

# EN STOKASTISK FLERKLASSE VEJVALGSMODEL MED FORDELTE KOEFFICIENTER FOR TIDER OG OMKOSTNINGER

Otto Anker Nielsen.

Center for Trafik og Transportforskning, DTU

Rasmus Dyhr Frederiksen

TetraPlan A/S

## 1 INDLEDNING OG RESUME

Ved sidste års Trafikdage præsenterede Nielsen og Frederiksen (1998c) en ny flerklasse vejvalgsmodel, der var udviklet for Ørestadsselskabet. Som en del af Havnetunnelprojektet i København for Trafikministeriet, Vejdirektoratet, m.fl. er denne modellen videreudviklet både teoretisk og i praksis. Derudover er den nu estimeret ud fra grundige RP- og SP-analyser, hvor den før kun var kalibreret mod tællinger. Arbejdet blev gennemført som en del af det samlede Havnetunnelprojekt gennemført af Havnetunnelgruppen bestående af TetraPlan A/S, Hague Consulting Group og DTU / Banestyrelsen Rådgivning som underrådgiver. Havnetunnelprojektet omfattede en videreudvikling af Ørestadsmodellen, med ovennævnte vejvalgsmodel, reestimering af efterspørgselsmodellen for personture, estimering af nye vare- og lastbilmatricer samt opbygning af helt nye egentlige vare- og lastbilmodeller. Paag & Jensen (1999) beskriver nærmere det samlede projekt.

### 1.1 Metodisk grundlag

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 v.h.a. en såkaldt pre-load. De forskellige klasser og typer af køretøjer påvirker alle hastigheden på strækningerne, mens omfattende delmodeller for vejkryds og rundkørsler beskriver køer og geometriske forsinkelser. Modellen beskriver også grønne bølger ved koordinerede vejkryds (se Nielsen & Frederiksen, 1998c).

Forskellige 'byggeklodser' til modellen er beskrevet i tidligere artikler (Nielsen, 1996, 1997a, 1998a & Nielsen m.fl. 1998b). Men modellerne var ikke fuldskala estimeret og kalibreret ud fra adfærdsdata, hvilket først har været økonomisk muligt i forbindelse med Havnetunnelprojektet. Her er der gennemført forskellige kombinerede RP- og SP-analyser til estimering af fordelte koefficienter i nyttefunktionerne, efterfulgt af en grundig kalibrering og test mod tællinger og kendte rutebundter. Dette har – ud over en generel forbedring af modellen – muliggjort modellering af trafikale konsekvenser af en eventuel betaling for brug af Havnetunnelen.

### 1.2 Resultater

Artiklen starter med en diskussion af teoretiske og praktiske fordele ved at benytte fordelte koefficienter i nyttefunktioner frem for faste koefficienter som i traditionelle logit- og probit-baserede rutevalgsmodeller. Der er kun givet få eksempler af denne type modeller og metoder i litteraturen (se Ben-Akiva m.fl. 1993), og disse har benyttet andre løsningsalgoritmer i anvendelsituationen.

Den endelige vejvalgsmodel indeholder forskellige tidsværdier for fri køretid uden forsinkelse og for forsinkelser, ligesom der skelnes mellem kørselsomkostninger og betaling. Resultaterne blev i kalibreringsfasen sammenlignet med en mere traditionel model, nemlig en nestet logitmodel for valg mellem tunnel og alternative ruter. Sammenligningen viste, at det er fremkommeligt at beskrive betaling af tunnelafgift som en del af rutevalgsproblemet. I Havnetunnelprojektet resulterede dette i en intern konsistent model, fremfor de mere traditionelle sekventielle valgmodeller, der består af indbyrdes inkonsistente valgmodeller for hhv. tunnelafgift og rutevalg. Et interessant aspekt er, at metoden kan generaliseres til at beskrive rutevalg i vejsystemer med bompenge eller vejafgifter (road pricing). Dette har stor betydning, idet sådanne systemer på strækningssniveau – og derved indirekte også på efterspørgselsniveau - ikke kan beskrives på konsistent vis af mere traditionelle diskrete valgmodeller.

### **1.3 Om artiklen**

Artiklen giver et overblik over estimeringen og kalibreringen af modellen. Afsnit 2 gennemgår overvejelserne omkring det overordnede valg af model i Havnetunnelprojektet; Nestet logitmodel kombineret med traditionel rutevalgsmodel versus ny kombineret model for valg af rute, tunnel og betalingsvillighed. Afsnit 3 gennemgår estimeringen af vejvalgsmodeller for vare- og lastbiler, og afsnit 4 for personbiler omfattende 3 turformål. Afsnit 5 gennemgår estimationen af turmatricerne, så de blev konsistente med rutevalgsmodellen, mens afsnit 6 beskriver modellens kalibrering. Artiklen afsluttes med konklusioner for arbejdet. For en mere detaljeret beskrivelse henvises til den udarbejdede tekniske dokumentation af trafikmodellen.

