

UDVIKLING AF RUTEVALGSMODELLER – FRA HEURISTISK TIL TEORETISK GRUNDLAG

Forskningsprofessor Otto Anker Nielsen
Center for Trafik og Transportforskning, DTU. Bygning 115, st.tv. 2800 Lyngby
Tlf. 4525 1514. Fax. 4593 6412. Email: onielsen@ivtb.dtu.dk

INDLEDNING

Igennem de sidste år har jeg som en del af min forskning fokuseret på metodiske forbedringer af rutevalgsmødelles, samt den efterfølgende anvendelse heraf i danske trafikmødelles og -prognoser. Dette har medført en række artikler, der hver for sig beskriver forskningsmæssige enkeltbidrag eller anvendelsen heraf i praksis¹. Med opslaget af Trafikforskningsprisen, fandt jeg en god lejlighed til at sammenskrive disse bidrag på en mere oversigtsmæssig form i nærværende artikel².

Baggrund

Trafikmødelles indgår ofte i beslutningsgrundlaget for nye infrastrukturprojekter, samt til taktisk og operationel planlægning hos trafikelskaber. Strategiske trafikprognosemødelles benyttes også mere bredt til vurdering af trafikpolitiske virkemidler, f.eks. afgiftspolitik, roadpricing og påvirkning af arealanvendelse.

Operationelt og taktisk orienterede mødelles, beregner ofte først trafikefterspørgsel (antal ture, fordeling mellem destinationer, transportmiddelvalg og afgangstidspunkt) og derefter trafikanternes rutevalg. Strategiske mødelles indrager også overordnede valg, vedr. bilejerskab og lokalisering.

I praksis lægges der ofte et stort arbejde i at opbygge og estimere *efterspørgselsmødelles*, der som regel tager udgangspunkt i stokastisk nytteteori. Dette sikrer konsistens mellem de forskellige delmødelles, og gør det muligt at estimere mødellesne statistisk ud fra en kombination af aggregerede data (tællinger, turmatricer, o.l.) og disaggregerede data (interviewundersøgelser). Efterspørgselsmødelles opbygges derudover typisk af en række sideordnede mødelles for forskellige turformål og trafikantgrupper.

Derimod har der i såvel praksis som forskning været betydeligt mindre fokus på *rutevalgs-mødelles*. Som regel benyttes forskelligt standardsoftware, hvori en række adfærdsmæssige antagelser er indbygget implicit. Således er det ikke muligt at formulere mødellesne ud fra stokastisk nytteteori og gennemføre en statistisk estimation på samme måde som for efterspørgselsmødelles. Ydermere lægges trafikken ofte samlet ud på trafiknettet, hvorved der ikke skelnes mellem turformål og trafikantgrupper på samme måde som i efterspørgselsmødellesne.

¹ Artiklen henviser dog kun til de metodisk væsentligste artikler, mens en række mere praktisk orienterede artikler ikke indgår i referencelisten.

² Artiklen er revideret en smule i forhold til den indsendte artikel, idet enkelte referencer o.l. er opdateret med udviklingen det sidste halve år.

En række eksperimenter på CTT/DTU har vist, at forskellige softwarepakker (f.eks. de i Danmark meget udbredte TRIPS og EMME/2 programmer) giver endog meget forskellige resultater hvad angår ruter mellem to givne lokaliteter. Dette er i særlig grad et problem for kollektiv trafik, hvor der i visse tilfælde fremkommer totalt forskellige ruter (Brems, 1997). I praksis har det i forskellige arbejder givet sig udtryk i meget store forskelle på trafikprognoser for konkrete anlæg.

I virkeligheden udgør ændringer i rutevalg ofte den største effekt af trafikprojekter. Eksempelvis skal der ske ret store ændringer, før befolkningen skifter arbejdsplads og bopæl som følge af trafikprojekter. Derved ændres turfrekvens og destinationsvalg kun langsomt. Ligeledes er der en forholdsvis lille krydselasticitet for valg af transportmiddel. Derimod vil ændringer i vejnettet fra dag til dag medfører ændringer i bilisters rutevalg, ligesom ændringer i det kollektive net også hurtigt medfører ændringer i passagers rutevalg.

Således har rutevalgsmodeller stor betydning for kvaliteten af de samlede trafikmodeller og -prognoser. Rutevalgsmodeller har således hverken i forskning eller praksis haft den fokus, de burde.

Om artiklen

Artiklen begynder i afsnit 2 med en kort historisk gennemgang af udviklingen af rutevalgsmodeller. Derefter gennemgås metodiske udvidelser af modellerne; Afsnit 3 med forskellige undersøgelser og anbefalinger for formulering af modellernes stokastiske del, afsnit 4 med udvidelser for at kunne tage hensyn til flere trafikantklasser svarende til efterspørgselsmodellens detaljeringsgrad, og afsnit 5 med metoder til at tage hensyn til forskelle i trafikanters præferencer inden for den enkelte klasse.

Afsnit 6 beskriver vejspecifikke kapacitetsforhold, og afsnit 7 en mere generel model for vejvalg, der blev udviklet i forbindelse med Havnetunnelprojektet.

Tilsvarende gennemgår afsnit 8 specielle forhold for modellering af passagerers rutevalg, hvorefter afsnit 9 beskriver estimationen af den kollektive rutevalgsmodel, der blev udviklet til brug i forbindelse med VVM-redegørelsen af København-Ringstedprojektet.

Artiklen afsluttes med nogle generelle konklusioner samt anbefalinger for fremtidig forskning.

Historisk vue

Teorigrundlaget for rutevalgsmodeller udviklede sig i 1960'erne og 80'erne sig fra rent heuristiske metoder, til modeller baseret på et mere genarbejdet teorigrundlag.

Alt-eller-intet

Den simpleste rutevalgsmodel er alt-eller-intet modellen, der bygger på følgende princip:

Den enkelte trafikant minimerer den deterministiske rejsemodstand.

Rejsemodstanden indeholder en sammenvægtning af forskellige variable vedr. trafiknettet, f.eks. hastighed og længde. Alt-eller-intet modellen rummer en række begrænsninger, herunder følgende implicite antagelser:

- Trafikken afvikles frit og uden nogen form for forsinkelser.
- Trafikanterne har fuldt kendskab til trafiknettet.
- Alle trafikanter er ens og har samme præferencer.

Modellen kan også formuleres med en slags pseudonotation som i formel 1³.

$$(1) \quad T_{ijar} = \max_R \left[U_R = - \sum_{a \in R} c_a \right]$$

Hvor T er trafikken fra i til j på strækning a (arc på engelsk) ad rute r . R er ruten for den enkelte trafikant (altså en sekventiel liste af strækninger a) og U er 'nyttens' (på engelsk utility) for den enkelte trafikants rute. Idet stokastisk nytteteori normalt bygger på nyttemaksimering, er der indført et minus i ovennævnte notation, nyttens har altså modsat fortegn af rejsemodstanden c_a , og kan derudover indeholde mere generelle variable (jf. de følgende afsnit).

Eller med en mere kompakt notation angivet på strækningsniveau:

$$(2) \quad U_a = -c_a$$

Sidstnævnte notation benyttes i de følgende afsnit for modeller af stigende kompleksitet.

Kapacitetsafhængige modeller - brugerligevægt

De første udvidelser af ovennævnte meget simple rutevalgsmodel skete i 1960'erne, hvor man ønskede at kunne tage hensyn til kapacitetsproblemer i trafiknettet. Trafikken fra rutevalgsmodellerne skulle derfor påvirke rejsetiderne i trafiknettet, der igen ville medføre en reallokering af ruterne.

I den forbindelse blev der udviklet en række forskellige algoritmer, f.eks. 'incremental

³ Notationen beskriver den tilstand, som modellen opfylder. Der er altså ikke tale om formulering af modellen som et matematisk program, som derefter løses. Formuleringen af alt-eller-intet modellen - og i særlig grad de følgende modeller - som matematiske programmer og løsningen heraf (inkl. beviser for opfyldelse af grundforudsætninger, entydighed, konvergens, m.v.) er så kompliceret, at artiklen henviser til relevant litteratur herfor i stedet for en udførlig gennemgang.

loading' og 'capacity restraint' (se Nielsen, 1994). Fælles for disse algoritmer var, at de ikke var særligt stabile⁴, at de ikke nødvendigvis konvergerede mod en entydig løsning⁵, og at de ikke byggede på et egentligt teorigrundlag, der kunne forklare løsningen.

En mere generel formulering af kapacitetsafhængige modeller er den såkaldte bruger ligevægt⁶:

En ligevægt opnås, hvor ingen trafikants deterministiske⁷ rejsemodstand⁸ kan formindskes ved, at den pågældende alene skifter rute.

