

Byemissionsmodellen  
- en overslagsmetode til en emissionsortlægning

Hans Bendtsen og Lone Reiff

Afdelingen for Trafiksikkerhed og Miljø  
Vejdirektoratet

## 0. Abstract

Der er udviklet en generel byemissionsmodel. Den kan estimere vejtrafikkens bidrag til den totale luftforurening i et byområde. Det er en simpel model, der bruger lettilgængelige byplandata (antal indbyggere og arbejdspladser) som input. Modellen kan anvendes af kommuner i.f.b med trafik- og miljøplanlægning.

Byemissionsmodellen er udviklet med udgangspunkt i en detaljeret emissionsopgørelse for København af trafikens bidrag af NO<sub>x</sub>, CO, HC, partikler samt CO<sub>2</sub> og energiforbrug. Sammenhæng mellem trafik og emissioner og antal arbejdspladser og antal jobs i et byområde er analyseret ved hjælp af lineær regression hvor en række arbejdshypoteser er testet. Det konkluderes at der eksisterer en acceptabel lineær sammenhæng mellem byplandata og trafik og emissioner. Byemissionsmodellen er baseret på denne sammenhæng.

Byemissionsmodellen er udviklet i forbindelse med deltagelsen i et projekt med Danmarks Miljøundersøgelser m.fl. under Det Strategiske Miljøforskningsprogram.

## 1. Introduktion

I 1990'erne er en lang række bykommuner gået i gang med at arbejde med en sammenhængende trafik- og miljøplanlægning. Vejnettets luftforurening kortlægges, der opstilles målsætninger og der udarbejdes trafik og miljø handlingsplaner. Til dette arbejde er der behov for metoder til både at beregne gadeluftkvaliteten samt de totale emissioner. En del kommuner har, som lokal opfølgning på Rio-konferencen om det globale miljø, igangsat såkaldt "Agenda 21" arbejde, hvor det primære mål er lokalt at medvirke til reduktion af CO<sub>2</sub> emissionerne. I den sammenhæng kan der være et behov for metoder til at opgøre vejtrafikkens CO<sub>2</sub> emissioner i sammenhængende byområder.

Dette projekt indeholder udviklingen af en overslagsmetode til opgørelse af vejtrafikkens emissioner i byområder baseret en detaljeret emissionsopgørelse for et stort område i Storkøbenhavn kaldet "Flademodellen. Metoden, der kaldes Byemissionsmodellen (BEM) er baseret på almindeligt kendte byplandata, som befolkning og antal arbejdspladser i byen, kan beregne det samlede trafikarbejde og de samlede emissioner.

Den detaljerede analyse (Flademodellen) af de trafikskabte emissioner i en større del af København skal både indgå i et arbejde med at udvikle bedre modeller til beregning af gadeluftkvalitet samt i et arbejde med at udvikle generelle modeller til beskrivelse af luftforureningen i byer (såkaldte mesoskala modeller). Disse modeludviklingsarbejder

gennemføres af Danmarks Miljøundersøgelser og gennemgås ikke i det følgende.

## 2. Flademodellen - emissionsopgørelse

Vejdirektoratet har udviklet en model, kaldet "Flademodellen", som er anvendt til beregning (time for time) af den samlede vejtrafikskabte luftforurening i et 151 km<sup>2</sup> stort byområde omkring Jagtvej. Området dækker Københavns og Frederiksberg Kommuner samt dele af Københavns amt. Det omkranses i grove træk af Jægersborg Dyrehave, Motorringvejen, Kastrup Lufthavn samt Øresund. Da vejnettes struktur og trafikken godt kan variere i forskellige sektorer af byen, er det valgt at underopdele det samlede analyseområde i 43 mindre områder med en størrelse på 2 gange 2 kilometer. De samlede emissioner fra trafikken på et vejnet kan opgøres på forskellige måder. Som udgangspunkt anvendes normalt følgende:

$$\text{Samlet emission} = \text{Samlet trafikarbejde} * \text{Emissionsfaktor}$$

Hvis der i forbindelse med trafikplanlægning er opstillet en trafikmodel for en by kan denne model danne baggrund for at beregne det samlede trafikarbejde. Uden trafikmodel kan man for hver enkelt vejstrækning opgøre vejlængde, trafikmængde evt fordelt på forskellige køretøjskategorier samt hastighed, og på den baggrund beregne det samlede trafikarbejde. Jo mere detaljerede oplysninger der findes, fx om køretøjsfordeling og hastigheder, jo bedre bliver resultatet. Disse metoder er relativt ressourcekrævende, og kan måske derfor betyde, at man i mange tilfælde vælger at afstå fra at foretage en samlet emissionsopgørelse.