## **2 OVERORDNET VALG AF MODEL**

I starten af Havnetunnelprojektet blev fordele og ulemper med følgende to modeltyper diskuteret:

- En tradition hierarkisk logitmodel for valg af tunnel versus broerne til Amager, efterfulgt af separat assignment af ruter gennem tunnelen hhv. over broerne.
- En kombineret stokastisk valgmodel for rute, betaling og tunnel, som udvidelse af den probit-baseret rutevalgsmodel.

Fordelene ved den stokastiske model i forhold til logitmodellen er:

- Tunnelen er et lille led af det samlede transportsystem i København. Således vil valg af tunnel være tæt integreret med valg af rute. Sidstnævnte omfatter valg mellem et stort antal ruter, som ikke kan opstilles som et diskret valgproblem, men må løses ved en egentlig assignmentmodel (i modsætning til f.eks. i Storebæltmodellen, hvor der er langt færre ruter at vælge mellem).
- Ved opsplittning mellem tunnelbrugere og ikke-tunnelbrugere før assignment, vil det ikke være teoretisk og praktisk muligt at opnå konsistens mellem nyttefunktioner i vejvalgsmodellerne og modellen for valg af tunnel.
- I praksis ville det være vanskeligt at tvinge vejvalgsmodellen til at få tunnelbrugere fra logit-modellen til at bruge tunnelen p.g.a. ovennævnte inkonsistens mellem nyttefunktionerne. De andre broer kan ikke 'lukkes modelteknisk', idet en del bilister muligvis vil be-

nytte Kalvebod (altså bilister fra Køgefingeren, som vil benytte tunnelen). Således skulle der implementeres en iterativ procedure i vejvalgsmodellen til at forkaste 'uønskede ruter'. Dette ville kræve store programmeringsomkostninger, og derudover kun virker for det det pågældende infrastrukturforlag. Derudover ville separat assignment af tunnelbrugere, og 'ikke-tunnel brugere' samt mange ekstra iterationer i tunnel-assignment medføre en markant forøgelse af beregningstiden.

- Ved implementering af den stokastiske model, er modellen forberedt til mere brede analyser af betalingsvillighed i Hovedstadsområdet, f.eks. af bompeng, roadpricing, eller betaling ved andre anlæg. Derudover er softwaren og teorigrundlaget forberedt til at kunne benyttes i andre områder i Danmark. Eksempelvis benyttes vejvalgsmodellen i forbindelse med et eksamensprojekt ved AUC om roadpricing i Aalborg.

På baggrund af disse faglige og praktiske fordele blev det valgt, at gå videre med den stokastiske model. Fagligt er det første gang, at en sådan model estimeres ud fra SP-data og benyttes i praksis på et større net, men modellen er tidligere benyttet uden en sådan estimation (Nielsen m.fl. 1998b), ligesom Hague Consult og MIT tidligere har estimeret såkaldte error-component modeller, men for andre anvendelsessituationer.

## 2.1 Generaliseret nyttefunktion

Generaliseret kan modellens nyttefunktion skrives som:

$$U_i = (\beta_t + \xi_t) \cdot \text{tid} + (\beta_c + \xi_c) \cdot \text{omkostning} + \varepsilon_a \quad (1)$$

hvor:

- $\beta$  er koefficienter, der ganges på tid og omkostning. Dette er muligt i nogle traditionelle vejvalgsmodeller, skønt de fleste kun minimerer rejsetiden.
- $\varepsilon_a$  er tilfældig variation på strækningsniveau. Antages den f.eks. at være Gumbell-fordelt (MAX1 fordelt) fås den sædvanlige logit-model. Her antages det, at alle alternativer er uafhængige. I de fleste diskrete valgsituationer er dette ikke tilfældet, hvorfor der i stedet benyttes hierarkiske eller nestet logitmodeller. Her antages  $\varepsilon_a$  stadig MAX1-fordelt, men der tillades korrelation mellem nærmere specificerede alternativer. I rutevalgsmodeller, er der imidlertid så mange ruter, der er mere eller mindre overlappende, at logit-modellen giver store problemer. Dette kan undgås ved at benytte en multi-nomial probitmodel, hvor  $\varepsilon_a$  antages Normal-fordelt, og hvor der tillades korrelation mellem forskellige ruter (Sheffi, 1985). I vejvalgsmodellens løsningsalgoritmer, tillades imidlertid ikke negative kantomkostninger (Nielsen, 1997a). Derfor benyttedes der i stedet en Gammafordeling af  $\varepsilon_a$ . Gamma-fordelingen er ligesom Normalfordelingen reproduktiv i middelværdi og varians, givet at de to er sammenkædet via en korrelationskoefficient (se Nielsen & Jovicic, 1999b for bevis) og den har samtidig den fordel, at den er positiv.
- Tiden er afhængig af trafikmængden på såvel strækningsniveau og i kryds, og påvirkes således både af bilister inden for samme turformål som af bilister med andre formål (Nielsen & Frederiksen, 1998c).
- $\xi$  er systematisk variation af koefficienterne. Denne variation ses der som regel bort fra i såvel assignment- som diskrete valgmodeller. Som det vil fremgå af det følgende, gav

denne variation imidlertid en markant forbedring af såvel modellens likelihood-funktioner (den matematiske estimation), som dens reproduktion af snittællinger og kendte rutebundter i nettet.  $\xi$  kan antages at følge forskellige typer fordelinger.