Det er værd at bemærke, at brugerligevægt ikke er det samme som systemligevægt, hvor den samlede nytte i hele systemet maksimeres (Wardrop, 1952). Et af formålene med mange mindre justeringer af trafiknet - og på sigt måske også road pricing - er implicit at påvirke brugerligevægten mod en systemligevægt. I de modeller, der præsenteres i de følgende afsnit generaliseres ovennævnte ligevægt yderligere. Med notationen fra før kan brugerligevægten også formuleres som (med $c = t$):

$$(3) \quad T_{ijar} = \max_R \left[U = - \sum_{a \in R} t_a \right]$$

$$u.b. \quad t_a = f(T_a, t_{a(0)})$$

Eller med den kompakte notation:

$$(4) \quad U_a = -t_a$$

$$u.b. \quad t_a = f(T_a, t_{a(0)})$$

Idet formuleringen af brugerligevægt som et egentligt matematisk program, samt løsningen heraf, er ganske omfattende henvises til Sheffi (1995) for en komplet gennemgang og Nielsen (1994) for en mere oversigtsmæssig. Det bemærkes, at den mest benyttede løsningsalgoritme, Succesive gennemsnits metode (Method of Succesive Averages, MSA), er benyttet til løsning af samtlige udvidelser af rutevalgsmodellerne, beskrevet i det følgende. For ren brugerligevægt, kan algoritmen optimeres på forskellig vis, hvorved den konvergerer ret hurtigt (Ibid.).

⁴ En marginal ændring af en udbudsvariabel kunne resultere i et markant forskelligt resultat.

⁵ F.eks. viste tests af capacity restraint metoden i Nielsen (1994), at den selv for meget simple net kunne fluktuere cyklisk mellem forskellige løsninger uden at konvergere mod en entydig løsning.

⁶ User Equilibrium (UE). Se Sheffi (1985), og Nielsen (1994) for en grundigere gennemgang.

⁷ 'Deterministisk' er en præcisering af undertegnede, idet dette normalt antages implicit.

⁸ De fleste modeller for bruger equilibrium, har simplificeret rejsemodstanden til kun at omfatte én variabel, *rejsetid*. I afsnit 4 generaliseres formuleringen til at inkludere flere variable.

Stokastiske modeller

Stokastiske modeller antager i deres simpleste form, at der er en vis tilfældig variation mellem forskellige trafikanters nyttefunktioner, eller rettere opfattelse og kendskab til trafiknettet:

Den enkelte trafikant minimerer sin opfattede (stokastiske) rejsemodstand.

Fordelen ved stokastiske modeller er, at de fordeler trafikken mere jævnt mellem ruter med næsten ens rejsemodstande. Hvis der eksempelvis ikke optræder kapacitetsproblemer, vil en deterministisk model allokere al trafik på én af ruterne på figur 1, mens en stokastisk model vil fordele trafikken på forskellige ruter. Sidstnævnte kan formuleres med en nyttefunktion, hvor rejsemodstanden (her blot tiden t) adderes et stokastisk led ε_a ⁹:

$$T_{ijar} = \max_R \left[U = - \sum_{a \in R} (t_{a(0)} + \varepsilon_a) \right] \quad (5)$$

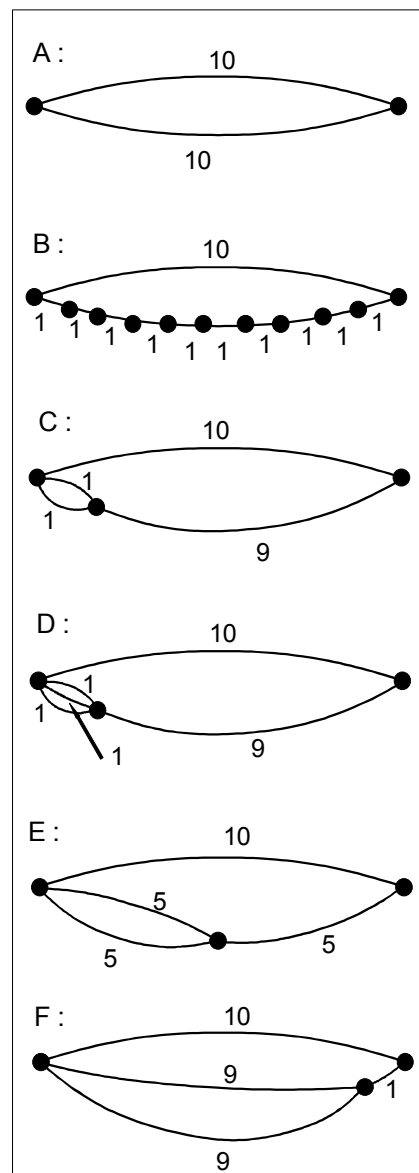
Eller med den kompakte notation:

$$U_a = -(t_a + \varepsilon_a) \quad (6)$$

Dial (1971) formulerede en stokastisk model som et matematisk program, hvor nyttefunktionen betragtede de samlede ruter. De stokastiske led på ruteniveau blev antaget at være uafhængigt identisk Gumbelfordelt, hvorved en matematisk bekvem model, *logitmodellen*, kunne udledes (se afsnit 5.1). Dial fandt en effektiv løsningsalgoritme, der undgik simulering.

Antagelsen om uafhængighed fører imidlertid til en række problemer i net, hvor der er overlappende ruter. Eksempelvis vil logit-modellen fordele trafikken ligeligt på ruterne i alle nettene i figur 1. Derved vil få varianter af principielt samme rute medføre mere trafik på denne rute. Typisk er der en lang række forskellige mulige ruter gennem trafik- og lokalvejnet i byområder, mens en omfartsvej eller motorvej kun repræsenterer én rute. Således vil logit-modeller ofte undervurdere trafik på det overordnede vejnet, og overvurdere trafikken på mindre trafikveje og andre veje i byområder.

For at komme dette problem til livs foreslog Daganzo & Sheffi (1977) at benytte probit-



Figur 1. Test af overlappende ruter med forskellige rejsemodstande.

⁹ I nærværende artikel ses bort fra rent heuristiske stokastiske rutevalgsmodeller. For en gennemgang heraf henvises til Nielsen (1994).

baserede rutevalgsmodeller¹⁰. Og de viste, at sandsynligheden for, at en given strækning eller rute benyttes, kan beskrives med en multinomial normalfordeling (probit-model), under følgende forudsætninger:

- Ikke overlappende strækninger opfattes uafhængigt.
- Strækninger med samme gennemsnitlige rejsemodstand har samme fordeling af opfattede modstande.
- De opfattede rejsemodstande, $c_{a(\epsilon)} = t_{a(\epsilon)}$, er normalfordelte med middelværdi lig rejsemodstanden og varians proportional hermed, $c_{a(\epsilon)} \in N(c_a, err \cdot c_a)$.

Sheffi & Powell (1981) fremlagde en operationel løsningsalgoritme, der blev udledt under disse forudsætninger - igen den successive gennemsnits metode. Denne er bl.a. præsenteret i Nielsen (1996b). I forhold til den logit-baserede model, konvergerer løsningsalgoritmen betydeligt langsommere, idet den involverer simulering. Forskellige forskere har forsøgt at optimere algoritmen, dog uden at bevise, at konvergens er bedre. Andre har foreslået alternative løsningsalgoritmer, men ingen af disse er bevist at konvergere mod en probit-baseret løsning.

Et vigtigt element af den probit-baserede model er, at rejsemodstandene på strækningsniveau er additive: Formel 7 skal bevares, også hvis X splittes op i 2 variable. Overtrædes denne betingelse, opnås ikke den ønskede fordeling på overlappende ruter (net A og C-F i figur 1), ligesom net af typen A og B giver forskelligt resultat.

$$VAR(X_a) = E(X_a) \cdot err \quad \forall X_a$$

(7)

Hvor err er en såkaldte *errorterm*, der er konstant for hele modelnettet.

En interessant udvikling er en nylig Ph.D.-afhandling (Bekhor, 1999), der foreslår brug af de såkaldte Paired Combinatorial Logit Modeller (PCL) eller krydsnastede logit modeller (Cross-Nested Logit, CNL). Såfremt det lykkes at udvikle fuldskala løsningsalgoritmer, vil disse tilnærmelsesvis opnå fagligt lige så tilfredsstillende løsninger som Probitmodellen, men med hurtigere konvergens. For mindre netværk har Nuzzolo m.fl. (1997) udviklet den såkaldte C-logit model, der også undgår nogle af logit-modellens begrænsninger. Men algoritmen er ikke velegnet for store trafiknet.