Der kunne derfor være et perspektiv i at have en simpel overslagsmetode, som var mindre ressourcekrævende at anvende. En sådan metode, kaldet Byemissionsmodellen, udvikles i det følgende på baggrund af den Flademodel for København som Vejdirektoratet har udviklet.

Følgende kriterier har været med i vurderingerne ved det endelige valg af metode, der er brugt til udvikling af Flademodellen:

- Metoden skulle være fleksibel, således at forudsætninger og inddata kunne ændres undervejs eller senere, når ny viden måtte foreligge.
- Metoden skulle give en præcis beskrivelse af de samlede emissioner i hvert af de udvalgte analyseområder på 2 x 2 km.
- Metoden måtte ikke kræve en uoverstigelig mængde inddata.
- Metoden skulle bygges op omkring trafikdata, det ville være muligt at fremskaffe fra eksisterende kilder, uden igangsættelse af et nyt program med omfattende trafiktællinger.
- Metoden skulle give resultater der ville være repræsentative for årene 1994 og 1995.
- Metoden skulle omfatte hele vejnettet fra de små lokalveje til motorvejene.

Der blev valgt en metode, hvor der i hvert område foretages en opgørelse af hvor lange vejstrækninger, der findes af 4 forskellige vejtyper med forskellig hastighed. Dernæst findes trafiktallene for vejene ved hjælp af eksisterende trafiktællinger. På den baggrund beregnes trafikarbejdet i hvert enkeltområde. Denne metode kræver et relativt stort dataindsamlingsarbejde, men giver samtidig en rimelig stor præcision. På baggrund af trafikarbejdet og en emissionsmodel kan vejtrafikkens totale emission af henholdsvis NO<sub>x</sub>, CO, HC, partikler samt energiforbruget beregnes i hvert enkelt område.

For hver område estimeres det samlede transportarbejde fordelt på 4 vejtyper, der er karakteriseret ved følgende hastighedsklasser:

- 30 km/t lokalveje (hvor der ofte er gennemført trafiksanering).
- 50 km/t overordnede fordelingsveje.
- 60 km/t overordnede byveje med gennemkørende trafik.
- 110 km/t motorveje.

For hver vejtyper bestemmes fordelingen af køretøjer på de 4 kategorier, der normalt anvendes ved beregning af luftforurening:

- personbiler under 2 ton.
- varebiler mellem 2 og 3,5 ton.
- lastbiler og busser med 2 aksler.
- lastbiler og busser med mere end 2 aksler.

Personbilerne underopdeles desuden i benzinbiler med og uden katalysator samt i dieslbiler. For hver vejtype anvendes en fordeling af trafikken på døgnets 24 timer.

De anvendte emissionsdata kommer fra projektet "Køremønstre og luftforurening - i provinsen". I dette projekt målte køremønstre på forskellige vejtyper. Emissioner og energiforbrug blev beregnet for køretøjerne på de enkelte vejtyper ved hjælp af en meget detaljeret emissionsmodel udviklet på Danmarks Tekniske Universitet [4]. Modellen indeholder emissioner for forskellige køretøjer ved forskellige accelerationer, decellerationer og hastigheder. I emissionsmodellen er foretaget korrektioner for kørsel med kolde biler på byvejene idet emissionerne af CO, HC samt NO<sub>x</sub> er væsentlig højere ved kørsel med kold end med varm motor. Andelen af kolde biler er ud fra en detaljeret analyse af trafikken på en række veje i Roskilde bestemt til mellem 3 og 8 %. Der er foretaget korrektioner for ændret emission som følge af slitage m.m.