Det understreges, at de fordelte koefficienter ( $\xi$  'erne) gør modellen i stand til at beskrive forskelle i trafikanternes præferencer. Dette giver en mere korrekt beskrivelse af deres valg i forhold til traditionelle logit-modeller, hvor forskelle i trafikanters valg antages at skyldes rene tilfældigheder (det såkaldte 'fejllid',  $\epsilon_a$ ). I forbindelse med Havnetunnelprojektet, er dette af særlig vigtighed, idet den enkelte bilist betalingsvillighed netop skyldes vedkommendes bevidste vægtning af tid versus omkostning.

Introduceres flere tids- og omkostningselementer kompliceres nyttefunktionerne yderligere, idet der da kan antages forskellige korrelationer mellem de enkelte koefficienters variationer. Følgende modeller er estimeret / forsøgt estimeret i forbindelse med Havnetunnelprojektet:

- Normal eller Logaritmisk Normal-fordelt variation af omkostning:

$$U_i = (1 + \xi_c) \cdot (\beta_1 \cdot \text{længde} + \text{omkostning}) + \beta_2 \cdot \text{fri tid} + \beta_3 \cdot \text{forsinkelse} + \epsilon_a \quad (2)$$

- Normalfordelt variation af fri køretid:

$$U_i = \beta_1 \cdot \text{længde} + \text{omkostning} + (\beta_2 + \xi_t) \cdot \text{fri tid} + \beta_3 \cdot \text{forsinkelse} + \epsilon_a \quad (3)$$

- Normalfordelt variation af forsinkelse:

$$U_i = \beta_1 \cdot \text{længde} + \text{omkostning} + \beta_2 \cdot \text{fri tid} + (\beta_3 + \xi_f) \cdot \text{forsinkelse} + \epsilon_a \quad (4)$$

- Normal eller logaritmisk normal fordelt variation af total tid:

$$U_i = \beta_1 \cdot \text{længde} + \text{omkostning} + \beta_2 \cdot \text{fri tid} + \beta_3 \cdot \text{forsinkelse} + \quad (5)$$

$$(\beta_4 \cdot \xi_t) \cdot (\text{fri tid} + \text{forsinkelse}) + \epsilon_a$$

- Normal fordelt variation af såvel omkostning som tid:

$$U_i = (1 + \xi_c) \cdot (\beta_1 \cdot \text{længde} + \text{omkostning}) + \beta_2 \cdot \text{fri tid} + \beta_3 \cdot \text{forsinkelse} + \quad (6)$$

$$(\beta_4 \cdot \xi_t) \cdot (\text{fri tid} + \text{forsinkelse}) + \epsilon_a$$

På forhånd måtte det foretrækkes, at enten begge tidselementer eller begge omkostningselementer varieres, idet det ville være ulogisk, at alle trafikanter måtte have samme præference for f.eks. ét bestemt tidselement. Men en variation af kun samlet tid eller omkostning vil alligevel give en variation af forholdet mellem vægtning af tid versus omkostning.

Derudover var der en vis a priori præference for den logaritmisk normalfordelte variation, idet den er positiv. Hvis variationen er tilknyttet tiden, vil dette svare til en logaritmisk normalfordelt indkomst, hvilket ofte antages i mikroøkonomien, ligesom det ofte er bekræftet empirisk. En fordel ved Normalfordelingen er imidlertid, at de statistiske

estimationsprocedurer er mere udviklede. Fordele og ulemper ved forskellige fordelinger beskrives mere udførligt i Nielsen & Jovicic (1999b).

## 2.2 Justering af nyttefunktionerne i assignmentprogrammet

Estimationen ud fra SP-spillene forudsatte binære valgsituationer, idet betingelserne for logitmodellen ellers overtrædes (se Nielsen & Jovicic, 1999b). Således kunne koefficienterne i eksempelvis formel 5 let estimeres. Men i anvendelsessituationen varierer tid og omkostning og derved nytte på den enkelte strækning. Oplevet længde, omkostning, fri tid og forsinkelse er således ikke uafhængige af den enkelte strækning (simuleringen af  $\varepsilon_a$ ), idet kun koefficienterne er konstante langs strækningerne ad den enkelte rute for den enkelte trafikant. Derfor var det nødvendigt at transformere de estimerede koefficienter til følgende udtryk:

$$U_i = \beta_1 \cdot \text{længde} + \text{omkostning} + (\beta_2 + \xi'_{i2}) \cdot \text{fri tid} + (\beta_3 + \xi'_{i3}) \cdot \text{forsinkelse} + \varepsilon_a \quad (7)$$

hvorved det sikres at middelværdi og varians bevares, samt at de fordelinger af fri tid og forsinkelse er 100% korrelerede. Tilsvarende omskrivninger blev foretaget for formel 2 og 6.