¹⁰ En probitmodel vil allokere halvdelen af trafikken på hver hovedrute i net A og B i figur 1, lidt mere på den anden hovedrute i net B og D (går mod 50% des mere overlap), ca. 1/3 på de tre ruter i net F (lidt mere på den første rute), og noget midt imellem på net E (se Nielsen, 1994, for grundigere tests).

Stokastiske kapacitetsafhængige modeller – stokastisk brugerligevægt

I mange trafiknet, er der både områder med kapacitetsproblemer (f.eks. indfaldsvejene til Kbh., bybusser og toglinier mod centrum i morgenmyldretiden) og områder uden kapacitetsproblemer, hvor der er mulighed for flerrutevalg (f.eks. trafik mod pendlingsretningen, yderområder, trafik uden for myldretiden). Det vil således som regel være nødvendigt at kombinere principperne om brugerligevægt (afsnit 2.2) med stokastisk rutevalg (afsnit 2.3) til en stokastisk bruger ligevægt (Stochastic User Equilibrium, SUE) :

En ligevægt opnås hvor ingen trafikants opfattede rejsemodstand kan formindskes ved, at den pågældende alene skifter rute'

Med notationen fra før kan SUE formuleres som (med rejsemodstand t):

$$(8) \quad T_{ijar} = \max_R \left[U = - \sum_{a \in R} (t_a + \varepsilon_a) \right]$$

$$u.b. \quad t_a = f(T_a, t_{a(0)})$$

Eller med den kompakte

notation:

$$U_a = -(t_a + \varepsilon_a)$$

$$u.b. \quad t_a = f(T_a, t_{a(0)})$$

Daganzo og Sheffi (1977) formulerede SUE som princip og matematisk program, og Sheffi & Powell (1982) fandt en operationel løsningsalgoritme hertil (igen successive gennemsnits metode). Løsningsalgoritmen kan bygge på såvel logit- som probit-baseret rutevalg. I sidstnævnte tilfælde benyttes simulering. Og som for den probit-baserede model, er der ikke fremkommet brugbare alternativer hertil.

SUE finder en løsning, hvor de enkelte trafikanter *tror*, at de minimerer rejsemodstanden. Et af formålene med trafikinformatik kan være at øge trafikanternes information for at rykke SUE mod bruger equilibrium (UE). Imidlertid kan trafikinformatik også medføre fluktuationer i trafikken, hvorved løsningen bliver ringere end såvel SUE som UE. Se evt. Sørensen & Nielsen (2000) for eksempler herpå.

uNDERSØGELSER AF modellernes STOKASTISKe ADFÆRD

I Nielsen (1994 & 1996a) blev det vist, at der i praksis kan opstå en række problemer med opfyldelsen af stokastiske rutevalgmodellers teoretiske betingelser. Forskellige aspekter heraf beskrives i det følgende.

Tilfældighedsgenerator

Ved implementeringen af rutevalgmodellen i Frederiksen & Simonsen (1997), der blev benyttet på et meget stort trafiknet, opstod en række uforklarlige problemer med at opnå de forventede løsninger. Det viste sig, at tilfældighedsgeneratoren i standard ANSI C (Nielsen, 1997), var cyklisk med en i forhold til rutevalgsalgoritmen for kort periode. Metoder til at undgå dette problem beskrives i Ibid.

Konvergensadfærd

Konvergens af Successive gennemsnits metode er behandlet mange steder i litteraturen¹¹. To hovedtyper af konvergens og stopkriterier er foreslået:

1. At sammenligne resultater (f.eks. trafikstrømme og rejsetider) fra de sidste to iterationer, eller at analysere summen af strækningsomkostninger eller transportarbejdet per iteration.
2. At sammenligne endelige resultater med trafiktællinger eller målte rejsetider.

Første kriterium indikerer til en vis grad, om algoritmen konvergerer, mens det andet sikrer en fornuftig tilpasning på strækningsniveau (Nielsen, 1997). Som supplement til disse konvergenstests bør algoritmen køres to gange (med forskellige seed-værdier til simuleringen¹²), og forskellene mellem de to kørsler kan sammenlignes på strækningsniveau. Dette vil ofte klarlægge et behov for flere iterationer, end de to andre kriterier (Nielsen, 1996a).

I praksis har det vist sig nødvendigt at gennemføre ganske omfattende konvergenstests med brug af en kombination af forskellige statistiske mål og faglige vurderinger for såvel vejvalgsmodeller (GIS-T projektet, projekt til forbedring af Ørestadsmodellen og Havnetunnelprojektet) som kollektive rutevalgmodeller (GIS-T og København-Ringsted projektet). Eksempler på forskellige typer tests er beskrevet i Nielsen (1998a) og Nielsen, m.fl. (1998d & 2000a).

Fordelinger i simuleringen

Probit-baserede rutevalgmodeller antager normal-fordelt strækningsomkostninger, mens korteste vejs algoritmer (der er en del af løsningsalgoritmen) normalt kun virker på positive

¹¹ F.eks. af Powell & Sheffi (1982), Sheffi (1985), Van Vuren (1994) og Nielsen (1996a).

¹² Benyttes samme seed-værdi, vil modellen selvsagt give eksakt samme resultat. Dette skjuler imidlertid den grundlæggende usikkerhed, der f.eks. vil fremkomme i en beregning af et scenarium på ændrede netdata.

kantomkostninger¹³. Adfærdsmæssigt vil rejsemodstande – f.eks. tid og længde – derudover som regel også opfattes positive. Der kan dog være undtagelser ved ferierejser og ruter med exceptionel herlighedsværdi.

Problemet med negative udfald af normalfordelingen løses i praksis som regel ved, at den trunkeres. Imidlertid overtræder dette betingelserne i afsnit 2.3, herunder formel 7, og algoritmen konvergerer mod løsninger, der ikke tilfredsstillende ønskerne i figur 1. Sandsynligheden for trunkering stiger jo mindre middelværdien på de enkelte strækninger er (p.g.a. fast *err* i formel 7). Dette er et særligt problem for trafiknet med meget forskellige kantlængder, f.eks. vejstrækninger og svingbevægelser i vejvalgsmodeller, eller togafgange og skiftestræk i kollektive rutevalgsmodeller. Nielsen (1997) viste, at trunkeringen af normalfordelingen kan lede til væsentlige systematiske problemer i fuldskala modeller.

Som et alternativ er det foreslået at benytte andre fordelinger, der tilnærmer normalfordelingen med et tilstrækkeligt stort antal simuleringer (den centrale grænseværdisætning). Dette er kun en fordel, hvis sandsynligheden for trunkering under opfyldelse af formel 7 på den enkelte strækning er mindre end for normalfordelingen med samme *err*. Nielsen (1997) testede en række fordelinger, hvorved det viste sig, at den rektangulære som regel gav et bedre resultat end normalfordelingen, men dog ikke et fuldt tilfredsstillende resultat. I Nielsen m.fl. (2000c) benyttes i stedet en Gamma fordeling. Gamma fordelingen er positiv (trunkering undgås), reproduktiv (under opfyldelse af formel 7, jf. bevis i Nielsen & Jovicic, 1999a) og viste sig i praksis, at tilnærme normalfordelingen langt bedre end den trunkerede normalfordeling. Derved var der i Havnetunnelprojektet for første gang opnået en tilfredsstillende implementering af en stokastisk kapacitetsafhængig model.

UDVIDELSE TIL MODELLERING AF FLERE TRAFIKANTKLASSER

I rutevalgsmodellerne beskrevet ovenfor, blev det antaget, at alle trafikanter betragtes som én gruppe. Imidlertid bør forskelle mellem forskellige grupper ofte behandles eksplicit, f.eks. fordi:

- Bolig-arbejdsstedsrejsende samt lastbilchauffører kan have en bedre viden om vejnettet end andre rejsende.
- Erhvervsrejsende har generelt en højere tidsværdi end andre rejsende.
- Lastbiler accelererer, decelererer og drejer langsommere end personbiler.
- Efterspørgselsmodeller har typisk en flertrafikanterklasse-struktur, hvorfor en tilsvarende struktur i rutevalgsmodellen vil sikre en vis intern konsistens i modelkomplekset.

¹³ Korteste vejs algoritmer, der tillader negative kantomkostninger, har en betydeligt højere beregningskompleksitet, og vil derfor i praksis medføre uacceptabelt høje regnetider.

- Rejsende påvirker hinanden på tværs af trafikantklasser, f.eks. på grund af forsinkelser på vejstrækninger og interaktion i vejkryds.