### 3. Resultater

	30 km/t	50 km/t	60 km/t	110 km/t	I alt
Vejlængde [km]	862	171	70	27	1128
Trafikarbejde [100 mio. km]	1,4	7,1	6,0	4,3	18,8
HC [100 ton]	2,2	8,8	6,4	2,8	20,2
NO <sub>x</sub> [100 ton]	2,8	14,8	12,5	11,8	41,9
CO [1000 ton]	3,0	12,6	8,9	4,4	28,9
Partikler [ton]	9,4	48,0	40,5	36,5	134,4
Energiforbrug [100 TJ]	5,3	24,3	18,6	13,1	61,3

*Tabel 1 Samlede emissioner og trafikarbejde (Trafik) opgjort i millioner kørte kilometer beregnet med Flademodellen for et helt år i hele modelområdet i København, opdelt på de 4 vejtyper (angivet som 30, 50, 60 og 110).*

I tabel 1 er de samlede vejlængder, trafikarbejde, emissioner og energiforbrug fordelt procentuelt på vejtyper. Det ses at lokalvejene (30 km veje) udgør hovedparten af vejlængden nemlig 76 %, men kun en mindre del af trafik (7%), emissioner (7-11%) og energiforbrug (9%). Dette hænger sammen med, at den gennemsnitlige trafikbelastning er meget forskellig på de forskellige vejtyper.

Generelt er der en lineær sammenhæng mellem trafikmængde og luftforureningsemissioner. Derfor kunne det umiddelbart forventes, at andelen af trafik på en vejtype svarer til andelen af de 4 luftforurende stoffer. Det er dog ikke helt sådan. Lokalvejene (30 km veje) tegner sig for 7 % af det samlede trafikarbejde, hvorimod de er ansvarlige for henholdsvis 11 % og 10 % af HC og CO emissionerne. For motorvejene (110 km veje) er forholdet, at de er ansvarlige for 23 % af trafikarbejdet, mens de er ansvarlige for henholdsvis 14 % og 15 % af HC og CO emissionerne, disse emissioner er relativt mindre end for lokalvejene. Disse forskelle skyldes primært at fordelingen mellem forskellige køretøjstyper er forskellig på de 4 vejtyper.

På lokalvejene (30 km veje) og de overordnede fordelingsveje (50 km veje), hvor andelen af benzindrevne personbiler er høj, og der er få dieseldrevne lastbiler, vil HC og CO emissionerne være relativt høje i forhold til  $\text{NO}_x$  og partikel emissionen. På de overordnede byveje med gennemkørende trafik (60 km veje) samt motorvejene (110 km veje), hvor der er en større andel af dieseldrevne lastbiler, vil  $\text{NO}_x$  og Partikel emissionerne derimod være relativt høje.

Der er foretaget en sammenligning med en national emissionsopgørelse fra 1992 foretaget for Miljøstyrelsen. Der er en rimelig god overensstemmelse mellem resultaterne af de 2 opgørelsesmetoder [1].

#### **4. Udvikling af overslagsmetode**

Der er foretaget en indsamling af byplandata for alle de 43 områder, der indgår i Flademodellen. Med byplandata forstås i denne sammenhæng:

- Antal boliger.
- Antal beboere.
- Antal arbejdspladser.

Den biltrafik der findes i et område består af 2 typer ture:

1. Ture der er genereret lokalt i området enten af beboerne eller af arbejdspladserne. Disse ture starter i området og slutter enten i selve området, eller også fortsætter de gennem andre områder, hvor de vil påtræde som gennemkørende trafik. I Flademodellen er det kun den del af turene, der foregår i det aktuelle område, der knyttes til dette område.
2. Ture der hverken har start punkt eller slut punkt i et aktuelt område. Disse ture vil optræde som gennemkørende trafik i det pågældende område.

Grundideen er at undersøge, om det er muligt ud fra kendskabet til antallet af beboere og arbejdspladser i et område at sige noget kvalificeret om områdets samlede trafikarbejde. For så vidt angår de lokalt genererede ture (type 1) burde der være en sammenhæng. Når de

gennemkørende ture (type 2) medtages, er det ikke umiddelbart klart hvordan tingene hænger sammen. Der er anvendt 2 statistiske metoder for at analysere de forskellige sammenhænge. Det drejer sig om analyse af korrelationskoefficienter og lineær regressionsanalyse.

