

# Kørselsafgifter i København - trafikmodelberegninger og trafikale effekter

Jeppe Rich, Lektor, Ph.D.

Centre for Trafik og Transport (CTT), Danmarks Tekniske Universitet (DTU)

Bygning 115, st.tv. Bygningstorvet, 2800 Lyngby

Email: [jhr@ctt.dtu.dk](mailto:jhr@ctt.dtu.dk)

Otto Anker Nielsen, Professor, Ph.D.

Centre for Trafik og Transport (CTT), Danmarks Tekniske Universitet (DTU)

Bygning 115, st.tv. Bygningstorvet, 2800 Lyngby

Email: [oan@ctt.dtu.dk](mailto: oan@ctt.dtu.dk)

Uffe Nielsen, Seniorøkonom, Ph.D

Institut for Miljøvurdering

Gl. Kongevej 5. 1. sal, 1610 København V

Email: [uni@imv.dk](mailto: uni@imv.dk)

## Resumés

I artiklen gennemgås metoder og resultater fra et nyligt afsluttet projekt omhandlende indførelse af vejafgifter i København. Projektet er udarbejdet for Institut for Miljøvurdering (IMV) i samarbejde mellem IMV og Center for Trafik og Transport (CTT). For en uddybende gennemgang henvises til de to hovedrapporter, henholdsvis Wrang et al. (2006) og Rich & Nielsen (2006).

I samarbejde med – og for - Institut for Miljøvurdering, har CTT gennemført en række trafikmodelberegninger af kørselsafgifter i København. Forskellige tidligere projekter har belyst samme emne, eksempelvis har flere forskellige projekter (for Transportrådet, Trafikministeriet og Københavns Kommune) benyttet OTM (Ørestadstrafikmodellen) til belysning af konsekvenser af kørselsafgifter.

Nogle af begrænsningerne ved OTM er, at der ikke modelleres skift af rejsetidspunkt, samt at modellen er estimeret og kalibreret på tværsnit i tid og Stated Preference analyser, hvori der ikke var stor variation af omkostningsniveauet for bilture.

Det Københavnske AKTA-forsøg (Alternative Kørsels og Trængselsafgifter) målte en række bilisters adfærdsændringer som følge af kørselsafgifter ved hjælp af GPS og forskellige interviewundersøgelser. Mens OTM er baseret på interview om en enkelt tur, og stated preference analyser, hvor udgiften til turen ændres forholdsvist marginalt (f.eks. en marginal udgift på 70 øre per km +/- 50%), blev bilisterne i AKTA udsat for markante omkostningsstigninger (op til 5 kr./km) over længere tidsrum end en enkelt tur (10-12 uger). Derfor kunne man forvente en større elasticitet/prisfølsomhed, idet visse af bilisternes

budgetrestriktioner måske blev nået. Derudover var der tale om ”rigtige” penge i AKTA og ikke kun hypotetiske spørgsmål. Den større effekt er blandt andet bekræftet i et tidligere indlæg ved trafikdagene af Nielsen og Vuk (2003).

Imidlertid har AKTA-data også en række begrænsninger, først og fremmest, at forsøgsgruppen var så lille, at forsøget ikke havde indflydelse på trængslen i Hovedstadsområdet, og derudover at bilernes GPS alene målte ændringen af bilture. Således kunne det ikke fastlægges, om der var tale om aflyste ture eller skift af transportmiddel.

I IMV-projektet blev der opstillet en ny trafikmodel baseret på OTM-beregnete elasticiteter og AKTA data. Herved blev styrker ved de to kilder kombineret og ulemper reduceret.

## **Introduktion**

Hovedfokus i trafikmodeldelen af IMV-projektet var at analysere hvordan rejsende i København ændrer adfærd som følge af indførelsen af forskellige vejafgiftssystemer, samt hvilke afledte trafikale effekter det giver anledning til.

De adfærdsmæssige konsekvenser omfatter ændringer i det totale antal ture en person foretager, hvor turene går hen, hvornår på dagen de foretages, hvilket transportmiddel, der benyttes, samt hvilken rute, der følges.

De afledte trafikale effekter dækker over køretid og trængsel, netværkseffekter (omvejskørsel), uheld, støj, emissioner, lokal luftforurening samt drift- og vedligehold af trafikanlæg.

Artiklen skal ses i sammenhæng med to andre artikler ved årets Trafikdage, nemlig Nielsen, Nielsen og Rich (2006) som helt parallelt præsenterer en samfundsøkonomisk analyse af de analyserede systemer, samt Nielsen, Rich og Nielsen (2006), som præsenterer systemdesign og mulige anvendelser af provenuet fra vejafgifter. For en mere grundig gennemgang af trafikmodellen og beregningerne henvises til projektets hovedrapport, Rich & Nielsen (2006).

## ***Baggrund og formål***

I Danmark og i den vestlige verden generelt er der en tendens til at have givet op overfor trængsel. Udbygning af vejnettet kræver store investeringer og i tætte byområder er det ofte ikke muligt af økonomiske, arealmæssige og politiske grunde. Alternativet – at forbedre den kollektive transport - kræver voldsomme investeringer, og erfaringsvist flytter det selv da kun få bilister. Det er derfor svært at investere sig ud af trængselsproblemerne. En anden tilgang kan være at introducere større afgifter på privattransport for at reducere antallet af biler på vejene. Ingen af delene er indbydende for beslutningstagerne. Omvendt er der et voksende ønske blandt befolkningen om mere moderne offentlig transport, mindre trafik i byerne og bedre fremkommelighed.

For på den baggrund bedre at kunne analysere mulighederne for vejafgifter i Københavnsområdet blev der i projektet opstillet en trafikmodel, som sammen med modeller for eksterne effekter, kunne give både direkte trafikale effekter (trængsel og transport arbejde) samt indirekte effekter (luftforurening, uheld og støj). Modellen var delvist nyudviklet for at kunne inddrage effekter, der ikke beskrives af eksisterende modeller (f.eks. Ørestadstrafikmodellen) – herunder i særlig grad ændring af turtidspunkt – samt for at modellen kunne bygge på elasticiteter og rutevalgsparmetre fra AKTA kørselsafgifter forsøget (Nielsen, 2004), og trængselsdata fra trængselsprojektet (Nielsen m.fl., 2004a & b).

Trafikmodellen er implementeret for 2004, 2015 samt 2015 med tilbageførsel af provenu til trafiksektoren. Tilbageførslen er både til kollektive trafik og vejtrafik. I det følgende ses udelukkende på førstnævnte modelkørsel og der henvises til Rich et. al. (2006) for en præsentation af sidstnævnte modelkørsel og Wrang & Nielsen (2006) for en mere detaljeret gennemgang af tilbageførselsproblematikken.

### ***De analyserede systemer***

I 2005 pågik parallelt med IMV-projektet et analysearbejde for Københavns kommune (KK-projektet). Kommissoriet for denne arbejdsgruppe (under deltagelse af CTT og Tetraplan) var at iværksætte en førstehåndsscreening af mulige løsninger for vejafgifter i Københavnsområdet. IMV projektet, som blev afsluttet primo april, 2006 ligger således i naturlig forlængelse heraf.

I KK-projektet blev OTM-modellen anvendt til at regne på 12 scenarier. Disse er vist nedenfor i Tabel 1. De mørkegrå rækker indikerer de modeller der er regnet på i projektet for IMV og beskrives i denne artikel.