En flerklasse brugerligevægt kan formuleres på følgende måde (Nielsen, 1998a):

En ligevægt opnås, hvor ingen trafikants opfattede rejsemodstand, bestemt af trafikantklassens nyttefunktion og af køretøjets type, kan formindskes ved at den pågældende alene skifter rute.

Eller formuleret med den kompakte notation (hvor det negative fortegn er flyttet ind i koefficienterne, der derved skal være negative):

$$U_{ak} = \beta_{ck} \cdot c_{ak} + \beta_{tk} \cdot t_{ak} + \varepsilon_{ak} \quad (10)$$

$$u.b. \quad t_{ak} = f\left(\overline{\overline{T_{ak}}}, \overline{\overline{t_{ak(o)}}}\right)$$

Hvor tidsforbruget for en bestemt trafikantklasse k på en bestemt strækning a afhænger af trafikken T og tidsforbruget t for den pågældende klasse såvel som for andre klasser på strækningen, og evt. også på andre strækninger (se afsnit 6).

Flerklasse brugerligevægte er diskuteret i betydeligt omfang i den teoretiske litteratur¹⁴, men det var først i forbindelse med opdateringen af Ørestadsmodellen (Nielsen m.fl., 1998d), at en model baseret på probit-baseret stokastisk brugerligevægt blev implementeret i fuld skala.

FORSKELLE i trafikanters PRÆFERENCER

De stokastiske modeller i afsnit 2.3 antog, at alle trafikanter i princippet har samme nyttefunktion (præferencer) bortset fra en vis tilfældig variation. I afsnit 4 blev rutevalgsmodellerne udvidet med flere trafikantklasser, hver med sin nyttefunktion. Imidlertid var der stadig ingen variation inden for den enkelte klasse. Nærværende afsnit beskriver udvidelsen af rutevalgsmodeller til at beskrive en sådan variation. Idet nyttefunktionerne derved bliver ret komplicerede, beskrives også metoder til at estimere disse ud fra interviewdata. Som grundlag herfor, beskrives den traditionelle logit-model mere grundigt end i afsnit 2.3.

Den traditionelle logitmodel

Diskrete valgmodeller antager, at rejsende vælger alternativ i blandt n alternativer, når i har den største nytte. En stokastisk nyttefunktion af i antages at bestå af en deterministisk del V_i og en tilfældig del ε_i (generaliseret version af formel 6):

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad (11)$$

¹⁴ Nielsen (1998a) giver et overblik vedrørende flerklassermodeller, mens Nielsen m.fl. (1998d) beskriver teorigrundlaget for modeller for påvirkning af trafik mellem forskellige strækninger (kanter i beregningsgrafem).

Logit modellen forudsætter som nævnt i afsnit 2.3, at ε_i er uafhængigt identisk Gumbelfordelt over alternativer og rejsende. Idet den enkelte trafikant antages at maksimere sin nytte, kan følgende valgmodel udledes (se f.eks. Nielsen, 1994, for en nærmere gennemgang):

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^n e^{V_j}}$$

(12)

Den deterministiske nytte V_i antages yderligere ofte at være en lineær funktion af rejsetid t_i og omkostning c_i :

$$V_i = \beta_c c_i + \beta_t t_i,$$

(13)

Hvor β_c og β_t er hhv. omkostnings- og tidskoefficienter.

Den implicitte tidsværdi er det *konstante* forhold mellem koefficienterne $v_i = \beta_t / \beta_c$. Imidlertid har forskellige trafikanter i virkeligheden ofte forskellige præferencer og derved forskellige tidsværdier. Antagelsen om konstant tidsværdi kan slækkes ved at segmentere efter f.eks. turformål, transportmidler og indkomst (dvs. en flerklasse model). Imidlertid vil tidsværdien stadig være den samme for *alle personer inden for en gruppe*, idet modellen opbygges som en række sideordnede logit-modeller.

Logitmodeller kan således forklare tilfældig (identisk uafhængigt fordelt) variation af nyttefunktionen mellem personer, mens de ikke kan beskrive forskelle mellem præferencer (koefficienter) inden for én gruppe.

Udvidet nyttefunktion med stokastiske koefficienter i rutevalgmodeller

I modeller med fordelte koefficienter tillades der derimod *variation af koefficienterne* inden for den enkelte gruppe. Med den kompakte notation fra før, kan det eksempelvis formuleres som:

$$U_{ak} = (\beta_k + \xi_{\beta k}) \cdot c_{ak} + (v_k + \xi_{v k}) \cdot t_{ak} + \varepsilon_{ak}$$

(14)

$$u.b. \quad t_{ak} = f(\overline{\overline{T_{ak}}}, \overline{\overline{t_{ak(o)}}})$$

hvor ξ angiver variation af koefficienterne β og v , altså bevidst variation af præferencer, mens ε_a er en vektor for manglende kendskab til trafiknettet (a) og anden 'tilfældig variation'.

Første gang en sådan model blev foreslået for rutevalg var i Nielsen (1996a), mens Ben-Akiva, m.fl. (1993) beskrev en diskret valgmodel med fordelte koefficienter. Dial (1997 & 1999) har udledt modeller med fordelte koefficienter (men uden strækningsstokastik og flerklassevalg), og fundet meget effektive løsningsalgoritmer for disse særtilfælde.

I praksis kan rutevalgmodeller med fordelte koefficienter estimeres efter følgende fremgangsmåde:

1. En diskret valgmodel med fordelte koefficienter estimeres ud fra interview undersøgelser, såkaldte Stated Preference analyser (SP). Heri præsenteres respondenterne for et begrænset antal alternativer i (typisk binære valg), i stedet for trafiknet af dimensionen a .
2. Koefficienter overføres til rutevalgmodellen, hvorefter den manglende kendskab til trafiknettet ε_a findes eksperimentelt ved sammenligning med aggregerede data.

I det følgende gennemgås fremgangsmåden vedr. formulering og estimering af diskrete valgmodeller, mens afsnit 7 og 9 giver eksempler på fremgangsmåden i praksis for hhv. vejvalgsmodeller (Nielsen, m.fl. 2000c) og rutevalgmodeller for kollektiv trafik (Nielsen & Jovicic, 1999a).

Fordelte koefficienter i diskrete valgmodeller

Med *fast* tidsværdi v_t fås ved omskrivning af formel 13 følgende nyttefunktion:

$$U_i = \beta_c (c_i + v_t t_i) + \varepsilon_i \quad (15)$$

Og derved (ved indsættelse i formel 12):

$$P(i | v_t) = \frac{e^{\beta_c (c_i + v_t t_i)}}{\sum_{j=1}^n e^{\beta_c (c_j + v_t t_j)}} \quad (16)$$

Hvis tidsværdien derimod f.eks. antages at være logaritmisk normalfordelt fås:

$$\ln(v_t) \in N(\omega, \sigma^2) \quad (17)$$

Hvor $\omega = E(\ln(v_t))$ er middelværdien, og σ^2 den tilhørende varians.

Frekvensfunktionen for v_t er da:

$$f(v_t) = \frac{1}{\sigma \cdot v_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left[\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(v_t) - \omega}{\sigma} \right)^2 \right]}, \quad v_t > 0 \quad (18)$$

Og den betingede sandsynlighed for at vælge i givet at ε_i er uafhængigt identisk Gumbelfordelte, og v_t er lognormal fordelt¹⁵:

¹⁵ Se Ben-Akiva m.fl., (1993), for udledning af formlen, samt nærmere gennemgang af modellens statistiske egenskaber. Den sædvanlige logitmodel er et særtilfælde af denne valgmodel, nemlig når v_t er konstant ($\sigma^2 = 0$).

$$P(i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^\infty \frac{e^{\beta_c(c_i+v_it_i)}}{\sum_{j=1}^n e^{\beta_c(c_j+v_it_j)}} \cdot \frac{1}{v_t} \cdot e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(v_t)-\omega}{\sigma}\right)^2\right]} dv_t$$

(19)

Denne model er den mindst komplicerede model med fordelte koefficienter (præferencer). Bemærk, at variationen heraf relaterer til tidsforbruget, idet tidsværdien v_t multipliceres med tidsforbruget i det enkelte alternativ, der derved ikke er uafhængigt identisk fordelt.

I afsnit 5.5, 7 og 9 præsenteres mere komplicerede nyttefunktioner, hver med forskellige fordelinger af koefficienterne. De fuldstændige formler anføres af pladshensyn imidlertid ikke i artiklen, ligesom de ret komplicerede estimationsteknikker kun omtales i generelle vendinger.