## 3 ESTIMATION AF VEJVALGSMODELLER FOR VARE- OG LASTBILER

Idet det kun var muligt at opnå en relativ lille stikprøve for vare- og lastbiler, blev de to formål estimeret under ét. Koefficienterne i den mest tilfredsstillende model var normalfordelte (se bilag 1 for en detaljeret gennemgang af estimationen). En forklaring herpå kan være, at estimationsteknikken er mere udviklet for normal- end for logaritmiske normalfordelinger. En anden forklaring kan være, at virksomheders omkostningsfølsomhed faktisk er normalfordelt, hvorimod privatpersoners betalingsvillighed er korreleret med indkomsten, og derved i højere grad kan antages at være logaritmisk normalfordelt. Således er det ikke urimeligt, at vare- og lastbilers vejvalg kan følge en anderledes fordeling end personbilers. Koefficienterne blev af tekniske årsager transformeret fra variation af omkostning til variation af tid. Den endelige model gav en betragtelig bedre statistiske tilnærmelse til observationer end traditionelle modeller uden fordelte koefficienter.

## 4 ESTIMATION AF VEJVALGSMODELLEN FOR PERSONBILER

Estimationen af vejvalgsmodeleen for personbiler omfattede flere turformål, nemlig Bolig-Arbejdsstedstrafik (BA), erhvervstrafik, studerende mellem bopæl og studieplads samt fritidstrafik. Det viste sig dog hurtigt, at de to sidstnævnte turformål havde så sammenlignelige egenskaber, at de blev slået sammen for at opnå en større stikprøve og for at være i stand til at estimere alle ønskede variable (der var større variation mellem svar i denne gruppe end for de to andre turformål).

Som for vare- og lastbiler, gav estimationen for personbiler også det bedste resultat for variation af koefficienter for omkostning, men det blev besluttet ikke at transformere denne til variation af tidsværdien. Ligeledes lykkedes det ikke at estimere en logaritmisk normalfordelt tidsværdi. Idet den inverse normalfordeling har en 'hale' mod højre, vil en normalfordelt variation af omkostningen kunne tilnærme en logaritmisk normalfordelt tidsværdi, og derved opnå den ønskede egenskab (nemlig konsistens med økonomisk teori og korrelering med

indkomsten). Derfor blev det besluttet, at bibeholde den mest signifikante model, nemlig normalfordelt variation af omkostningen. Derudover kan nævnes, at personbiler ikke er så tidsfølsomme som lastbiler (mindre tidsværdi og mindre begrænsninger i accelerations og decelerationsevne).

Den endelige model gav en betragtelig bedre statistisk tilnærmelse til observationer end traditionelle modeller uden fordelte koefficienter.

## 5 ESTIMERING AF TURMATRICER

MPME-metoden, 'Multiple Path Matrix Estimation' blev benyttet at estimere nye turmatricer ud fra snittællinger. Idet rutevalgmodellen indgår som en væsentlig del af MPME, ligesom turmatricerne er et væsentligt input til vejvalgsmodellen, foregik estimeringen af turmatricer og vejvalgsmodellen i et tæt forløb. MPME blev benyttet, fordi den har følgende fordele:

- Den benytter alle ruter mellem det enkelte zone-par til estimationen. Derved indgår hele det relevante tællemateriale i estimeringen af det enkelte element i matricen.
- Metoden er åben over for valg af assignmentmodel, således at den eksakt samme model kan benyttes ved matrixestimationen, som i den efterfølgende assignment.
- Metoden tager højde for, at tællinger langs en rute er stokastiske (korrigerer for tilfældig variation). Dette betyder, at afvigelsen mellem tælling og modelleret trafik minimeres (test viser at metoden tilnærmer en minimering af den gennemsnitlige kvadratafvigelse), og en enkelt 'skæv' tælling ikke vil skævvride resultatet.
- Der er stor kvalitetsforskel på tællinger, der tælles maskinelt over længere tidsrum og opregnes systematisk til hverdagsdøgntrafik, og visse Kommunale tællinger, hvor tællemetode og opregningsprocedure ikke er dokumenteret. Sidstnævnte giver mindre problemer i MPME end i andre metoder, idet disse sammenvægtes med andre tællinger langs den enkelte rute.
- Metoden søger at bevare så meget information som muligt fra den oprindelige matricer (empiriske tests viser, at den tilnærmer en minimering af den gennemsnitlige kvadratafvigelse). MPME tilnærmer først og fremmest tællingerne, og inden for den optimale løsning af dette problem minimeres afvigelsen fra udgangsmatricen.