**Tabel 1: Afprøvede systemer i KK projektet. Mørke rækker angiver IMV-projektets systemer.**

|                           | Ring                    | Taksering | Betalings<br>Teknologi | Myldretids-<br>afgift | Køretøjs-<br>differen-<br>tiering |
|---------------------------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1. H                      | Lille                   | Bomring   | DSRC                   | Nej                   | Nej                               |
| 2. H+M                    | Lille                   | Bomring   | DSRC                   | Ja, morgen            | Nej                               |
|                           | Lille                   | Bomring   | DSRC                   | Ja                    | Ja                                |
| 3. H + K                  | Lille                   | Bomring   | DSRC                   | Nej                   | Ja                                |
| 4. H+ høj                 | Lille                   | Bomring   | DSRC                   | Ja                    | Nej                               |
| 5. H+lav                  | Lille                   | Bomring   | DSRC                   | Nej                   | Nej                               |
| 6. Område                 | Lille                   | Område    | Selv-rapportering      | Nej                   | Ja                                |
| 7. km-takst               | Lille                   | Km-takst  | Speedometer/<br>GSM    | Ja                    | Nej                               |
| 8. Stor ring              | Stor                    | Bomring   | DSRC                   | Nej                   | Nej                               |
|                           | Stor                    | Bomring   | DSRC                   | Ja                    | Ja                                |
| 9. 2 ringe                | Lille +<br>stor         | Bomringe  | DSRC                   | Nej                   | Nej                               |
| 10. 3 ringe               | Lille +<br>stor +<br>M3 | Bomringe  | DSRC                   | Nej                   | Nej                               |
| 11. AKTA høj<br>km afgift | 11<br>zoner             | Km-takst  | GPS/GSM                | Ja                    | Ja                                |
| 12. AKTA<br>zoneafgift    | 11<br>zoner             | bomringe  | GPS/GSM                | Ja                    | Ja                                |

DSRC = Digital Short Range Communication og GPS = General Positioning System.

Som det ses, er de to bompengesystemer i IMV-projektet ganske tæt på scenario ”2.H+M” og ”8. Stor ring” i KK-projektet, med den undtagelse at der er indført myldretidsdifferentiering og køretøjsdifferentiering. Argumenterne herfor er, at det i så vidt omfang blev ønsket at taksere efter de marginale eksterne omkostninger, som trafikanterne påfører samfundet.<sup>1</sup> Disse er for alle biler højest i myldretiden på grund af trængsel. For lastbiler skyldes den højere betaling, at der var en ønske om at internalisere de beviselige ekstra eksterne omkostninger, som disse påfører i kraft af emissioner, uheld, drift- og vedligehold m.m. (Trafikministeriet, 2003).

Beregningerne for disse 12 afgiftssystemer blev i KK projektet gennemført med OTM modellen og blev anvendt til en indledende vurdering af de enkelte scenariers performance i forhold til forskellige målsætninger, herunder specielt trængsel, provenu og miljømæssige aspekter. Der har været klare synergier mellem dette projekt og nærværende IMV projekt. Eksempelvis har man i KK-projektet kunne eliminere scenarier, som ellers var planlagt i IMV-projektet. Dette drejer sig blandt andet om den kombinerede løsning af en lille og stor bompengering, som viste sig at skabe uhensigtsmæssig omvejskørsel. Den anden synergi er, at hvor KK-projektet havde fokus på den overordnede screening, så har IMV-projektet haft fokus på en mere omfattende beregning af de enkelte scenarier. Dette omfatter såvel modellering af flere trafikale effekter som hele den samfundsøkonomiske analyse, der ikke har været gennemført i de tidligere projekter.

I projektet blev der regnet på en km.-takst model, en zonetakst model, en lille bompengering samt en stor bompengering (se Nielsen, Rich & Nielsen 2006).

## **Trafikmodel**

I det følgende afsnit skitseres hvorledes de forskellige scenarieforløb er gennemregnet. De primære værktøjer til scenarieberegningen er dels OTM kørsler, dels bearbejdede AKTA data og dels rutevalgsmødel, herunder både for kollektiv trafik og biler.

### ***Hovedmodelstruktur***

De fem hovedkomponenter i det, der kan kaldes en ”modelstruktur”, er nævnt nedenfor;

1. Basismatricer (OTM 2004 og OTM 2015).
2. En elasticitetstabel (2004) der definerer relationen mellem vejafgifter og efterspørgsel uden trængsel. Dvs. en model der for hvert af de udvalgte takstscenarier bestemmer efterspørgselsændringer på OD matriceniveau, herunder både direkte effekter og substitution mellem transportmidler og tidsperioder, samt destinationer. Størrelsen af

---

<sup>1</sup> Selvom IMV-projektet grundlæggende har anvendt fire af de samme scenarier som i KK-projektet, er der dog anvendt ændrede takster for passage af bomgrænse, netop for i højere grad at tilnærme taksterne de marginale eksterne omkostninger.

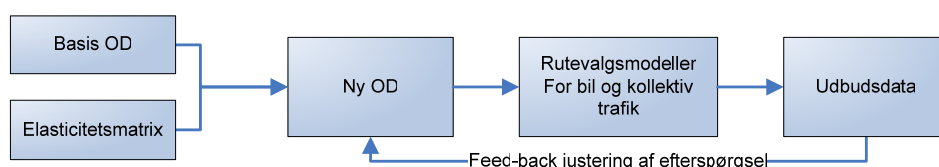
effekterne er forskellige for forskellige turformål. Disse antages at være uafhængige af hinanden, da det ikke er oplagt at udskifte en fritidstur med en erhvervstur.

3. Et modul som justerer efterspørgsel i forhold til den ændrede trængsel (reduceret rejsetid) som resultat af indførelsen af vejafgifter (transportmiddel, tidspunkt på dagen, destinationsvalg).
4. Et efterspørgselsmodul, som på basis af nye udbudsdata for kollektiv trafik (anvendes i forbindelse med tilbageførselsscenarierne) bestemmer ændringerne i efterspørgslen, herunder både direkte effekter og substitution mellem transportmidler. Vi anvender her substitutionsmønstret fra OTM og udbudsdata som produceret af rutevalgsmodellerne.
5. Rutevalgsmodeller som fordeler trafik på vejnettet og på kollektiv trafik.

### Scenarieberegninger

I et scenarium uden tilbageførsel gennemføres beregningen i 3 trin, som illustreret i Figur 1 nedenfor. Først beregnes en ny OD matrix som produktet af en basis OD matrix og en fuld elasticitetstabel (inklusive alle substitutioner). Herefter køres rutevalgsmodellen, som genererer nye udbudsdata. De nye udbudsdata, sammenholdes med udbudsdata for en basiskørsel. Ved at gange tidselasticiteter på differensen (sker i feedback justeringen) fås en efterspørgselsjustering.

**Figur 1: Dataflow i trafikmodellen.**



I feedback justeringen tages der således højde for at faldende efterspørgsel giver anledning til mindre trængsel og dermed hurtigere rejsetid. Dette virker ind på efterspørgslen som justeres med elasticiteter for rejsetidsforbedringerne. I feedback justeringen sammenlignes således en udbudsmatrix for basis-situationen og efter indførelse af vejafgifter. Justeringen er relativ lille, og der køres kun én iteration.

For en modelkørsel med tilbageførsler til den kollektive trafik eller til forbedringer i vejnettet er der udover effekten fra vejafgifterne en direkte effekt fra disse forbedringer. Dette gøres ved at køre tre trin.

1. Figur 1 ovenfor.
2. Herved fås et ligevægtsudbud for hver situation. Differensen i udbuddet for de to situationer giver nu anledning til en efterspørgselsændring ved at sammenholde forskellen i udbuddet med en elasticitetsmatrix for rejsetid.
3. For den nye OD matrix køres nu et nyt udbud uden feedback.

Langt det vigtigste element i modelprocessen i forhold til provenu, fordeling, og trængsel er det første trin hvor basisefterspørgslen fastlægges for de forskellige scenarier. Det skyldes primært, at feedback effekterne er relativt beskedne og i gennemsnit ændres kun ca. 2 % af basisefterspørgslen i det andet trin.

I modellen er basis 2004 og 2015 taget fra OTM. Den umiddelbare fordel er, at beregningerne bliver sammenlignelige med hvad der tidligere er præsenteret.

## **Fordeling af efterspørgsel på vejnettet**

Fordelingen på vejnettet sker ved at køre en rutevalgsmodel. Modellen, som er udviklet på CTT, er sat op til at køre efterspørgselsmatricer med strukturen fra OTM (618 zoner) med de afgifter, de enkelte eksperimenter påfører. Rejsetider tilbageføres til efterspørgselsmodellen, som afleder en ny efterspørgsel, der igen giver nye udbudsdata.