## 5. Hypoteser

Der defineret et anvendelsesmål, som dækker over en sammensætning af antal beboere og antal arbejdspladser i hvert område. Der er opstillet følgende hypoteser for sammenhængen mellem anvendelsen og trafikarbejde (samt emissioner og energiforbrug):

- A. Det samlede trafikarbejde er lineært afhængigt af anvendelsen (der er en kombination af antal arbejdspladser og antal beboere). Hypotesen dækker over en antagelse om, at den gennemkørende trafik i et område på en eller anden måde er korreleret med hvor mange aktiviteter i form af beboere og arbejdspladser, der findes i det pågældende område.
- B. Det samlede trafikarbejde excl. trafik på store veje er lineært afhængig af anvendelsen. Hypotesen dækker over, at der på de store veje er megen gennemkørende trafik, der er de enkelte områder og deres anvendelse uvedkommende, og som derfor ødelægger sammenhængen mellem anvendelse af området og trafikarbejdet.
- C. Trafikarbejdet er ikke lineært afhængig af anvendelsen idet tætheden i de enkelte områder (antal anvendelser pr. arealenhed) har betydning. Jo større tæthed, des mindre trafik pr. anvendelse. Hypotesen dækker over, at der måske er forskelligt trafikarbejde pr. anvendelse afhængig af hvor tæt byen er. Biltilgængeligheden er dårligere, den kollektive trafik er bedre og afstandene er generelt mere cykelvenlige i de tætte dele af byen. Derfor er det er logisk, hvis mængden af vejtrafik (antal km pr. anvendelse) er forskellige, afhængig af hvor tæt byen er.

Hypotese A og B har tilsammen resulteret i 6 hovedanalyser, der hver består af 6 lineære regressionsanalyser (trafik, 4 forskellige emissioner og energiforbrug) med de 2 variable. Disse variable er antal arbejdspladser og antal beboere, som sammensættes til et mål for anvendelsen. Hypotese C efterprøvet ved 2 hovedanalyser.

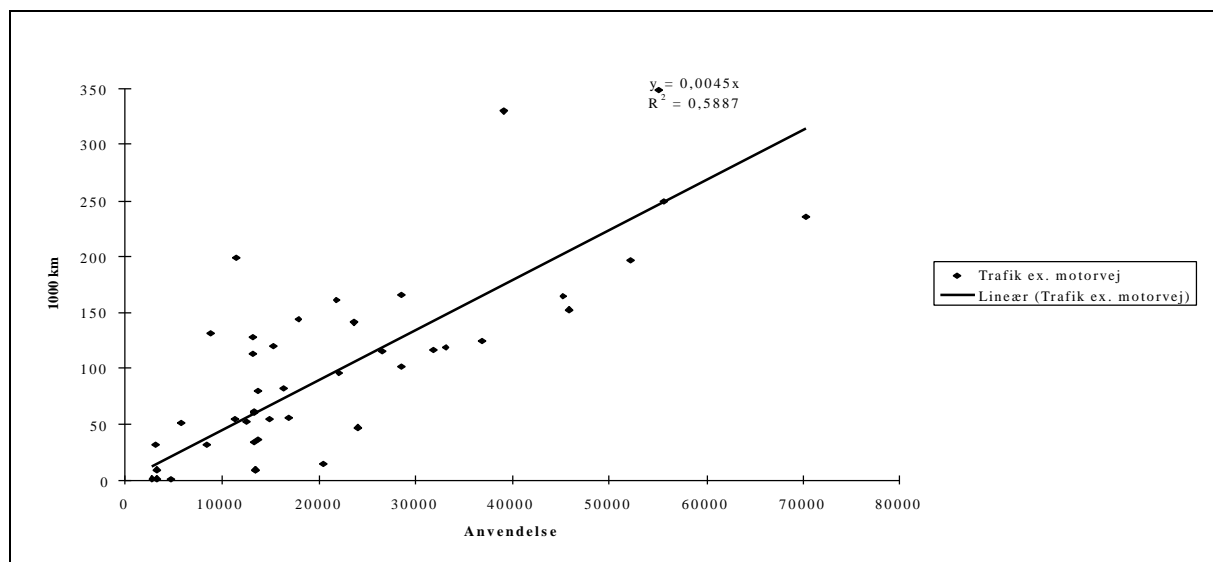
Der foretages lineær regression mellem det samlede trafikarbejde excl. motorveje og anvendelsen. Regressionsanalyserne giver følgende resultater, som fremgår af tabel 2.