Årsager til variation af koefficienter og til tilfældig variation

Variationen af koefficienterne og den tilfældige variation kan deles i variation mellem personer og variation i den enkelte persons valg (se tabel 1). Eksplicit skelnen herimellem har stor betydning ved estimation af diskrete valgmodeller (Stated Preference eksperimenter). Det er derimod ikke nødvendigt at skelne ved den efterfølgende overførsel af koefficienterne til rutevalgmodeller. Nielsen & Jovicic (1999a) samt Nielsen m.fl. (2000c) diskuterer mere grundigt estimationsmetoder, herunder med henvisning til en lignende tabel.

Komponent	Variation	Årsag til variationen	Estimationsteknik
Variation af koefficienter	For den enkelte person	Dag-til-dag variation	Antages at være del af den tilfældige variation
		Svar i SP-eksperimenter	Variation af svar defineres til nul ved at udføre binære eksperimenter, idet logitmodellens antagelser ellers overtrædes
	Mellem personer	Forskelle i præference	SP-teknik
Tilfældig variation, ε_a	For den enkelte person	Svar i SP-eksperimenter	SP-teknik (p.t. kun implementeret i Alogit 4EC for Normalfordelinger)
		Manglende viden om trafiknettet og anden tilfældig variation	Estimeres ved simuleringer sammenlignet med aggregerede data.
	Mellem personer	Forskellige niveauer af viden om trafiknettet og anden tilfældig variation	Variationen fra SP-eksperimenterne er en delmængde af den derved estimerede variation
		Svar i SP-eksperimenter	SP-teknik

Tabel 1. *Forskellige årsager til fordelte koefficienter og tilfældig variation.*

Korrelerede fordelinger af tidsværdier

Hidtil har det været antaget, at alle koefficienter for tidsselementer er fuldt korrelerede. Imidlertid er der formentligt en vis variation mellem de enkelte tidsværdier og præferencer, f.eks. at passagerer med samme *gennemsnitlige* tidsværdi har *forskelle* i de enkelte præferencer for køretid og ventetid, eller for tog versus bus.

En sådan variation kan beskrives ved at omskrive den generelle variation af tidsværdien til korrelerede stokastisk fordelt variable for de enkelte tidsværdier. I Nielsen & Jovicic (1999a) & Møller-Pedersen (1999) blev korrelationen skønnet / kalibreret ved at alle tidsværdiers korrelation blev relateret til en enkelt variabel. Der er imidlertid et behov for udvikling af egentlig statistiske estimationsmetoder hertil, herunder til estimering af mere komplicerede korrelationsstrukturer.

Valg af fordeling af koefficienterne - pro og contra

Tidsværdier er ofte korrelerede med indkomsten, der som nævnt ofte er tilnærmet logaritmisk normalfordelt. Denne fordeling er yderligere en fordel i rutevalgsmødel, idet trunkering undgås. Den største ulempe er begrænsninger i dagens estimationsteknikker (se Nielsen & Jovicic, 1999b for en nærmere diskussion heraf), samt problemer med at implementere korrelerede tidsværdier.

Normalfordelte tidsværdier gør det derimod lettere at arbejde med korrelerede koefficienter for de enkelte tidskomponenter, og estimationsteknikkerne ud fra rejsevaneundersøgelser er mere udviklede i trafikmodel software (f.eks. Alogit 4EC). Ulempen er, at det er nødvendigt at trunkere fordelingen, eller i det mindste at trunkere nyttefunktionen, hvis den samlede nytte bliver negativ.

Tabel 2 viser pro og contra ved de to fordelinger, herunder deres tilknytning til hhv. omkostning og tidsvariable.

Ønsket egenskab	Fordelt koefficient for omkostning		Fordelt tidsværdi	
	Normal	Log-normal	Normal	Log-normal
Model baseret på økonomisk teori	Delvis: Den inverse fordeling har en positiv 'hale'	Delvist: Kan transformeres til en fordelt tidskoefficient	Nej	Ja
Egenskaber bibeholdt i anvendelsessituationen (ingen trunkering)	Nej	Ja	Nej	Ja
Tillader variation mellem tidskomponenter	Nej	Nej	Ja, men heuristisk estimeret	Nej
Avancerede estimations-teknikker	Ja	Nej	Ja	Nej

Tabel 2. Opsummering af egenskaber som forskellige fordelinger af koefficienter opfylder.

MODELLER FOR KAPACITETSFORHOLD I VEJVALGSMODELLER

I beskrivelsen af kapacitetsafhængige rutevalgsmødder i de hidtidige afsnit, blev det ikke i detaljer beskrevet, hvordan kapacitetsforhold modelleres. I det følgende beskrives udviklingen af selve kapacitetsmodellerne for vejtrafik, fra mere komplekse speed-flowkurver (Nielsen, 1994) til egentlige krydsmodeller (Nielsen, m.fl. 1998d).

Hastighedskurver og ændring af strækningkapacitet

Ofte benyttes den såkaldte BPR-formel¹⁶ til at beskrive forsinkelser på strækningniveau¹⁷:

$$t_a = t_{(0)a} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{T_a}{T_{(cap)a}} \right)^\beta$$

(20)

Hvor T_a er trafikken på strækning a , $T_{(cap)a}$ er den praktiske kapacitet, $t_{(0)a}$ den 'frie' rejsetid uden forsinkelser (0 trafikniveau), og α og β parametre.

Formlen kan som foreslået i Nielsen (1994) udvides med strækningsspecifikke parametre, α_a og β_a , for forskellige vejtyper¹⁸, med lavere hastigheder udover den praktiske kapacitet (Ibid.), og med beskrivelse af trafikken i de to retningers gensidige påvirkning på 2-sporede veje (Horowitz', 1997, ændring af BPR-formlen). Derved fås følgende formel:

$$t_a = t_{(0)a} \cdot \left(1 + \alpha_a \cdot \left(\frac{T_a(\text{fremad}) + \gamma \cdot T_a(\text{mod kørende})}{T_{(cap)a}} \right) \right)^{\beta_a}, T_a \leq T_{(cap)a}$$

$$t_a = t_{kø}, T_a > T_{(cap)a}$$

(21)

Hvor γ er en parameter.

En yderligere raffinering af kapacitetsmodellerne er at beskrive interaktion mellem tunge og lette køretøjer. I Nielsen, m.fl. (1998a) blev dette løst som vist på figur 2, der følger Vejdirektoratets metode hvad angår kapacitetsjusteringer for tunge køretøjer. Busser fordeles ind på vejnettet efter en såkaldt pre-load metode, da de forudsættes at følge faste ruter.

¹⁶ F.eks. i de amerikanske 'Highway Capacity Manuals' (1994). Formlen blev i 1950'erne anbefalet af det daværende amerikanske 'Bureau of Public Roads', men stammer fra 1930'erne (se Nielsen, 1994).

¹⁷ Nielsen (1996a & b) beskriver en række fordele ved denne formel: 1) Den er lig den frie hastighed når trafikken er nul, 2) den kan omskrives til en hastighedsfunktion uafhængig af længden, hvorved parametrene kan estimeres generelt, 3) den indeholder to uafhængige parametre, α og β , hvor den første beskriver niveauet af forsinkelsen og den anden formen på hastighedskurven, og 4) den er ikke begrænset af strækningkapacitet.

¹⁸ Med eksperimentelt fastsatte værdier fra Matthäi & Stanton (1993), korrigeret i Nielsen (1994)

Modeller for forsinkelser i vejkryds

I byområder udgør forsinkelser i vejkryds en væsentlig del af de samlede forsinkelser i vejnettet. I praksis justeres stræknings-hastighederne ofte, så de i kalibreringsåret tilpasser samlede køretider inkl. krydsforsinkelser. Dette må imidlertid frarådes, idet det i prognosesituationen kan medføre unøjagtige resultater.

Frederiksen & Simonsen (1997) implementerede en rutevalgsmodel med forsinkelser i vejkryds. Denne blev videreudviklet i Nielsen m.fl. (1998d) samt i Nielsen (1998a) til at håndtere flere trafikantklasser¹⁹. Dette inkluderede også en

metode til at lette arbejdet med at opbygge det fornødne datagrundlag (Nielsen, 1998c).

Idet svingbevægelser kan opfattes som kanter, er det ret let at implementere krydsmodeller i Successive gennemsnits metode. Men beviserne for algoritmens konvergens er omfattende²⁰.