Nielsen (1997b & 1998d) beskriver mere detaljeret den grundlæggende MPME-metoden. I Havnetunnelprojektet måtte der gennemføres en tilpasse af MPME-softwaren til den nye vejvalgsmode for at sikre konsistens hermed. Bl.a. blev det muligt kun at estimere matricer for to turformål (vare- og lastbiler). Der blev også implementeret en facilitet, så der i vejvalgsmodellen kunne benyttes forskellige antal iterationer for forskellige turformål. Derved kunne detaljeringsgraden for vare- og lastbiler øges (idet det kun var vare- og lastbilmatricer, der blev reestimeret), hvilket gav mere overkommelige regnetider. Derudover blev det muligt at fastholde bestemte celler – f.eks. for de celler, hvor der i forbindelse med Havnetunnelprojektet var gennemført særskilte analyser (Nordhavn, havnebroerne, etc.).

## 6 KALIBRERING AF VEJVALGSMODELLEN

I estimeringen blev der afprøvet en række forskellige formeludtryk, nemlig følgende:

- Konventionel model uden stokastiske koefficienter.
- Variation af omkostningskoefficient (længde og tunnelafgift antages fuldt korreleret).
- Variation af fri køretid alene.
- Variation af kø-tid og forsinkelsestid alene.
- Variation af total tid alene.
- Valg af fordeling – Normal versus Logaritmisk normalfordeling for udvalgte nyttefunktioner.

Modellen med variation af såvel tid som omkostning lykkedes det ikke at estimere med rimeligt resultat, så den var på forhånd udelukket. Det bemærkes, at da det overordnede valg er mellem tid og omkostning, kan variation af koefficienten for én af disse variable lige så vel variere valgproblemet, som variation af begge koefficienter.

På baggrund af den rent matematiske estimation var det klart, at alle modellerne med stokastisk variation var klart bedre end de bedste traditionelle modeller. Derimod havde de forskellige modeller med stokastisk variation forholdsvis ens Likelihood-værdier. Derfor blev det besluttet, at gennemgå en grundigere kalibrering, hvor de forskellige modeller blev implementeret og testet fuldskala mod tællinger og kendte rutebundter. For hver test blev følgende udarbejdet:

- Rutebundter for hvert turformål samt samlet for hvert tidsinterval samt for hele døgnperioden mellem Farum og Lufthavnen samt mellem Nordhavn og Ishøj. Disse rutebundter er særligt interessante, fordi de rummer en flerrutevalgsproblematik samtidig med, at der er en vis empirisk viden om bilisternes.
- Kort med sammenligninger med tællinger (kun for de mest interessante testkørsler).
- Sammenligninger med tællinger på Havnesnit, søsnit, bygrænsen, samt totalt for hvert tidsinterval, køretøjstyper samt totaler.

På basis af testene blev følgende konkluderet (resultaterne opsummeres i tabel 1):

- For personbiler blev der varieret på omkostningskoefficienten og ikke på tidskoefficienten. Logaritmisk normalfordeling gav stor variation og i visse tilfælde ulogiske rutevalg, og derfor blev der benyttet en almindelig normalfordeling. Idet valgmodellen prioriterer mellem tid (fri køretid såvel som kø-tid) og omkostning (længde såvel som tunnelafgift) vil Normal-fordelte omkostningsvariationer kunne transformeres til invers Normal-fordelte tidsvariationer. Dette svarer som tidligere nævnt til en fordeling med en 'længere hale mod højre' altså en mellemting mellem en Normal og en Logaritmisk Normalfordelt tidsvariation. Dette er en ønskværdig egenskab af fordelingen, idet tidsværdier som regel observeres at have sådanne fordelinger, ligesom mikroøkonomien anbefaler dette. Begge omkostningsvariable (længde og tunnelafgift) antages fuldt korrelerede.

Element	BA-trafik	Erhvervsture	Andre	Varebiler	Lastbiler
Antal observationer	895	540	1.214	215	
Kørselsomkostning (kr./km.)	0,35 (-1,6)	0,35 (-2,4)	0,35 (-3,0)	0,38 (-3,4)	
Normal-fordelt variation af omkostningen (længde • kr./km. + tunnelafgift)	43% (-1,5)	25% (-1,9)	54% (-2,5)	0	0
Tidsværdi, fri køretid (kr./min.)	0,48 (-1,6)	0,74 (-2,7)	0,31 (-3,9)	2,86 (-4,5)	
Tidsværdi, forsinkelse (kr./min.)	0,63 (-1,7)	1,21 (-3,3)	0,67 (-4,7)	3,98 (-4,3)	
Normalfordelt variation af den samlede tid	0	0	0	88% (-2,4)	
Gamma-fordelt Strækningsstokastik	5%	5%	5%	10%	10%
Maksimal hastighed (km./time)				-	80
Kørselsforbud på bestemte strækninger i Kbh.centrum				-	Ja
Acceleration (m./s <sup>2</sup> )	1,1	1,1	1,1	0,74	0,36
Deceleration (m./s <sup>2</sup> )	2	2	2	2	1,34

**Tabel 1.** Koefficienter og andre forudsætninger for den endelige vejvalgsmode. *t*-værdier i parentes for koefficienter estimeret ud fra SP-data. Variation af koefficienter m.v. angives i procent i forhold til relevant middelværdi.