Oprindeligt indeholdt projektet en re-estimation af rutevalgsmodellen ved at anvende observeret rutevalgsadfærd fra AKTA. Dette krævede som et vigtigt element at rutealternativer for de enkelte individer blev samlet i valgsæt som kunne anvendes i en diskret valgmodel. Der blev dog konstateret fejl i den software som udfører samplingen, hvorfor denne del af projektet måtte udskydes til efter IMV projektets deadline. Som alternativ blev følgende fremgangsmåde;

1. Estimation af fordelte tidskomponenter baseret på et mindre AKTA sample bestående af 84 observerede bilisters adfærd. Hver bilist havde kørt mellem 150 og 1000 ture. Individuelle tidsværdier blev fundet ved at midle over turene. Dette klarlagde fordelingstype af tidsværdierne (logaritmisk normalfordeling), varians heraf i forhold til middelværdi (og heraf afledt parametrisering), trængselstidsværdi (logaritmiske normalfordelt), samt korrelation mellem tidsværdier for fri køretid og trængsel.
2. Skalering af niveauet af middelværdier for tidsværdier i forhold til kendte undersøgelser Nielsen & Vuk (2003). Dette var nødvendigt for at kunne skelne mellem fritidsture og pendling. Derudover blev samme fordelingstyper antaget at gælde for erhvervsture, varebiler og lastbiler, Nielsen m.fl. (2002).
3. Implementering af ny nyttefunktion i rutevalgssoftware (Rapidis og CTT har i fællesskab forestået dette).
4. Kalibrering af rutevalg mod observerede AKTA hastigheder fra trængselsprojektet (primært kalibrering af speed-flow parametre).

Fordelen ved den nye model er, at den afspejler målt adfærd fra AKTA data, og derfor bedre beskriver bilisters præferencer og heterogenitet heraf. Derudover afspejler modellen målte hastigheder og trængsel, og har derfor en mindre undervurdering af trængsel end OTM. Ulempen ved modellen er, at den ikke eksplicit modellerer krydsforsinkelser, idet en validering af krydsforsinkelsesmodeller var uden for projektets økonomiske rammer.

Vejvalgsmodellen blev oprindeligt udviklet af Nielsen og Frederiksen (1998) som en ny flerklasse vejvalgsmodel, til forbedring af Ørestadstrafikmodellen (OTM). Som en del af Havnetunnelprojektet i København for Trafikministeriet blev denne model videreudviklet både teoretisk og i praksis. Derudover blev den estimeret ud fra grundige RP- og SP-analyser, hvor den før kun var kalibreret mod tællinger (Nielsen m.fl. 2002).

Vejvalgsmodellen beskriver flere klasser af biler (forskellige turformål), varebiler og lastbiler, der hver for sig har forskellige nyttefunktioner. Derudover lægges busser ud på vejnettet efter køreplanen vha. en såkaldt pre-load. De forskellige klasser og typer af køretøjer påvirker alle hastigheden på strækningerne, se Nielsen & Frederiksen (1998).

### ***Samplede rutealternativer på basis af AKTA***

I et eksamensprojekt ved CTT, Menegazzo (2003) blev der samlet en række rutealternativer for hver bilists tur. Disse kunne benyttes til at finde et muligt interval for tidsværdier for fri køretid og trængsel for den pågældende tur. De enkelte værdier blev da vægtet efter sandsynlighed. For hver bil blev samme procedure fulgt for alle ture, hvilket i princippet gav en empirisk statistisk tidsværdifordeling for den pågældende bilist.

Ved at sammenligne middelværdier over biler kunne der tilsvarende findes en tidsværdifordeling over biler.

Resultatet af dette arbejde var, at de empiriske tidsværdier for fri køretid og trængsel tilnærmelsesvist kunne tilnærmes med en logaritmisk normalfordeling. Værdien for trængsel var altid højere end fri køretid, og korreleret hermed. Forholdet mellem de to var også logaritmisk normalfordelt. Modellerne og resultaterne beskrives nærmere i Nielsen og Vuk (2003), samt Nielsen (2004).

Problemet med AKTA-modellerne var imidlertid, at bilerne dels ikke nødvendigvis var repræsentative for befolkningen, dels at turene primært dækkede pendling og fritid med en fordeling, der kun delvist kunne fastlægges. Derudover dækkede data ikke erhvervsture, samt vare- og lastbiler. Endelig var det biler der blev observeret ikke personer – men den enkelte bil kan i princippet have forskellige førere med forskellige præferencer, f.eks. mand og kone.

### ***Benyttede nyttefunktion***

Rutevalgsmodellen i nærværende projekt bygger på en stokastisk nytteteoretisk model. Den implementerede nyttefunktion ser ud som følger

$$(1) \quad U = \beta_l \cdot k \cdot l + \beta_c \cdot \beta_l \cdot c + \beta_{road} \cdot \beta_{free} \cdot (t_{free} + \beta_{con} \cdot t_{con}) + \varepsilon$$

$\beta_l$  er en parameter for de normale kørselsomkostninger såsom benzin og slitage m.m.  $\beta_l$  antages at være proportional til rejselængden  $l$  med en faktor  $k$ . I det følgende antages  $k$  at være 0,7 DKK/km.  $\beta_l$  antages at være deterministisk, da tidsværdien, så kan udledes på simple vis som forholdet mellem parameters for tid sammenholdt med parameteren for omkostninger. Ydermere antages  $\beta_l = 1$ . Funktionen er således direkte i monetære værdier, det såkaldte VTTS (Value of Travel Time Savings).

$\beta_c$  er en parameteren for den ekstra rejseomkostning relativt til  $\beta_l$ , som folk med bil betaler gennem vejafgifter  $c$ . Vi antager at  $\beta_c = 1$ . Dette valg er delvist begrundet med resultater fra Nielsen og Vuk (2003). Det vil sige, at det antages, at værdien af penge er den samme, hvad enten der er tale om, at der betales til sædvanlige variable kørselsomkostninger (benzin, mv.) eller kørselsafgifter.

$\beta_{free}$  er parameteren for den frie køretid,  $t_{free}$ . Fordelingen heraf er estimeret ud fra AKTA data og er logaritmisk normalfordelt.

$\beta_{con}$  er den ekstra tidsværdi som skyldes trængsel relativt til  $\beta_{free}$ . Denne parameter er baseret på AKTA og antaget at være logaritmisk normal fordelt.  $\beta_{con}$  er beregnet ud fra  $(1 + \ln(\mu, \sigma^2))$  i.e.  $\log(\beta_{con} - 1) = N(\mu, \sigma^2)$ . Ideen med denne formulering er, at produktet af  $\beta_{free}$  og  $\beta_{con}$  også er logaritmisk. Herved følger den samlede tidsværdi denne fordeling, og det var samtidigt muligt at specificere korrelation mellem tidsværdi for fri køretid og trængsel på en simpel måde, der let kunne implementeres i den benyttede software.

$\beta_{road}$  er en vejtype specifik korrektion som er normeret til 1 for motorveje og som antager en værdi større end 1 for andre vejtyper. Parameteren kan opfattes som en adfærdsparameter for bløde faktorer som kendskab til vejnettet, komfort, etc., som ikke er beskrevet af hastighed alene.  $\beta_{road}$  antages at være fast i det følgende (altså ikke at følge en statistisk fordeling).

### ***Skalering af nyttefunktioner til brug for modelberegninger***

I projektet skelnes mellem 5 segmenter: bolig-arbejde, erhverv, andre ture samt erhvervsture for lastbiler og varebiler.

Til etablering af tidsværdierne er følgende fremgangsmåde anvendt. I første omgang kendes den gennemsnitlige tidsværdi for formål bolig-arbejde og andre tilsammen (skaleret i forhold til hinanden med det relative forhold fra Havnetunnelprojektet). Fra AKTA beregnedes forholdet mellem tidsværdi for fri køretid for bolig-arbejde og andre til 1,55. Sammen med viden om at ca. 30 % af turene er bolig-arbejde, kan tidsværdien for formålene for bolig-arbejde og andre beregnes ved en proportionalitetsbetragtning.



Ud fra forholdene fra Havnetunnelprojektet beregnes dernæst de resterende turformål segmenter, og forhold mellem fri køretid og trængsel for hvert segment.