Ikke-signalregulerede knudepunkter blev i Nielsen m.fl. (1998d) modelleret med følgende forsinkelser:

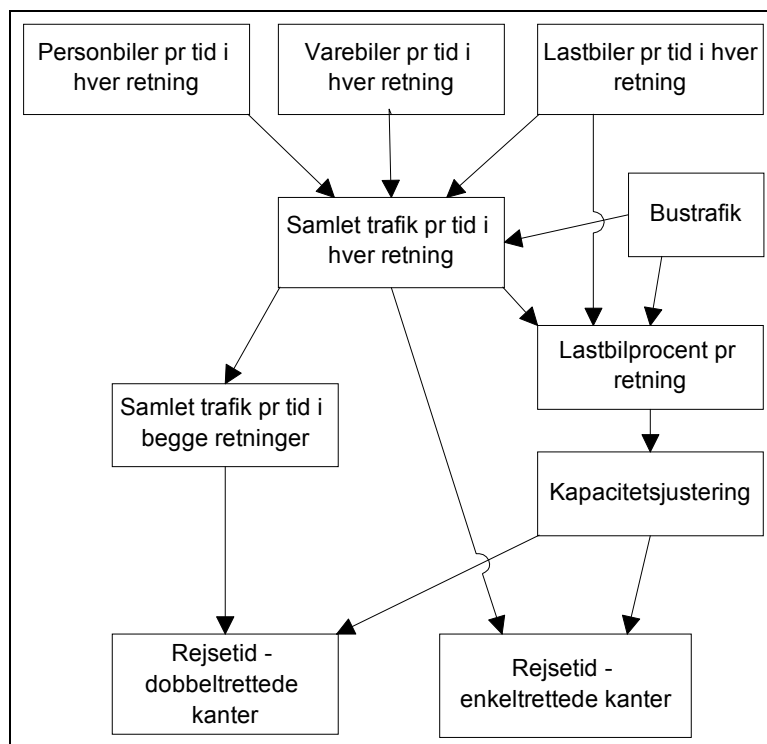
Samlet forsinkelse = deceleration + forsinkelse ved kødannelse + ventetid på, at der kommer hul i hovedtrafikken + acceleration

Og i signalregulerede kryds:

Samlet forsinkelse = deceleration + forsinkelse ved kødannelse (overmætning) + ventetid på grønt lys + forsinkelse ved kødannelse + ventetid på, at der kommer hul i hovedtrafikken + acceleration

Beregningen af forsinkelser i *ikke-signalregulerede kryds og rundkørsler* foregår i to etaper. Først beregnes kapaciteterne for svingbevægelser ud fra den indgående trafik, og derefter benyttes kømodeller til at beregne forsinkelserne under hhv. over overmætningsområdet.

I *signalregulerede kryds* blev der benyttet en generaliseret forsinkelsesmodel både ved mætning og opstuvningssituationer. Den benyttede model var i stand til at modellere samspillet mellem flere signaler, f.eks. når de ankomne biler kommer samlet i stedet for tilfældigt (grøn bølge), samt virkningerne af grøn pil.



Figur 2. Modelling af forsinkelser på vejstrækninger.

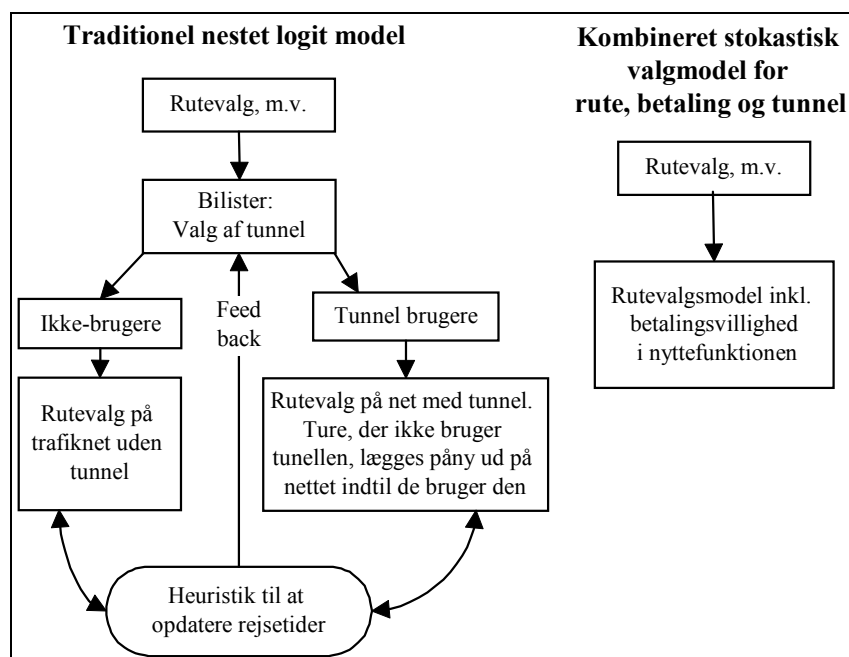
¹⁹ Se disse kilder for en grundigere beskrivelse af de ret omfattende modeller.

²⁰ Se Nielsen (1998a) og Nielsen m.fl. (1998d) for litteraturhenvisninger og diskussion heraf.

Geometriske forsinkelser forårsages af deceleration og acceleration, idet den modellerede hastighed på strækningsniveau ikke nås momentant. Forsinkelserne afhænger af kontrolpolitik og svingretning. For eksempel er der ikke nogen geometrisk forsinkelse ved kørsel ligeud på primærvejen i prioriterede kryds, mens et venstresving i et signalreguleret kryds ofte medfører både deceleration og acceleration (med sandsynlighed afhængig af kømodellerne).

Estimering af vejvalgsmodeller – med havnetunnelmodellen som eksempel

Til analyser af Havnetunnelprojektet blev der opbygget en trafikmodel af TetraPlan, Hague Consulting Group og DTU for Vejdirektoratet (Paag & Jensen, 1999). Modellen skulle både beskrive trafikefterspørgsel for person og godstrafik (vare- og lastbiler), betalingsvillighed ved evt. tunnelafgift, samt rutevalg. For at kunne beskrive betalingsvillighed og rutevalg, blev følgende to overordnede modeltyper overvejet (se også figur 3):



Figur 3. Valg af modeltilgang i Havnetunnelprojektet.

1. En traditionel nestet logitmodel²¹ for valg af tunnel versus broerne til Amager, efterfulgt af separat udlægning af trafik ad ruter gennem tunnelen hhv. over broerne.
 2. En kombineret stokastisk valgmodel for rute, betaling og tunnel.
- 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 alternativer, der derfor ikke kan formuleres som et diskret valgproblem.
- Ved opsplnitning mellem tunnelbrugere og ikke-tunnelbrugere før rutevalg, ville det ikke være teoretisk og praktisk muligt at opnå konsistens mellem nyttefunktionerne i vejvalgsmodellerne og modellen for valg af tunnel. Det ville derudover være vanskeligt at sikre bruger equilibrium og konvergens af algoritmen, hvis to separate rutevalgsmodeller skulle køres parallelt.

²¹ En nestet logit-model er en generalisering af logitmodellen til at håndtere hierarkiske beslutninger og nastede alternativer, hvoraf nogle har større lighedspunkter end andre (se f.eks. Nielsen, 1994).

- 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 benytter Kalvebod-broen på vej til tunnelen. Således skulle der implementeres en iterativ heuristisk procedure til at forkaste 'uønskede ruter'.
- Den stokastiske model er forberedt til mere brede analyser af betalingsvillighed i Hovedstadsområdet, f.eks. af bompenge og roadpricing. Derudover er softwaren og teori-grundlaget forberedt til at kunne benyttes i andre områder i Danmark.

På baggrund af disse faglige og praktiske fordele blev det valgt, at gå videre med den kombinerede stokastiske model. Dog først efter, at der var gennemført en række tests af de to modeller (Paag & Jensen, 1999, og Nielsen m.fl., 2000c). Det er første gang en sådan generaliseret rutevalgsmodel er estimeret ud fra interviewdata og benyttet på et større net, men en lignende model er tidligere implementeret uden en sådan estimation (Nielsen m.fl. 1998a).

Generaliseret nyttefunktion

I formel 14 blev der indført en generaliseret nyttefunktion med variation af koefficienter for såvel tid som omkostning. I forbindelse med Havnetunnelprojektet, var det særligt vigtigt, at kunne variere tidsværdien, fordi den enkelte bilists betalingsvillighed netop skyldes vedkommendes vægtning af tid versus omkostning. Introduceres flere tids- og omkostningselementer kompliceres nyttefunktionerne, idet der da kan antages forskellige fordelinger og placeringer af koefficienters variation, f.eks. som i formel 22:

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

(22)

$$(\beta_4 \cdot \xi_i) \cdot (\text{fri tid} + \text{forsinkelse}) + \varepsilon_a$$

Nielsen m.fl. (2000c) beskrev estimationen af en række sådanne nyttefunktioner med forskellige fordelinger af koefficienterne (normal og log-normal). En vigtig pointe med nyttebaserede rutevalgsmodeller er netop, at de lader sig estimere og teste ud fra interviewdata. I modsætning til mere heuristisk orienterede modeller.