	R <sup>2</sup>	Beboere	Arbejdspladser
Trafik	0,59	61%	39%
HC	0,60	59%	41%
NOx	0,58	61%	39%
CO	0,60	58%	42%
Partik.	0,58	61%	39%
Energi	0,59	60%	40%
Middel		60%	40%
Mål		1	0,67

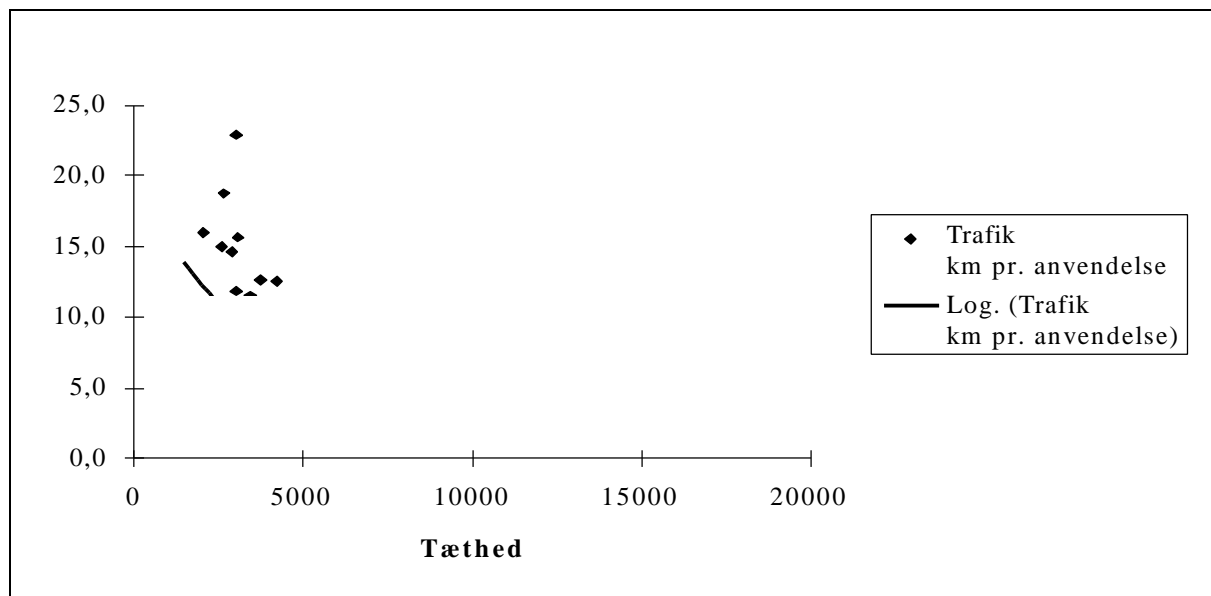
Tabel 2 Resultater af regressionsanalyserne.

Sammenhængen mellem antal beboere og arbejdspladser samt trafikarbejde, emissioner og energiforbrug excl. motorvejene er temmelig god med relativt høje  $R^2$  værdier omkring 0,60.  $R^2$  værdien varierer kun mellem 0,58 og 0,60 og de er dermed stort set ens i alle analyserne, som dermed alle er nogenlunde lige gode.

Resultatet viser, at beboerne i gennemsnit forklarer 60 % af trafikarbejdet, emissioner og energiforbrug, mens arbejdspladserne forklarer 40 %. Dette forhold er nogenlunde det samme for de 6 uafhængige variable. På baggrund af dette defineres et anvendelsesmål, hvor hver beboer tæller en, og hvor hver arbejdsplads tæller 0,67. Figur 2 herunder viser sammenhængen mellem anvendelsesmålet og trafikarbejdet.



Figur 2 Regressionsanalyse mellem anvendelse (beboer tæller en og arbejdspladser tæller 0,67) og samlet trafikarbejde (angivet i 1000 km pr hverdagsdøgn) for hvert område (størrelse 2 gange 2 kilometer) når trafikken på motorvejene er udtaget.



Figur 3 viser sammenhængen mellem trafikarbejde pr. anvendelse og tæthed i det tilfælde hvor al trafikken er medtaget (også motorveje). Sammenhængen er tydeligvis ikke lineær, og der opnås ikke specielt gode resultater ved at indlægge en logaritmisk tendenslinie, da  $R^2$  værdien kun er 0,31. Figuren viser generelt, at der er en tendens til at trafikarbejdet pr. anvendelse falder, jo tættere et område er.