Disse benyttes som middelværdier, mens fordelingstype, varians af hver, samt korrelation mellem fordelinger af tidsværdi for fri køretid og trængsel antages at være de empiriske fra AKTA. Men som sagt skaleret relativt i forhold til turformål som i Havnetunnelprojektet.

### **Kalibrering af vejvalgsmodellen**

Vejvalgsmodellen lægger trafikken ud på et vejnet, der af CTT er etableret ud fra KRAKS' geodatabase kombineret med attributdata herfra, OTM og tidligere modeller fra CTT. Dette definerer vejtyper, skilte hastigheder, kapacitet og antal kørespor for de enkelte veje. I trængselsprojektet, Nielsen et.al (2004) blev der målt frie hastigheder samt trængselshastigheder i forskellige tidsperioder for den enkelte vejstrækning. Disse blev dels benyttet til validering af modellens data, dels til estimation af matematiske funktioner for sammenhængen mellem rejsetid og trafikmængde.

Relationen mellem rejsetid og trafikmængde er i modellen beskrevet ved følgende funktion;

$$(2) \quad t = \begin{cases} t_{free} \left( 1 + \alpha \left( \frac{T + \gamma T_{opposite}}{T_{Cap}} \right)^\beta \right) & , (T + \gamma T_{opposite}) < T_{Cap} \\ t_{queue} & , (T + \gamma T_{opposite}) \geq T_{Cap} \end{cases}$$

I forhold til standardformen i mange modeller – den såkaldte BPR-formel<sup>2</sup> - er der to primære ændringer. Dels opereres der med en køhastighed, som træder i kraft, når kapacitetsgrænsen overskrides, dvs. når  $\frac{T + \gamma T_{opposite}}{T_{Cap}} > 1$ . Dernæst er det antaget det, at modkørende trafik har indflydelse på trafikafviklingen for 2-sporede veje. Dette kan observeres empirisk.

$\alpha$ ,  $\beta$  og  $\gamma$  parametrene blev kalibreret i en iterativ proces, hvor AKTA hastighedsmålinger blev anvendt til at estimere funktionen for hver vejtype med et tilstrækkeligt empirisk datagrundlag, hvorefter rutevalget, hastigheder og trafikmængder blev valideret på netniveau. Grunden til denne tilgang er dels, at der ikke var tilstrækkeligt med observationer til en statistisk estimation for alle vejtyper, dels at der ved kørsler med rutevalgsmodellen blev fundet diverse fejl i datagrundlaget (data vedrørende strækninger, digitalisering, zoneophæng, etc.). Omkring 20 iterationer i arbejdsprocessen blev gennemført.

Det er værd at bemærke at denne parametrisering er noget forskellig fra den tidligere anvendte i OTM. En af konsekvenserne af at indføre en køhastighed er, at meget af den trængselseffekt, man tidligere observerede, flyttes ”til højre” på speed-flow kurven. Vi

<sup>2</sup> US Bureau of Public Roads.

kommer således aldrig ud i det eksponentielt voksende trængselsregime hvilket gør en forskel i forhold til  $\alpha$  og  $\beta$  parameteriseringen.

Et meget positivt resultat af re-estimeringen af speed-flow sammenhængen efter de observerede hastigheder fra trængselsprojektet var, at de vejtypeafhængige adfærdskorrektioner i CTT-modellen ikke mere var signifikante. Med andre ord er forklaringen flyttet ind i BBR relationen, hvilket er en stor styrke i forhold til tidligere, hvor dårlige beskrivelser af speed-flow afhængigheden kompenseredes af vejtypeafhængige korrektionsfaktorer, der fejlagtigt kunne fortolkes adfærdsmæssigt.

I forhold til OTM giver ovennævnte værdier større trængsel på vejnettet. Dog giver modellen stadig mindre trængsel end målt i trængselsprojektet, hvilket skyldes at der er tale om en statisk model, der ikke modellerer kødannelse og tilbagestuvning af trafik i forbindelse hermed. Egentlig modellering af krydsforsinkelser indgår ikke, om end de implicit beskrives via de målte frie hastigheder i kryds jf. ovenstående formel.

I trængselsprojektet, Nielsen og Landex (2004), blev det konstateret, at OTM kraftigt undervurderede trængsel i vejnettet. Dette problem er således delvist – om end bestemt ikke fuldt ud - løst med den anvendte model ovenfor.

Alt i alt lykkedes det således at kalibrere modellen, således at den bortset fra tilfældig statistisk variation passede godt med de målte trafikmængder på vejnettet, samtidigt med at den på en tilfredsstillende måde beskriver trængsel i nettet.

## **Rutevalgsmodel for kollektiv trafik**

Den kollektive trafik blev fordelt på nettet ved hjælp af en ny rutevalgsmodel. Formålet med dette var primært at kunne opnå en mere detaljeret beregning af tilbageførselsscenerierne, hvor en del af provenuet benyttes til nye projekter for kollektiv trafik. De væsentligste karakteristika for den kollektive rutevalgsmodel er;

1. Modellen er køreplansbaseret, hvorved de eksakte køreplaner og korrespondancer indgår.
2. Der beregnes en række forskellige alternative ruter (proportionalt med antal iterationer). Dette er en fordel i forhold til f.eks. OTM, der alene beregner to ruter. Modellen fordeler dernæst trafikken, således at der tages hensyn til evt. korrelation (overlap) mellem ruter.
3. Modellen er nyttebaseret og bygger på de nyttefunktioner for forskellige turformål, der blev estimeret i Nielsen (2000).
4. Modellen er optimeret mht. regnetid som beskrevet i Nielsen og Frederiksen (2006).

## **Baggrund**

I 1997 gennemgik Camilla Riff Brems ved Trafikdagene resultater fra rutevalgsmodeller i en række ofte brugte softwarepakker, herunder TRIPS og EMME/2. Konklusionen af denne gennemgang var dels, at modellerne gav foruroligende forskellige resultater, dels at resultaterne skyldte adfærdsmæssige antagelser, der implicit er indbygget i algoritmerne. Nielsen (1998) præsenterede en model, der i langt højere grad kunne estimeres ud fra rejsevaneundersøgelser, og dermed imødegå ovennævnte problemer. Imidlertid var der på daværende tidspunkt ikke empiriske undersøgelser, ud fra hvilke modellen kunne estimeres.

I forbindelse med København-Ringsted Baneprojektet blev der i sommeren 1998 iværksat et større trafikmodelarbejde (Nielsen, et.al., 1999). Metodegrundlaget fra denne model er benyttet i nærværende projekt, om end selve løsningsalgoritmen er ny (Nielsen og Frederiksen (2006). Dette sikrer hurtigere regnetid og bedre konvergens. Softwaren er ligeledes nyprogrammeret

Modellen er probit-baseret som beskrevet i Nielsen (2000), hvorved overlap mellem ruter beskrives. Passagerers manglende viden om trafiknettet beskrives ligeledes af probitmodellen. Herunder benytter modellen den samlede køreplan benyttes i stedet for det tidligere frekvens-baserede princip. I nærværende projekt skete det ud fra data fra ”www.rejseplanen.dk”.

Rutevalgsmodellen har forskellige tidsværdier for forskellige turformål og del-transportmidler (togtyper og busser), adgangs tider, frekvens (skjult ventetid), samt vente-, skifte- og forsinkelsestider. Derudover rummer den koefficienter for siddeplads, antal skift samt omkostning. Forskelle i passagerers forskellige præferencer beskrives med fordelinger af koefficienterne i nyttefunktionerne, i modsætning til traditionelle modeller, der forudsætter samme præferencer for alle passagerer på nær tilfældige variationer.

## **Tidligere estimation af nyttefunktion**

Modellen bygger på et omfattende empirisk grundlag bestående af trafiktællinger, turmatricer, samt en række RP- og SP-analyser af passagerers og beboeres rejsevaner foretaget i forskellige transportmidler samt ved hjemmeinterview.

