.0

Bilag 2 Emissionsfaktorernes afhængighed af rejsehastigheden

Bilag 3: Emissioner fra Tog

Kildehenvisninger til kapitel om personbiler, busser og last- og varevogne

1. Project in Use Compliance Air Pollution by cars in use - annual reports 1990/91, 92/93 & 93/94.
2. Individual and Public Transportation - Emissions and Energy Consumption Models (Laboratoriet for Energiteknik, rapport RE 91-5) side 18.
3. Personbilers årskørsel. Notat fra Danmarks Statistik, 19. maj 1993.
4. Køremønstre og luftforurening i provinsen. Vejdatalaboratoriet, rapport 105, 1992.
5. Koldstartanalyse. Vejdirektoratet, Trafiksikkerhed og Miljø, rapport 7 / 1994.
6. BILEMIS - en prognosemodel til beregning af køretøjsemissioner. Laboratoriet for Energiteknik, rapport RE 91-1.
7. Individual and Public Transportation - Emissions and Energy Consumption Models. Laboratoriet for Energiteknik, rapport RE 91-5.
8. Energiforbrug ved individuel og kollektiv trafik i bygader. EFP, projekt 1243/91-003. COWIconsult, marts 1993.
9. Aeronautical Information Publication Vol. I, AGA-2-EKCH-1.
10. Samtale med Erik Iversen, Miljøstyrelsen.
11. Monitoring and enforcing of in-use compliance. Experiences in the Netherlands. Den Haag, 16.6.93.
12. Data præsenteret af dr. Pischinger, FEV Motorentechnik på symposiet *Auto Emissions 2000* i Bruxelles, 1992 (ref. i (11)).
13. Totalemissionen af CO, HC og NOx fra bilparken i Danmark. Laboratoriet for Energiteknik, RE83-6.
14. Trafikministeriets Landsdækkende database for Bustrafik (projekt under færdiggørelse - endnu ikke afsluttet)
15. Miljöeffekter av transportmedelsval för godstransporter. KFB-rapport 1994:6.
16. Godstrafik i byer - en oversigt. IVTB-rapport nr. 62, 1991.

17. Nierop, Arnold v.: Green light for 50 tonnes. Artikel i *Transport en Logistiek*.
18. COPERT working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic. Volume 1: Methodology and emission factors.