Element	Pendlere	Erhvervsture	Andre	Varebiler	Lastbiler
Antal observationer (interviews)	895	540	1.214	215	
Omkostning (Kr/km)	0,35 (-1,6)	0,35 (-2,4)	0,35 (-3,0)	0,38 (-3,4)	
Normal-fordelt omkostning (længde · Kr/km + tunnelafgift)	43% (-1,5)	25% (-1,9)	54% (-2,5)	0	0
Tidsværdi, fri køretid (Kr./h)	29 (-1,6)	44 (-2,7)	19 (-3,9)	172 (-4,5)	
Tidsværdi, forsinkelse (Kr/h)	38 (-1,7)	73 (-3,3)	40 (-4,7)	239 (-4,3)	
Normal-fordelt tid (samlet)	0	0	0	88% (-2,4)	
Gamma-fordelt strækningsstokastik	5%	5%	5%	10%	10%
Maks. hastighed (km/h)				-	80
Kørselsrestriktioner i Kbh. centrum				-	Ja
Acceleration (m/s ²)	1,1	1,1	1,1	0,74	0,36
Deceleration (m/s ²)	2	2	2	2	1,34

Tabel 3. Koefficienter og andre antagelser i Havnetunnelprojektets rutevalgsmode. *t*-værdier (et mål for statistisk signifikans) er anført i () for koefficienter estimeret ud fra SP-data. Variationen af koefficienterne er givet procentvis relativt til middelværdien.

Estimering og kalibrering af vejvalgsmode

Den statistiske estimation i Havnetunnelprojektet viste, at modellerne med fordelte koefficienter var klart bedre end de bedste traditionelle logit-modeller. Derimod gav de forskellige modeller med fordelte koefficienter forholdsvist ens fit til datagrundlaget (Likelihood-værdier). Derfor blev det besluttet, at gennemføre en grundigere kalibrering, hvor de forskellige modelforslag blev testet fuldskala mod tællinger og kendte rutebundter. De omfattende tests er beskrevet nærmere i Nielsen & Frederiksen (1999d). På basis af testene blev følgende konkluderet (resultater er opsummeret i tabel 3):

- For personbiler blev der varieret på omkostningskoefficienten og ikke på tidskoefficienten. Denne variation kan dog transformeres til en tidsværdifordeling med en 'længere hale mod højre', altså en mellemtning mellem en normal og en log-normal fordeling. En sådan fordeling har altså delvist den ønskede egenskab, hvad angår tidsværdier.
- Tunnelafgift blev ikke multipliceret en koefficient (en krone i tunnelafgift opleves ikke værre end variable kørselsomkostninger). Hvis dette holder stik, gør det det betydeligt lettere at modellere roadpricing og forskellige former for bompengesystemer.
- Den tilfældige variation, ϵ_a , blev estimeret i en sekventiel procedure: Først blev modellen med den bedste likelihood værdi kørt med forskellige stokastiske koefficienter. Valget

herfra blev derefter benyttet i den videre kalibrering. Efter, at den endelige model var valgt, blev den stokastiske koefficient reestimeret for denne model. I begge tilfælde blev koefficienten 5% for personbiler og 10% for lastbiler²².

- Under kalibreringsarbejdet blev det fundet nødvendigt at indføre en maksimal hastighed for lastbiler (80 km./h), forskellige accelerationer og decelerationer for forskellige vogntyper (person-, vare- og lastbiler), samt tvangsruter for lastbiler i Kbh.'s centrum.

Konklusioner fra Havnetunnel projektet

I Havnetunnelprojektet blev en stor rutevalgsmode baseret på teorigrundlaget i de foregående afsnit for første gang estimeret og kalibreret i fuld skala. Projektet ledte til følgende konklusioner:

- Der var stor forskel på de enkelte trafikantklassers nyttefunktioner, hvilket begrundede brugen af flerklasse vejvalgsmodeller (som i afsnit 4).
- Stokastiske koefficienter (som i afsnit 5) forbedrede modellernes fit markant (likelihood funktioner).
- Der var meget stor variation på koefficienterne, hvilket ydermere begrundede brugen af stokastiske koefficienter i stedet for implicit at antage disse konstante. Selv om dette er konsistent med resultater fra Ben-Akiva et.al. (1993), burde noget af den store variation i stedet kunne forklares af modellen, f.eks. ved at korrelere tidsværdien eksplicit med indkomst eller ved at inkludere stigende tidsværdier med turlængden.
- De store stokastiske koefficienter i forhold til den tilfældige variation indikerer, at trafikanter har ret forskellige præferencer som de bevidst aggerer ud fra. De har derimod større kendskab til trafiknettet og aggerer mindre 'tilfældigt', end det sædvanligvis antages i vejvalgsmodeller. I praksis medførte det i modellen et klarere valg mellem primære ruter (f.eks. ruter gennem Kbh. versus Motorringvejen), mens 'mærkelige' ruter (f.eks. dreje fra og til en motorvej med en lille 'sløjfe' på lokalvejnettet) blev undgået.
- De enkelte klasser påvirkede hinanden i et betydeligt omfang, p.g.a. kapacitetsproblemer i nettet (afsnit 6). Inkluderingen af flere klasser gjorde det muligt, at beskrive såvel vare- og lastbiltrafik som personbiltrafik tilfredsstillende.
- Den kombinerede stokastiske vejvalgsmodel beskrev betalingsvillighed samt trængsel, og er således forberedt på at kunne beskrive roadpricing og andre mere komplekse valgsituationer.
- Vejvalgsmodellen er lige så detaljeret som turfordelingsmodellen med hensyn til turformål og køretøjstyper, og var på samme vis estimeret ud fra interviewdata og baseret på stokastisk nytteteori. Derved konvergerede modelkomplekset også pænt mellem efterspørgsels- og rutevalgsmødelerne.

²² På grund af større ^{tidsværdier} og tidsforbrug har lastbiler generelt en større værdi af nyttefunktionen og har derfor brug for en større stokastisk koefficient, idet den definerer forholdet mellem middelværdi og varians, der er kvadratet af spredningen.

- Den avancerede rutevalgsmodel nødvendiggjorde tilsvarende detaljerede turmatricer (T_{ijk}). Sådanne blev kalibreret v.h.a. en udvidelse af metoderne i Nielsen (1998b).

rutevalgsmodeller FOR KOLLEKTIV TRAFIK

I vejvalgsmodeller relateres biltrafik til det fysiske vejnet, der består af strækninger, knuder og måske svingbevægelser. Kollektiv trafik består derudover også af et organisatorisk net af ruter, terminaler (stationer, busstop, etc.) og skift mellem ruter, jf. Nielsen m.fl. (1998e). I forhold til biltrafik, er det langt mere kompliceret at beskrive rutevalg i kollektive net, hvilket – ud over EDB-mæssige problemer - skyldes en række trafikale og adfærdsmæssige forhold:

- Kollektiv trafik består ofte af parallelle linier på samme strækning. Disse kan i nogle situationer modelteknisk betragtes som én linie med højere frekvens. Dette rejser en problemstilling om, hvordan frekvens og køretid sammenvægtes.
- Skift og ventetider har stor betydning for passagerers rutevalg, ligesom adgangen til nettet er kompliceret at modellere (f.eks. kort afstand til en lokalbus, versus længere afstand til et S-tog).
- Forskellige kollektive trafikmidler og terminaler har forskelligt serviceniveau (f.eks. busser versus tog), og der er måske større variation i trafikanters oplevelse af nogle transportmidler end andre.
- Valg af den næste linie i en terminal er ikke uafhængigt af tidligere valg, idet det afhænger af passagerens præferencer for forskellige transportmidler.
- Kollektive trafiknet er ofte ret komplicerede. Således er det ikke sikkert, at den enkelte passager kender alle ruter og deres køreplaner, og derudfra i praksis optræder nyttemaksimerende.

På trods af disse problemstillinger, bygger mange rutevalgsmodeller for kollektiv trafik på principper fra vejvalgsmodeller, eller de bygger på ret simplificerede principper. Eksempelvis udvælges ofte kun et vist antal ruter, hvorved et stort antal relevante ruter slet ikke indgår i modelleringen (Brems, 1997). Modellen vælger derefter typisk blandt de resterende ruter - der antages at være uafhængige - på baggrund af en generaliseret nyttefunktion af f.eks. køre- og skiftetid. At ruterne antages uafhængige svarer til en vis grad til problemet med overlappende ruter i logit-baserede vejvalgsmodeller. Derfor kunne det synes naturligt at benytte en probit-baseret model til at beskrive passagerers rutevalg. Der har imidlertid været en række problemer med dette:

- Der har ikke eksisteret standardsoftware, eller software på en form, der let lod sig justere til at modellere rutevalg i store kollektive trafiknet på baggrund af stokastisk nytteteori.
- Probit-modeller kan ikke umiddelbart beskrive frekvenser i kollektive linier (frekvens-baserede modeller, jf. afsnit 8.1).