Modellen svarer til vejvalgsmodellen for bil hvad angår grundlæggende tilgang, idet den også er nyttebaseret, den har et fejldet der håndterer overlappende ruter, samt tillader fordelte tidskoefficienterne i modellen. Disse blev for den kollektive trafik estimeret ved en sekventiel estimationsprocedure (se Nielsen og Jovicic, 1999). Dette skete ved at benytte estimaterne fra omkostningsmodellen i et nyt estimationstrin, hvor nyttefunktionen blev estimeret som følger:

$$(3) \quad V_i = \beta_c \cdot c_i + (\beta_t + \gamma_t \cdot \xi) \cdot t_{gen}$$

Hvor  $\beta_t$  er en generaliseret tidskoefficient,  $\gamma_t$  variation relateret hertil (standard afvigelse af  $\beta_t$ ), og den generaliserede tid  $t_{gen}$  blev fundet ved:

$$(4) \quad t_{gen} = \beta_{bus} \cdot t_{bus} + \beta_{Stog} \cdot t_{Stog} + \beta_{Retog} \cdot t_{Retog} + \beta_{ICtog} \cdot t_{ICtog} + \beta_{adgang} \cdot t_{adgang} + \beta_{skjult\ vente} \cdot t_{skjult\ vente} + \beta_{vente / skifte} \cdot t_{vente / skifte} + \beta_{forsinkelse} \cdot t_{forsinkelse}$$

Hvor de første 4 elementer er køretider. Tog til Sverige kan såvel være regional- som IC/Lyntog. Adgangstid er den tid, det tager at komme til og fra det kollektive trafiksystem, mens den skjulte ventetid beskriver forskellen med det tidspunkt, en passager ønskede at ankomme, og den tid vedkommende faktisk ankom jvf. køreplanen.

Tidsværdierne blev først splittet mellem pendlere, studerende, erhvervs- og fritidsture. Men studerende og fritidsture blev samlet i ét segment, idet de stort set havde samme koefficienter. Såvel  $\beta_t$  som  $\gamma_t$  blev estimeret med høj signifikans for alle segmenter. Studerende og fritidsture viste sig imidlertid at have en ret høje tidsværdi samt vise lav signifikans. Fordelte omkostninger blev derfor foretrukket herfor. Tidsværdierne for pendlere og erhvervsture blev estimeret efter følgende fremgangsmåde:

- Koefficienten  $\beta_c$  for omkostninger blev estimeret i den generaliserede tidsmodel.
- Tidsværdien (jævnfør til den generaliserede definition i omkostningsmodellen) blev multipliceret med  $\beta_t$  koefficienten og skaleret (reduceret) til omkostningskoefficienten estimeret i den sidste model.
- Variationskoefficienten for tidsværdien blev udregnet ved at skalere  $\gamma_t$  til  $\beta_t$  koefficienten.

### ***Praktisk etablering af modellen***

I praksis blev modellen i nærværende etableret ved følgende fremgangsmåde;

1. Køreplaner for den kollektive trafik i Hovedstadsområdet blev importeret fra ”www.rejseplanen.dk”, idet der blev opnået aftale om kopiering af den bagvedliggende database. Koblingen til banenettet skete via stationsnumre. Linket til busnettet skete via stoppestedsgrupper, og deres koordinater (modtaget fra HUR).
2. Data blev georefereret via. links til KRAKS geodatabase, der blev autogenereret i ArcGIS. Ligeledes blev der her genereret skiftekanter mellem stoppestedsgrupper, så det i modellen f.eks. er muligt at skifte ved at gå fra Hovedbanegården til Rådhuspladsen.

3. Zonestrukturen (efterspørgslen) blev forbundet til det kollektive net via autogenererede zoneophæng, der efterfølgende blev valideret manuelt. Det blev her antaget at passagerer er villige til at gå længere til tog end til bus.
4. Modellen blev valideret mod tællinger i tognettet (DSB's østtælling) og HUR's tællebusdatabase. Sidstnævnte blev stillet til rådighed af HUR og linket til databasen via stoppestedsnumrene.
5. Modellen blev derefter valideret ved sammenligning af modelkørsler med tælledata, samt ved at se på, om rutebundter i nettet virkede rimelige.

## **Eksterne modeller**

Dette afsnit gennemgår de forskellige effektmodeller. Gennem effektmodellerne analyseres hvordan eksterne effekter så som støj, uheld, klima, lokal luft forurening samt drift- og vedligeholdelseskostninger påvirkes i de enkelte scenarier.

Effekterne inddeles overordnet i fem typer.

- Drift og vedligehold
- CO<sub>2</sub> emissioner
- Luftforurening
- Uheld
- Støj

Uheld regnes på linkniveau med en underopdeling i kryds og strækningsuheld. Yderligere opdeles uheld i personskadeuheld og uheld med materiel skade. Da prissætningen imidlertid er meget forskellig for graden af personskade har vi efterfølgende estimeret fordelingen på personskadesgrader ved at anvende en regional fordelingsnøgle der er baseret på dagens situation. Dette er nødvendigt for at tage højde for at der i København sker flere personskadesuheld, men mindre alvorlige.

Støj er beregnet i et traditionel GIS-baseret støjmodel (i ArcGIS). Der opereres med 5 decibel støjbuffer startende fra 55 decibel og sluttende ved 75 og derover. For hver støjbuffer laves en overlay analyse med bygningsmassen således at antal bygninger der eksponeres med en vis grad af støj kan beregnes. Herudfra kan der beregnes antal eksponerede personer.

## Trafikale effekter

### *Sammenligning af afgiftsniveauet for de forskellige systemer*

De forskellige afgiftssystemer adskiller sig primært på afgiftsniveauet, de geografiske områder de dækker, samt om der er tale om kilometerbaseret betaling eller betaling ved krydsning af grænser (bom-systemer). For basis 2004 er der i Tabel 3 nedenfor opgjort de gennemsnitlige kørselsomkostninger for bilister i systemet. Med andre ord har vi indregnet bilisternes ”ageren” efter indførsel af vejafgifter og set på de deraf afledte gennemsnitlige kilometeromkostninger.

**Tabel 3: Gennemsnits kilometerafgift fordelt på formål og system (vægtet i forhold til de samlede antal ture i Hovedstadsområdet), kroner pr. km.**

| Formål        | Myldretid | Km.-takst 2004 | Zonetakst | Stor bomring 2004 | Lille bomring 2004 |
|---------------|-----------|----------------|-----------|-------------------|--------------------|
| Bolig-Arbejde | ja        | 0,55           | 0,29      | 0,27              | 0,11               |
|               | nej       | 0,30           | 0,16      | 0,18              | 0,08               |
| Erhverv       | ja        | 0,75           | 0,38      | 0,36              | 0,19               |
|               | nej       | 0,37           | 0,19      | 0,22              | 0,13               |
| Lastbil       | ja        | 1,89           | 0,96      | 0,83              | 0,36               |
|               | nej       | 1,07           | 0,56      | 0,63              | 0,36               |
| Varebil       | ja        | 0,70           | 0,38      | 0,32              | 0,16               |
|               | nej       | 0,39           | 0,22      | 0,24              | 0,14               |
| Ærinde-fritid | ja        | 0,30           | 0,16      | 0,14              | 0,07               |
|               | nej       | 0,25           | 0,13      | 0,14              | 0,07               |

Som det ses, er der betydelig prisdifferentiering mellem systemerne, med kilometertakst-scenariet som det dyreste system for bilisterne og den lille bomring som det billigste. Man kan sige at sammenligningen mellem så forskellige systemer – bomring og GPS – på basis af en gennemsnitsomkostning er uretfærdig fordi forskellen mellem omkostningen for husstande alt afhængigt efter placeringen af bopæl kan være ganske stor. Omvendt giver det et godt overordnet indtryk af størrelsesordenen.