## 6. Konklusion på hypoteser

De mange analyser for at vurdere 3 hypoteser viste:

- At der er en meget god lineær sammenhæng mellem samlet trafikarbejde og emissioner samt energiforbrug.
- At det samlede trafikarbejde i hvert område er liniært afhængigt med områdets anvendelse, udtrykt som et antal anvendelsesenheder, der består af en speciel sammensætning af antal beboere og arbejdspladser.
- At der er en tendens til at de overordnede veje med megen gennemkørende trafik svækker sammenhængen mellem anvendelse og trafikarbejde.
- At sammenhængen er rimelig god for områder med en vis koncentration af anvendelsesenheder. Derimod er sammenhængen meget dårlig for områder med lille koncentration af anvendelsesenheder.

På grundlag af resultaterne konkluderes det, at det er muligt at opstille en overslagsmetode. Metoden opstilles på baggrund af følgende forudsætninger:

- Trafikken på motorveje skal behandles selvstændigt, da denne trafik reducerer sammenhængen mellem anvendelse og trafikarbejde. Dette resulterer i et anvendelses mål hvor en beboer tæller en anvendelsesenhed og en arbejdsplads tæller 0,67 anvendelsesenheder.

- Modellen kan anvendes når koncentrationen af anvendelsesenheder er over 3400 pr. kvadratkilometer. Ved mindre koncentrationer bliver usikkerheden på modellens resultater relativt stor. Det betyder at modellen kun kan anvendes af byer af en vis størrelse og tæthed. Om modellen bør anvendes for en by, kan kontrolleres ved at beregne antallet af anvendelsesenheder pr. kvadratkilometer for byen. Ligger dette tal væsentligt under 3400, bør modellen ikke anvendes.
- Modellen beregner de emissioner, der udsendes og den energi, der forbruges inden for det geografiske område (en by) hvor modellen anvendes. Modellen beregner ikke det, der emitteres, når biler forlader byen, for at køre til mål uden for byen. Vejnettet uden for byen er således ikke omfattet af modellen.
- Modellen kan kun bruges i områder, der ligger i bymæssig bebyggelse.
- Modellen giver emissioner, der relaterer sig til gennemsnitlige emissionsfaktorer, som de var i 1993. Det er især andelen af katalysatorbiler der er betydningsfuld for dette. Dette kan dog ændres.

Modellen ser således ud:

- Samlet emission i et hverdags døgn = emission by + emission motorveje.
- Emission by = antal beboere x emission beboer + antal arbejdspladser x emission arbejdsplads.
- Emission motorveje = samlet motorvejslængde x årsdøgntrafik motorvej x emission motorvej.

Emissionskoefficienter for beboere samt arbejdspladser fremgår af tabel 3 og emissionskoefficienter for motorvej fremgår af tabel 4.

	Koefficient	Enhed	Koefficient	Enhed
Trafik	4,5	km pr. beboer	3	km pr. arbejdsplads
HC	5,5	g pr. beboer	3,7	g pr. arbejdsplads
NO <sub>x</sub>	9,5	g pr. beboer	6,3	g pr. arbejdsplads
CO	77,5	g pr. beboer	51,7	g pr. arbejdsplads
CO <sub>2</sub>	1110	g pr. beboer	737	g pr. arbejdsplads
Partikel	0,3	g pr. beboer	0,2	g pr. arbejdsplads
Energi	15,2	MJ pr. beboer	10,1	MJpr. arbejdsplads

*Tabel 3 Emissionsfaktorer for beboere og arbejdspladser samt energiforbrug og trafikarbejde (Trafik) i 1993 (32 % af benzindrevne personbiler har katalysator).*

	Faktor	Enhed
HC	0,6	g/km



NO <sub>x</sub>	2,8	g/km
CO	10,3	g/km
CO <sub>2</sub>	226	g/km
Partikler	0,1	g/km
Energi	3,1	g/km

*Tabel 4 Emissionsfaktorer for trafik på motorveje i 1993 (32 % af benzindrevne personbiler har katalysator).*

## **7. Referencer**

1. Byområders trafikskabte luftforurening - en overslagsmetode til emissionskortlægning. Vejdirektoratet. Rapport 43. 1996.
2. Køremønstre og luftforurening - i provinsen. Vejdatalaboratoriet, Vejdirektoratet. Rapport 105. 1992.
3. Koldstartsanalyse. Vejplanområdet. Trafiksikkerhed og Miljø. Vejdirektoratet. Rapport 7. 1994.
4. Individual and Public Transportation - Emissions and Energy Consumption Models. Spencer C. Sorensen and Jesper Schramm. Laboratoriet for Energiteknik, DTU. 1992. Rapport RE 91-5.