- For lastbiler blev der benyttet en Normalfordelt tidsvariation. Grundet problemer med logaritmisk normalfordeling i anvendelsessituationen / kalibreringen især for personbiler, men i mindre grad også for lastbiler, blev det for en sikkerheds skyld besluttet ikke at transformere den estimerede normalfordeling til en logaritmisk normalfordeling. Begge tidsvariable antages fuldt korrelerede, men med forskellige koefficienter.
- Tunnelafgift blev ikke multipliceret en koefficient (en krone tunnelafgift opleves ikke værre end 'out-of-pocket-cost').
- Skaleringen af længdeafhængig kørselsomkostning for personbiler blev foretaget efter en fast faktor for alle turformål. SP-spillenes estimation af en meget høj omkostning for erhvervsbiltrafik ledte til et meget lavt forhold mellem tid og omkostning herfor, så erhvervsbilisternes præferencer for tid i forhold til længde var lavest af alle. Dette er ikke intuitivt logisk, og gav endvidere urealistiske rutevalg i testene. I stedet blev det besluttet at benytte omregningsfaktorer svarende til Vejdirektoratets faktor for variabel kørselsomkostning. Ligeledes blev der benyttet en lav (igen svarende til Vejdirektoratets) variabel omkostning for vare- og lastbil.
- Den tilfældige variation (den stokastiske koefficient) blev estimeret i en sekventiel procedure: Først blev modellen med den bedste likelihood værdi blev kørt med en række forskellige stokastiske koefficienter. Valget herfra blev derefter benyttet i det videre



estimationsarbejde. Efter at den endelige model var valgt, blev den stokastiske koefficient reestimeret for denne model, ved at modellen blev kørt med en række forskellige stokastiske koefficienter. I begge tilfælde blev koefficienten 0,05 for personbiler og 0,1 for lastbiler (grundet større tidsværdier og tidsforbrug har lastbiler generelt en større værdi af nyttefunktionen og har derfor brug for en større stokastisk koefficient). Det bemærkes, at den stokastiske koefficient beskriver manglende kendskab til trafiknettet samt tilfældig variation i øvrigt. Derfor kan den kun estimeres ved simulering, da SP-eksperimenterne jo præsenterer korrekte tider for respondenterne.

- Under estimationsforløbet blev det fundet nødvendigt at indføre en maksimal hastighed for lastbiler (80 km./time) for at få et mere realistisk rutevalg. Ligeledes specificeres acceleration og deceleration for forskellige vogntyper.
- Under estimationen blev det endvidere fundet nødvendigt at indføre mulighed for at forbyde lastbiler på visse strækninger for at beskrive tvangsruter i Kbh.'s centrum.

## **7 KONKLUSION, DISKUSSION OG PERSPEKTIVER FOR VIDERE FORSKNING**

I en række tidligere arbejder og artikler af forfatterne er vejvalgsmodeller på det teoretiske niveau samt softwaremæssigt i stigende grad blevet forbedret. Derved er der opnået en række teoretiske fordele, og disse har været demonstreret ved forskellige tests på fuldskala modeller. Imidlertid er modellerne først i forbindelse med Havnetunnelprojektet blevet estimeret baseret på fuldskala RP- og SP-data.

Dette har først og fremmest empirisk dokumenteret fordelene ved at benytte fordelte koefficienter i vejvalgsmodellens nyttefunktionerne. Koefficienterne var endda meget signifikante og af en størrelsesorden, der var større end forventet. Ligesom den statistiske tilnærmelse til SP-data var betragteligt bedre end for de bedste traditionelle modeller uden fordelte koefficienter. Derved kan hovedparten af variationen mellem forskellige trafikanter inden for en gruppe tilskrives bevidste og systematiske variationer af koefficienterne (præferencerne), mens den tilfældige variation på strækningsniveau var langt mindre. Dette forkaster på afgørende vis hidtidige modeller, der tværtimod antager at koefficienterne er konstante og at al variation skyldes tilfældigheder.

Den store variation af koefficienterne kunne måske umiddelbart undre. Imidlertid har Hague Consulting Group samt MIT haft samme erfaringer fra forskellige andre studier og forskningsprojekter i Holland, England og Frankrig. Et interessant aspekt er, at variationen og størrelsen heraf ofte er korreleret med indkomstvariationen. Dette var også tilfældet for data i Havnetunnelprojektet.

Modellerne med fordelte koefficienter viste sig også i de sammenlignende test med diskrete valgmodeller at have nogle fordele. Dette vil kunne have betydning for efterspørgselsmodeller, herunder især for modeller for transportmiddelvalg.