Da tabellen viser gennemsnitsomkostninger vægtet med trafikarbejde som beregnet i rutevalgsmodellen (og baseret på OD-mønstret for det pågældende scenario) afspejler differencer i priser til en vis grad adfærdsmæssige elementer. Det er eksempelvis interessant at se variationen over formål, hvilket delvist indikerer at trafikanter med forskellige turformål reagerer forskelligt på vejafgifter. Dette skyldes bl.a., at de forskellige turformål som udgangspunkt har forskellige rumlige fordelinger. Eksempelvis er gennemsnitsprisen for bolig-arbejde-ture og erhvervsture omtrent dobbelt op i myldretiden. For disse er der ikke den store frihed til at substituere, idet arbejdspladsers lokalisering er fast (i hvert fald på mellemlangt sigt), ligesom pendlerture typisk er længere og ofte går ind til København. Ærinde-fritids-ture har en relativt mindre stigning i gennemsnitsomkostningerne i myldretiden. Dette kan henføres til substitutionseffekter på tidsperiode, destinationsvalg og andet transportmiddel, samt at få af disse ture som udgangspunkt foregår i myldretiden.

## Overordnede effekter og provenu

Nedenfor opsummeres i Tabel 4 de overordnede trafikale effekter samt provenuet for de forskellige systemer i 2004. Hvis indtægterne fra et vejafgiftssystem skal bruges til tilbageførsel til trafikprojekter, er størrelsesordenen af disse indtægter, målt på 2004 trafik, afgørende for hvilke projekter der kan implementeres og derfor interessant som input til de efterfølgende tilbageførselsscenarier.

**Tabel 4: Overordnede trafikale effekter 2004.**

| System (2004)   | Ture(hverdags)<br>(x1000) | Trafikarbejde<br>(x1000) | Bruttoprovenu (mio<br>kr.) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Basis           | 3.723                     | 37.094                   | 0                          |
| Kilometer takst | 3.490                     | 34.506                   | 4.535                      |
| Zonetakst       | 3.444                     | 34.678                   | 2.418                      |
| Stor bom        | 3.627                     | 36.027                   | 2.493                      |
| Lille bom       | 3.663                     | 37.164                   | 1.321                      |

Det største bruttoprovenu, på 4,5 mia. kr. opnås ved kilometertakstscenariet, mens den lille bomring genererer et bruttoprovenu på ca. 1,3 mia. kr. Trafikarbejdet reduceres tilsvarende mest i kilometertakstscenariet, mens antal ture reduceres mest i zonetakst. Målt på overordnede efterspørgselseffekter er zonetakst det mest "effektive" scenarium i den forstand at man får den største trafikale ændring per provenukrone.

Vi kan også se, at der er stor forskel på, om bompengesystemet er finmasket, som det er tilfældet med zonetakst, eller om det er et ringsystem. Dels er der forskel på provenuet, men også på effekterne. Tabel 5 viser de relative ændringer i forhold til basis. Som det fremgår, er lille bom uheldig, idet der sker en lille vækst i trafikarbejdet. Årsagen til dette forklares nærmere, når de enkelte beregningers resultater analyseres nærmere.

**Tabel 5: Overordnede trafikale effekter 2004, relativt i % i forhold til basis**

| Effekt        | Km .takst | Zone takst | Stor bomring | Lille bom |
|---------------|-----------|------------|--------------|-----------|
| Antal ture    | -6,3%     | -7,5%      | -2,6%        | -1,6%     |
| Trafikarbejde | -7,0%     | -6,5%      | -2,9%        | 0,2%      |
| Fri rejsetid  | -5,8%     | -6,7%      | -3,1%        | 0,6%      |
| Køtid         | -13,1%    | -14,1%     | -8,1%        | 2,0%      |

Tabel 5 viser også at systemerne har forskellig effekt på trængsel og den frie køretid.

Umiddelbart reduceres trængslen for de to mest ekstreme scenarier med ca. 13-14%, mens den frie køretid reduceres med 6-7%. Inkluderet i de ovenstående tal er den generelle trafikreduktion på ca. 7% for de to ekstreme scenarier, hvilket betyder at den frie køretid nogenlunde følger trafikreduktionen (at den faktisk er en smule større skyldes reduceret omvejskørsel), mens at trængselsreduktionen reduceres mere end reduktionen i trafikarbejdet hvilket skyldes ikke-linearitet i speed-flow kurver (tæt på kapacitetsgrænsen giver selv en lille reduktion i trafikken en stor reduktion af trængslen, jf. Nielsen et.al. (2004).

Overordnet set kan det konstateres, at systemerne i forhold til internationale sammenligninger er relativt moderat påvirket af trængsel. I London havde man før indførelsen af toldringen gennemsnitlige trængselstider på omkring 2.5 min/km om dagen mod natstider (er en proxy for

”free-flow” tid) på 1,8 min/km. Udenfor ringen var trængslen i samme niveau eller værre. Med andre ord, har man i ret store dele af London by og på indfalds- og ringveje haft trængselsprocenter på op mod 35-40%. For København som helhed er det tilsvarende tal i 2004 ca. 13%.

For de to Københavnske bompengesystemer kan det konstateres, at trængslen for den lille bomring stiger i forhold til basissituationen. Dette skyldes massiv omvejskørsel i brokvartererne ad eksempelvis Jagtvej og på Fasanvejen. Faktisk breder trængslen sig som ringe i vandet og ender helt ude på ring 3 (dette diskuteres nærmere i det følgende). Det kan også konstateres, at den store bomring faktisk er ganske effektiv i forhold til at reducere trængsel. Hvor det samlede trafikarbejde kun reduceres med 2,8% reduceres trængslen med godt 8%.

**Tabel 6: Relative ændringer i forhold til basis-situationen (i %), 2004**

| Navn              | Km.takst 2004 | Zonetakst 2004 | Stor bom 2004 | Lille bom 2004 |
|-------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Frederiksberg     | -17,3         | -5,4           | -3,7          | 10,1           |
| Frederiksborg Amt | 4,3           | -2,4           | 0,6           | 1,7            |
| København         | -16,2         | -12,4          | -9,4          | -5,7           |
| Københavns Amt    | -6,7          | -4,7           | -0,4          | 2,9            |
| Roskilde Amt      | -0,1          | -4,1           | 0,5           | 1,4            |
| Total             | -7,0          | -6,5           | -2,9          | 0,2            |

Klart de største ændringer findes i Københavns og Frederiksberg kommune, hvor der for kilometertakstscenariet er tale om en reduktion på godt 16 %. Som afgiftsstrukturen er anlagt falder den relative afgiftsbetaling med afstanden til centrum, og det kan aflæses på effekterne i yderregionerne, som er betydeligt mindre. Det er interessant at se, at den lille bomring giver vækst i trafikarbejdet i centrum, fordi man vælger omveje selv indenfor ringen for at slippe for at krydse bomringen.

### **Transportmiddelvalg**

Som det ses nedenfor i Tabel 7, er scenariet med kilometertakst det scenarium, der overflytter flest ture til henholdsvis kollektiv trafik, cykel og gang. Alle scenarier medfører dog positiv overflytning på alle andre transportmidler end bil.

**Tabel 7: Effekter på transportmiddelvalg 2004 – relative ændringer i forhold til basis (i %)**

| Scenario  | Biler | Kollektiv | Cykel | Gang |
|-----------|-------|-----------|-------|------|
| Km.takst  | -6,3  | 7,9       | 7,1   | 4,1  |
| Zonetakst | -7,5  | 4,5       | 4,3   | 2,5  |
| Stor bom  | -2,6  | 3,6       | 3,0   | 1,6  |
| Lille bom | -1,6  | 3,4       | 3,0   | 1,7  |

I kilometertakstscenariet stiger den kollektive trafik overordnet med knap 8% og henholdsvis cykel og gang med 7% og 1,5%. Den relative ændring i kollektiv trafik følger således omtrent



den generelle trafikreduktion. Nogenlunde det samme mønster har man kunne konstatere i London, mens overflytningen i Sverige har været lavere.

Hvis man ser på, hvordan transportmiddelvalget fordeler sig på formål og tidsperioder, sker den største relative overflytning til kollektiv trafik for bolig-arbejdsture og i myldretiden. For indkøb/ærinde-ture flyttes der en lille smule mindre til kollektiv trafik. Overflytninger til cykel er imidlertid endnu større, specielt for bolig-arbejde-ture.

## Eksterne effekter

Nedenfor gennemgås resultaterne af de eksterne effekter.

**Tabel 8: Drift- og vedligeholdelseskostninger på vejnettet angivet i årlige antal mio. kr. (baseret på 261 hverdagsdøgn).**

|                                        | Basis | Km. takst | Zonetakst | Stor Bom | Lille Bom |
|----------------------------------------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Omkostninger udregnet i 1985 priser    | 271   | 263       | 262       | 268      | 268       |
| Omkostninger opskrevet til 2005 priser | 432   | 420       | 421       | 428      | 431       |

Som det ses er der en "besparelse" på højest 12 mio. kr. årligt for kilometertakstscenariet. Med andre ord er selve drifts- og vedligeholdelseskostningerne på vejnettet en mindre del af de samlede eksterne effekter. De relative ændringer i drift- og vedligeholdelseskostninger ligger under den generelle trafikreduktion. Dette skyldes primært at en ganske stor del af omkostningerne er faste og dermed uafhængige af trafikniveauet.

Det overordnede resultat af uheldsberegningen er vist i tabel 9 nedenfor.

**Tabel 9: Antal årlige uheld (baseret på 261 hverdagsdøgn).**

|                                                        | Basis | Km. takst | Zonetakst | Stor Bom | Lille Bom |
|--------------------------------------------------------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Beregnet antal personskadeuheld i kryds                | 715   | 636       | 645       | 678      | 686       |
| Beregnet antal andre rapporterede uheld i kryds        | 1.425 | 1.273     | 1.294     | 1.355    | 1.377     |
| Beregnet antal personskadeuheld på strækninger         | 676   | 645       | 644       | 659      | 668       |
| Beregnet antal andre rapporterede uheld på strækninger | 1.412 | 1.344     | 1.347     | 1.381    | 1.397     |

Antal sparede uheld er for kilometertakstscenariet estimeret til 110 uheld med personskade og 220 andre rapporterede uheld. For lille bom er der en tilsvarende reduktion på 37 uheld med personskade og 63. Altså en betydelig lavere reduktion. Det bemærkes dog, at selvom trafikarbejdet stiger i den lille bomring, så er der faktisk en reduktion i antal uheld. Dette kan dels skyldes, at hastighederne reduceres og dels, at takststrukturen dirigerer en del omvejstrafik ud på mindre uheldsbelastede veje såsom ring 3.

**Tabel 10: Reduktion i dræbte, alvorligt og lettere tilskadekomne samt uheld med materiel skade i København (Kilde: VD).**

|                               | Km. takst | Zone takst | Stor Bom | Lille Bom |
|-------------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Færre dræbte                  | 2,41      | 2,23       | 1,18     | 0,81      |
| Færre alvorligt tilskadekomne | 62,70     | 58,19      | 30,67    | 21,20     |
| Færre lettere tilskadekomne   | 60,37     | 56,03      | 29,54    | 20,41     |
| Materiel skade                | 219       | 197        | 101      | 64        |

I det ovenstående er både kryds- og strækningssuheld lagt sammen.

I London, hvor man oplevede en reduktion i trafikken i afgiftszonen på omkring 33%, har man en tilsvarende reduktion i antal personskadeuheld (der er ikke opdelt på kryds- og strækningssuheld) på 30%. Det svarer altså til en nogenlunde lineær sammenhæng mellem reduceret trafik og det reducerede antal uheld. Til sammenligning har vi i vores beregninger (for kilometertakst) et fald i trafikken på 8% og et fald i antal uheld på 7,9%, men med stor variation mellem krydsuheld og strækningssuheld. Der er altså tale om sammenlignelige størrelsesordner.

Klima- og lufteffekterne er en direkte ”mark-up” på trafikarbejdet med differentiering på biltyper og skal derfor ikke omtales videre.

Støj opgøres i støjbelastningstal som vist i tabel 11 nedenfor og som er værdisat af finansministeriet.

**Tabel 11: Det årlige antal støjbelastningstal (1000 SBT) omregnet til 261 hverdagsdøgn.**

|     | Basis | Km. takst | Zonetakst | Stor Bom | Lille Bom |
|-----|-------|-----------|-----------|----------|-----------|
| SBT | 59,4  | 56,7      | 56,7      | 58,2     | 59,2      |

Igen er de væsentligste reduktioner estimeret for kilometertakst- og Zonetakst scenariet, mens ændringerne for den lille bomring er relativt marginale. Vi kan umiddelbart konstatere, at støj falder mindre end trafikreduktionen, hvilket er at forvente, fordi støj både afhænger af trafik og hastighed. I London findes der relativt dårlige støjopgørelser, men tallene indikerer dog, at der ikke er målbare støjreduktioner. At vi dog får ret pæne støjreduktioner skyldes, at en del trafik dirigeres ud på motorveje og store omfartsveje, som har en høj andel af støjskærme. Hertil kommer, at basistrængslen og bystrukturen som helhed kan bidrage til væsentligt forskellige resultater.

## International sammenligning

De to mest interessante systemer er i den sammenhæng London og Stockholm.

I London (Transport for London, 2005) er takststrukturen således, at man i 2004 betalte 5 £ per dag svarende til 60 kr. for at køre og holde i takstområdet mellem 6.00-20.00. Generelt

har man ved at sammenholde før- og efter-situationen observeret en ændring i mængden af trafik ind og ud af zonen på mellem 33-35%.

For varebiler og andre biler er reduktionerne mere moderate, og ligger i omegnen af 5%. Omfanget af trafik med cykel, knallert, busser og taxier er alle steget med henholdsvis 28%, 6%, 21% og 22%. For busser har man kunne konstatere massiv vækst. Passagerantallet for trafik der ender og udgår fra takstzonen steget med henholdsvis 38% og 37%.

I Stockholm har eksperimentet kørt i kortere tid. Takseringen er mindre end i London. Man betaler mellem 6.30-18.30 mellem 12 og 24 SEK. for at krydse en ring. Man kan dog maksimalt betale 60 SEK. per dag. Man har konstateret en reduktion i trafikarbejdet ind og ud af zonen på ca. 20%.

I forhold til erfaringen fra disse to systemer er reduktionen i trafikarbejdet i de analyserede modeller for 2004 lavere end hvad man faktisk har observeret andetsteds. Vi vurderer, at dette primært skyldes, at den beregnede model er kortsigtet og derfor ikke tager højde for de strategiske effekter som indfinder sig når løsningen bliver permanent. Derudover er de grundlæggende afgifter på køb og ejerskab meget højere i Danmark end i de to andre lande, og dette kan meget vel betyde en mindre priselasticitet for det (rigere) markedssegment, der i Danmark har bil.

For Londons tilfælde er det også væsentligt at det kollektive system er væsentligt bedre. Dette vurderes specielt at være tilfældet i forhold til radialtrafik og trafik til og fra London centrum. Endelig dækker tallene for reduktion i trafikarbejdet i København præsenteret i denne artikel over det samlede trafikarbejde i Hovedstadsregionen, hvor tallene for Stockholm og London dækker over reduktionen i trafikarbejdet ind og ud af den afgiftsbelagte zone. Disse må forventes at være højere end reduktionen i det samlede trafikarbejde.

Kigger vi mere detaljeret på de relative effekter er der flere lighedspunkter med vores beregninger.

I London, hvor man oplevede en reduktion i trafikken i afgiftszonen på omkring 33%, har man en tilsvarende reduktion i antal personskadeuheld (der er ikke opdelt på kryds- og strækningsuheld) på 30%. Det svarer altså til en nogenlunde lineær sammenhæng mellem reduceret trafik og det reducerede antal uheld. Tilsvarende har vi i vores beregninger (for kilometertakstscenariet 2004) et fald i trafikken på 8 % og et fald i antal uheld på 7,9%, men dog med stor variation mellem krydsuheld og strækningsuheld.

For støj er målingerne i London relativt usikre, men for de stationer, hvor man måler støj, har man ikke kunne konstatere betydelige reduktioner i støjgenerne. Vi finder større støjeffekter, hvilket kan skyldes flere ting. Dels fordeles der i de fleste af vores scenarier en del trafik på ring 3 som er udstyret med støjskærme på hele strækningen. Dels kan de to situationer være vanskelige at sammenligne, fordi basistrængslen og bebyggelses-strukturen er anderledes.