I det konkrete projekt lykkedes det at inkludere valg af tunnel og betalingsvillighed i vejvalgsmodellen. En sådan kombineret model for vejvalg og betalingsvillighed er en afgørende forudsætning for at kunne vurdere konsekvenser af roadpricing på netniveau, samt at opnå en konsistent beskrivelse af sammenhængen med trafikefterspørgslen. Denne model vil generelt

kunne benyttes i hele landet. F.eks. er vejvalgsmodellen allerede benyttet i et eksamensprojekt på AUC, hvor roadpricing i Aalborg er vurderet.

På det teoretiske niveau kan estimationsmetoderne dog udvikles mere. Især metoder til estimering af logaritmisk normalfordelte koefficienter var ikke tilstrækkeligt udviklede. I data var der en stærk korrelation mellem indkomstfordelingen og fordelingen af tidskoefficienterne (begge log.normale), men p.g.a. estimationsrutinerne blev normalfordelingen dog foretrukket.

Et andet aspekt, som dog især har været fremherskende i København-Ringsted projektet (se Nielsen & Jovicic, 1999b) var ikke-lineære tidsværdier, der steg med turlængden. Dette problem kan negligeres, så længe et begrænset område betragtes (som. Storkøbenhavn i Havnetunnelmodellen). Men metoden bør tage højde herfor, hvis modellen f.eks. skulle dække hele landet.

**Tak til:** Andrew Daly og Hague Consult samt Goran Jovicic, TetraPlan for assistance i forbindelse med estimationen af modellen. Christian Overgaard Hansen og Henrik Paag, TetraPlan for faglige diskussioner under arbejdet. Nikolaj Simonsen for sin store indsats vedr. det praktiske arbejde med såvel vejvalgsmodel som matrixestimation. Erik Rude Nielsen, Banestyrelsen Rådgivning, for hjælp til GIS-analyser i forbindelse med modellens kalibrering, validering og kvalitetssikring. Vejdirektoratet og Trafikministeriet takkes for finansiering af arbejdet, samt for tillid til konsortiets forslag til at benytte en så ny og avanceret metode.

## 8 REFERENCER

Ben-Akiva, M., Bolduc, D. & Bradley, M. (1993). Estimation of Travel Choice Models with Randomly Distributed Values of Time. *Transportation Research Record*. 1413, pp. 88-97.

Nielsen, O. A. (1996). Do Stochastic Traffic Assignment Models Consider Differences in Road Users Utility Functions? *24th European Transport Forum (PTRC Annual Meeting)*. Seminar M, Vol. II. Uxbridge, UK.

Nielsen, O. A. (1997a). On the distribution of the stochastic component in SUE traffic assignment models. *European Transport Forum (PTRC Annual Meeting)*. Seminar F, Transportation Planning Methods, Vol. II, p.77-94. Uxbridge, U.K.

Nielsen, O. A. (1997b). Estimation af turmatricer ud fra snittællinger – to metoder. *Trafikdage på AUC*, Konferencerapport 2, pp. 377-390.

Nielsen, O. A. (1998a). A large-scale stochastic Multi-class Traffic Assignment Model for the Copenhagen Region. *Triennial Symposium on Transportation Analyses*. Proceedings, Part II. Puerto Rico, June.

Nielsen, O. A., Frederiksen, R. D. & Simonsen, N. (1998b). Stochastic User Equilibrium Traffic Assignment with Turn-delays in Intersections. *International Transactions in Operational Research*. Vol. 5, No.6, pp. 555-568. Pergamon.

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

Nielsen, O. A. (1998d). Two new methods for estimating Trip Matrices from Traffic Counts. 'Travel Behaviour Research: Updating the state of play'. Redaktører: Ortúzar, H.D., Hensher, D & Jare-Díaz, D. Elsevier Science Ltd. Oxford, UK. 1998. pp. 221-250.

Nielsen, O.A. (1999a). A Stochastic Transit Assignment Model Considering Differences in Passengers Utility Functions. Publiceres i *Transportation Research Part B*.

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

Paag, H. & Jensen, H. N. (1999). havnetunnel i København. *Trafikdage på AUC*.

## BILAG 1 ESTIMATION AF VEJVALGSMODELLER FOR VARE- OG LASTBILER

Estimationen af vejvalgsmodellen for vare- og lastbiler fulgte følgende trin:

1. Først blev der estimeret en konventionel model, dvs. en diskret valgmodel uden fordelte koefficienter. Første trin i denne estimation var estimering af modeller, hvori der kun indgik tidsværdier (fri køretid og forsinkelse). Derefter blev der estimeret en valgmodel for tunnel versus bro, hvor tunnelen indeholdt afgift. Her blev der skelnet mellem myldretid og ikke myldretid samt tunnel versus bro i forskellige træstrukturer. Endelig blev en kombineret model for tidsværdi og valg af tunnel estimeret.
2. Dernæst blev der estimeret modeller med fordelte koefficienter. Her blev der benyttet en estimationsmetode, der bygger på simulering. Derfor var det indledningsvist nødvendigt at foretage tests af seed-værdier og antal iterationer. Derudover blev variation for den enkelte respondent versus forskellige respondenter testet.
3. En række forskellige modeller med fordelte koefficienter blev derefter estimeret: Først en ren model med en fordelt koefficient for omkostning, dernæst med andre typer fordelte koefficienter. Førstnævnte gav det bedste resultat.
4. Dernæst blev der estimeret en model med fordelte koefficienter, der skulle tilnærme den bedste model uden fordelte koefficienter fra trin 1 (modellen med træstruktur). Dette blev gjort ved at tilføje dummy-led for tunnel/bro og myldretid/ikke myldretid, hvortil fordelingerne blev tilknyttet. Det viste sig, at en sådan tilnærmelse var mulig. Det bemærkes, at den bedste konventionelle model var en nestet logitmodel, mens modellen med fordelte koefficienter var en hybrid logit/probitmodel uden træstruktur, idet variationen i stedet som nævnt blev lagt på dummyerne. I diskrete valgmodeller med få alternativer, gav de to modeller et sammenligneligt resultat. Imidlertid kan logit-modeller med en træstruktur ikke implementeres i trafiknet (rutevalgsmodeller), idet omskrivninger svarende til formel 7 ikke er mulige herfor. Dette er derimod muligt med fordelte koefficienter. Sidstnævnte muliggør således en kombineret valgmodel for rute, bro/tunnel og myldretid/ikke myldretid.
5. Den konventionelle model fra trin 2 uden træstruktur blev efterfølgende sammenlignet med modellen med fordelte koefficienter fra trin 3. Det viste sig her, at modellen med fordelte koefficienter gav det bedste resultat.
6. Endelig blev der estimeret en model med fordelte koefficienter ud fra samme data som den konventionelle model med træstruktur. Her viste det sig, at det ikke var muligt at estimere en tunnelkonstant (der f.eks. skulle fange 'tunnelfobi'). Således kunne valget af tunnel vurderes rent ud fra tunnelafgiften og vejvalgsmodellens øvrige variable.
7. Idet variationen mellem forskellige ruter er større hvad angår tid end omkostning (der er korreleret med længden), blev den estimerede fordeling af omkostningskoefficienten afslutningsvist transformeret til en fordeling af tidskoefficienten. Derudover blev tidsværdier og omkostninger tilbagediskonteret fra 1998-niveau (interviewåret) til 1992-niveau svarende til resten af trafikmodellens datagrundlag.
8. Den endelige model blev implementeret med variation af tiden. Idet variationen heraf var meget stor, blev det i første omgang besluttet ikke at trunkere den, men i stedet foretage en transformation til en logaritmisk normalfordeling (jo større varians jo større

sandsynlighed for trunkering). Imidlertid viste efterfølgende tests problemer ved visse ruter grundet den meget store variation af koefficienten (88%). Derfor blev det besluttet at gå tilbage til en trunkeket normalfordeling af koefficienterne.

## **BILAG 2 ESTIMATION AF VEJVALGSMODELLER FOR PERSONBILER**

Estimationen af vejvalgsmodellen for personbiler fulgte følgende trin:

1. Først blev der foretaget en række tests af korrelation mellem længde og tunnelafgift, hvor det blev konkluderet, at de to var fuldt korrelerede.
2. En række modeller blev estimeret ud fra spillene om tid versus omkostning. For alle turformål, gav modellerne med Normal-fordelte koefficienter bedre resultater end de traditionelle modeller uden fordelte koefficienter.
3. Derefter blev der foretaget en række test af logaritmisk Normal-fordelte koefficienter. Imidlertid var estimationsmetoderne ikke helt så avancerede som for normalfordelingen, og resultaterne var ikke vellykkede. De efterfølgende tests af logaritmisk normalfordelinger benyttede derfor i stedet transformerede Normalfordelinger, hvor middelværdi og varians fastholdes på samme værdi som for Normalfordelingen.
4. Dernæst blev valgstrukturen for hhv. tunnel og broer i og uden myldretiden estimeret v.h.a. en traditionel nestet model, der blev sammenlignet med den stokastiske model. Det blev konkluderet, at resultaterne var sammenlignelige. Dette dokumenterer som for vare- og lastbiler, at modellerne giver stort set det samme i det binære tilfælde, mens den stokastiske model jvf. diskussionen i afsnit 2 har store fordele i tilfælde, hvor der regnes rutevalg på det fulde net.
5. Den følgende estimation kombinerede rutevalg (tunnel versus bro) og tidsværdi (stokastiske modeller). Det er værd at notere sig, at såvel koefficienter som variation heraf ikke afveg markant mellem den mere avancerede kombinerede model, og den tidligere model i trin 2 (bortset fra enkelte segmenter). Dette viser en rimelig konsistent i respondenternes svar.
6. Som for vare- og lastbilmodellerne bemærkes det, at tunneldummyen ikke var signifikant.