Emissioner (primært NOx og PM10) er i London faldet med omkring 12% indenfor betalingsringen. Sammenholdes dette med vores reduktion på 3,5% for et trafikarbejde der reduceret omkring 1/3 af reduktionen i London ligger disse tal på linie med vores beregninger.

For London er der i 2004 tendenser til mindre omvejskørsel omkring betalingsringen, men i mindre udstrækning end hvad vores rutevalg indikerer.

Reduktionen af trafikarbejdet i betalingszonen for vare- og lastbiler i London har fra 2002-2003 været på omkring 5-7%, med en tendens til yderligere fald i 2004. I forhold til den generelle trafikreduktion på 34% er der tale om en 17% reduktion i forhold til personbilerne. Set i forhold til vores initiale antagelse, om at vare- og lastbiler var henholdsvis 20% og 10% mindre følsomme, er der god overensstemmelse. Det skal imidlertid noteres, at man faktisk for London har oplevet en marginalt større reduktion i lastbiler, hvilket peger lidt modsat af vores antagelser.

## Sammenfatning

I alt fire forskellige afgiftssystemer blev undersøgt i basisåret, 2004. Et GPS baseret kilometertakstsystem, et detaljeret bompengesystem samt to ringsystemer refereret til som henholdsvis lille og stor bomring. Den lille bomring omkranser den indre by, mens stor bomring omtrent ligger langs ringbane-snittet. De fire afprøvede takstsystemer giver anledning til relativt forskellige resultater, både hvad angår samfundsøkonomiske konsekvenser og trafikale effekter. Hvad angår de trafikale effekter, herunder også eksterne effekter, er de vigtigste resultater sammenfattet nedenfor.

- Introduktionen af de fire afgiftssystemer giver anledning til en reduktion i trafikarbejdet (kørte km.) i størrelsesordenen -7% for kilometertakstscenariet 2004, -6,5% for Zonetakst, -3% for stor bom, og en vækst for lille bom 2004 på +0,2%. Væksten skyldes uhensigtsmæssig omvejskørsel i dette system. For Københavns og Frederiksberg kommune er reduktionerne godt og vel dobbelt så høje.

- I forhold til de anførte reduktioner i trafikken sker der en relativt større reduktion i trængslen. For de to dyreste scenarier, kilometer takst og Zonetakst, sker der en ca. 14 % reduktion i trængslen. Dette skyldes at vi befinder os på den ikke-lineære del af trængselskurven, hvor trængslen øges mere end lineært som funktion af trafikken.

- Bompengescenarierne generelt, og i særdeleshed den lille bomring, giver anledning til en del uhensigtsmæssig omvejskørsel. For såvel stor som lille bomring giver det anledning til trængselseffekter på ring 3. Der er med andre ord tendens til at trængslen breder sig som ringe i vandet fra centrum og ud.

- Varebiler og lastbiler er simuleret med lave efterspørgselselasticiteter og deres adfærdsændringer er derfor relativt små.

- Af de eksterne effekter er uheld og støj de vigtigste, mens drift- og vedligehold af vejnettet, klima- samt lokale luftforurenings-effekter er sekundære. Det reducerede antal uheld med personskade for de 4 scenarier (i 2004) er henholdsvis 110 for kilometertakst, 102 for Zonetakst, 54 for stor bomring og 37 for lille bomring. Reduktionen i uheld følger reduktionen i trafikarbejdet. For støj observeres ligeledes signifikante reduktioner som følge af takstscenarierne.

- Der vindes relativt få passagerer over til den kollektive trafik fra bil som resultat af de infrastrukturforbedringer der er afprøvet i tilbageførelsesscenarierne. Der vindes omtrent det samme antal cykel- og gangture som bilture. Dette resultat er i tråd med tidligere undersøgelser. For kilometertakstscenariet, som genererer det største provenu, indføres der mange kollektive projekter i et i forvejen ganske udbygget kollektivt system. Den marginale effekt af de sidst tilkomne projekter er derfor mindre og derfor fås små overflytningsprocenter.

Resultaterne for København er i nogen grad sammenlignelige med London og Stockholm. Niveauet for efterspørgselsændringerne er lavere, men det hænger sammen med at London er en permanent ordning og dermed indbygget i bilisternes langsigtede strategi. Graden af omvejskørsel er større i København. Dette hænger sammen to ting. Dels lider København af få tværgående alternativer til biltrafikken hvilket betyder lavere substitution til andre transportmidler på disse ture. Dels at København ikke, som i Stockholm er afgrænset af naturlige forhindringer som gør omvejskørsel besværlig.

## Referencer

Brems, C. R. (1997): Behandling af kollektiv trafik i trafikmodeller. *Trafikdage på AUC*. Konferencerapport 2, s. 403-414.

Menegazzo, P. (2003): Estimation of route choice models on GPS-data. Eksamensprojekt, CTT, DTU.

Nielsen, O. A. (1998): En ny model for passagerers rutevalg i kollektiv trafik. *Trafikdage på AUC*. Konferencerapport 1, s. 137-156.

Nielsen, O. A., Frederiksen, R. D. (1998): En vejvalgsmode for flere trafikantklasser. *Trafikdage på AUC*. Suppleringsrapport, pp. 159-174.

Nielsen, O.A. og Jovicic, G. (1999): A large-scale stochastic timetable based transit assignment model for route and sub-mode choices. Publiceres ved *European Transport Forum (PTRC)*. Cambridge.

Nielsen, O. A. (2000): A Stochastic Traffic Assignment Model Considering Differences in Passengers Utility Functions. *Transportation Research Part B Methodological*. Vol. 34B, No. 5, pp. 337-402. Elsevier Science Ltd.

Nielsen, O. A. , Frederiksen, R. D. og Daly, A. (2002): A stochastic multi-class road assignment model with distributed time and cost coefficients. *Networks and spatial economics*. No 2. pp. 327-346. Kluwer.

Nielsen, O. A. og Vuk, G. (2003): The AKTA vejafgifter experiment in Copenhagen. 10<sup>th</sup> International Conference on Travel Behaviour Research. Proceedings, session 3.2 Valuation/Pricing. Lucerne, Switzerland, August.

Nielsen, O. A. (2004): Behavioural responses to pricing schemes: Description of the Danish AKTA experiment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. Vol. 8(4). Pp. 233-251. Taylor og Francis

Nielsen, O. A. og Landex, A. (2004a): Trængselsprojektet – modellering af trængsel. Rapport 2004-3. Tilgængelig på [www.ctt.dtu.dk](http://www.ctt.dtu.dk)

Nielsen, O. A., Hansen, C. O., Landex, A., og Würtz, C. (2004b): Trængselsprojektet – overblik og evaluering af AKTA hastighedsmålinger. Rapport 2004-4. CTT/DTU. Tilgængelig på [www.ctt.dtu.dk](http://www.ctt.dtu.dk)

Nielsen, O. A. og Frederiksen, R. D. (2006): Optimisation of timetable-based, stochastic transit assignment models based on MSA. Paper accepted for *Annals of Operations Research*. Springer.

Nielsen, U., Nielsen O.A., Rich, J., 2006a, Kørselsafgifter i København – samfundsøkonomisk metode og resultater, papir præsenteret på Trafikdage 2006

Nielsen O.A., Rich, J., Nielsen, U 2006b, Kørselsafgifter i København – systemdesign og anvendelse af provenu, papir præsenteret på Trafikdage, 2006

Rich, J., Nielsen O.A. 2006, Kørselsafgifter i København – de trafikale effekter, IMV Rapport, ISBN: 87-7992-044-6.

Wrang K., Nielsen U., Kohl M. 2006, Kørselsafgifter i København – en samfundsøkonomisk analyse, IMV Rapport, ISBN: 877992-043-8.

Trafikministeriet, 2003, Nøgletalskatalog – til brug for samfundsøkonomiske analyser på transportområdet. Trafikministeriet.

Transport for London (2005): Congestion Charging: Third Annual Monitoring Report, [www.tfl.gov.uk](http://www.tfl.gov.uk)