- Kollektive trafiknet rummer flere variabler (f.eks. tidselementer) end vejnet. Estimationen er derfor metodisk mere kompliceret, ligesom den stiller store krav til datagrundlaget, og derved finansieringsbehov.

Frekvensbaseret modeller

Den første probit-baserede rutevalgsmodel for kollektiv trafik blev udviklet på et testniveau i Nielsen (2000a). Modellen var en såkaldt frekvensbaseret model, hvilket betyder, at de enkelte linier kun er angivet med en frekvens, ikke en egentlig køreplan. Fordelen med dette er, at trafikmodellen ofte kun indeholder rejsetider og frekvenser, fordi eksakte køreplaner kræver et stort kodearbejde, beregningstid og en kompleks topologisk model.

Ulempen er, at skifte-, regularitets- og kapacitetsforhold beskrives mindre detaljeret. Derudover er der en række fagligt komplicerede problemstillinger vedrørende sammenvægning af frekvenserne for parallelle linier (den såkaldte frekvensaggregering). En stor del af Nielsen (2000a) koncentrerer sig netop om denne problemstilling. Når først dette problem er løst, kan nettet forholdsvist let transformeres til en graf af samme type som i vejvalgsmodeller, hvorefter samme løsningsalgoritme og principper kan benyttes. Imidlertid forestår der en del praktiske og metodiske problemer, før frekvensbaserede modeller er brugbare i form af generelt anvendeligt software.

Køreplansbaseret modeller

Køreplansbaserede modeller rummer det samlede trafiknet, der derved beskrives langt mere præcist end i frekvensbaserede modeller. Når først nettet er opstillet, kan det forholdsvist overkommeligt transformeres til en beregningsgraf (f.eks. til et såkaldt dualt net som i Møller-Pedersen, 1999 og Nielsen, m.fl. 1999b), hvorpå principperne fra stokastiske vejvalgsmodeller kan benyttes (Nielsen & Jovicic, 1999a).

Tidligere gjorde de store datamængder det reelt umuligt at implementere køreplansbaserede modeller. Med fremkomsten af GIS-baserede metoder (Nielsen, m.fl. 1998e & 1999c, samt Thorlacius, 1998), er det nu nogenlunde overkommeligt at håndtere køreplansbaserede trafiknet i trafikmodeller, herunder at importere og kvalitetssikre data fra forskellige trafikselskaber og operatører.

Selv da er det imidlertid ofte upraktisk at arbejde med så detaljerede trafiknet, idet prognoser og scenarier som regel vil kræve, at hele netstrukturen inkl. køreplaner ændres, ligesom køreplanerne i princippet bør optimeres i forhold de nye forslag, der regnes på. Derudover har køreplansbaserede modeller stadig så store regnetider, at dette er begrænsende for deres anvendelse.

Kombinerede modeller

Modeller, der kombinerer ovennævnte principper, er så småt ved at blive udviklet. F.eks. udvider Banestyrelsen Rådgivning nu den nye deterministisk køreplans- og frekvensbaserede model i softwarepakken EMME/2, så den kan inkludere stokastiske nyttefunktioner. Idéen er, at det primære kollektive net (f.eks. hovedbanenettet) behandles køreplansbaseret, mens fødelinier (f.eks. bybusser) enten behandles højfrekvente eller med en fast korrespondance

med tog (typisk i provinsbyer og ydre forstæder). Derved reduceres datakrav, regnetid og krav til optimering af køreplaner i det sekundære net, samtidig med at præcisionen i beskrivelsen af det primære net bevares.

implementering af rutevalgmodeller for kollektiv trafik – med København-ringstedmodellen som eksempel

I 1998 gennemførte Banestyrelsen en række analyser af København-Ringsted baneprojektets samfundsøkonomiske konsekvenser. Disse analyser blev gennemført på en eksisterende trafikmodel, nemlig Landstrafikmodellen. Idet denne model ikke kunne belyse en række for projektet centrale forhold, blev det imidlertid besluttet at forbedre beslutningsgrundlaget ved at opbygge en ny trafikmodel, København-Ringstedmodellen. Der var bl.a. et ønske om at kunne modellere kapacitets- og regularitetsforholds betydning for passagerers valg, valg mellem del-transportmidler og togkoncepter, beskrivelse af frekvens, skift, ventetider og skjulte ventetider. Det var derudover et ønske, at den nye model i højere grad skulle baseres på danske adfærdsdata.

Valg af model

Det blev besluttet, at den nye trafikmodel skulle inkludere en flerklasse rutevalgmodel, der byggede på stokastisk nytteteori²³. Derved ville modellerne bygge på et teorigrundlag, der kunne beskrive komplicerede valgsituationer, herunder valg af del-transportmidler, f.eks. bus versus forskellige togkoncepter. Efter en del overvejelser, blev det desuden besluttet, at modellen skulle være køreplansbaseret. Modellen spillede – som første kendte rutevalgmodel - sammen med en togsimuleringsmodel, hvorved detaljerede forsinkelsesfordelinger herfra påvirker passagerens rutevalg (og afledt deraf transportmiddelvalg og efterspørgsel). Idet et af formålene med København-Ringstedprojektet netop er at forbedre regularitetsforholdene for banetrafikken, er en sådan beskrivelse selvsagt af stor betydning for det konkrete projekt.

Estimation af modellen

For at inkludere fordelte tidskoefficienterne i modellen, blev der benyttet en sekventiel estimationsprocedure (Nielsen & Jovicic, 1999a). Først blev en todelt nyttefunktion estimeret:

$$V_i = \beta_c \cdot c_i + (\beta_t + \gamma_t \cdot \xi) \cdot t_{gen} \quad (23)$$

Hvor β , er en generaliseret tidskoefficient, og γ_t variation relateret hertil (standardafvigelse af β_t).

Den generaliserede tid t_{gen} blev fundet ved:

$$t_{gen} = \beta_{bus} \cdot t_{bus} + \beta_{Stog} \cdot t_{Stog} + \beta_{Retog} \cdot t_{Retog} + \beta_{ICtog} \cdot t_{ICtog} + \beta_{adgang} \cdot t_{adgang} + \beta_{skjult\ vente} \cdot t_{skjult\ vente} + \beta_{vente/skifte} \cdot t_{vente/skifte} + \beta_{forsinkelse} \cdot t_{forsinkelse} \quad (24)$$

²³ Rutevalgmodellen beskrives i Nielsen & Jovicic (1999a), den samlede trafikmodel beskrives i Nielsen, m.fl. (2000b) og det samlede modelkompleks i Nielsen m.fl. (1999c).

Hvor de første 4 elementer er køretider. 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 ønsker at ankomme, og den tid vedkommende faktisk ankommer.

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. For pendlere blev der fundet en stigende tidsværdi svarende til en meget stærk modstand mod lange pendlingsafstande. Derfor blev der introduceret en speciel variabel $IC > 60$ for ture over 60 minutter. Tidsværdierne for korte ture (internt i Hovedstadsområdet) var lavere end for lange (interviews uden for Hovedstadsområde). Men det var svært at skelne mellem afstand og gruppe, idet respondenterne for de to turlængder stammede fra forskellige geografiske områder. Derudover ville rutevalgsalgoritmen blive tidskrævende, hvis den skulle kunne håndtere ikke-lineære tidsværdier. Det blev derfor besluttet at samle alle interviews og estimere lineære tidsværdier.

Ud over tider og omkostninger blev der også estimeret koefficienter på sandsynlighed for at få en siddeplads, antal skift²⁴, og sandsynlighed for forsinkelse²⁵. Af disse lykkedes det p.g.a. stikprøvestørrelsen kun at estimere en koefficient for siddeplads-sandsynlighed.

²⁴ Gene ved skift ud over en højere tidsværdi i forbindelse med skift.

²⁵ Gene, der f.eks. kan beskrive, at passagerer måske er nødt til at tage en tidligere afgang for at være sikker på at ankomme til tiden; Altså gener ud over højere tidsværdi ved forsinkelser.

Estimationsresultaterne er vist i tabel 4, med tidsværdier tilbageskrevet til 1992 priser²⁶. Alle koefficienter er skaleret til kr./h. Skiftestraffen blev vurderet urealistisk stor og derfor forkastet, men er siden testet i Sørensen & Nielsen (2000). Den stokastiske komponent såvel som korrelationen mellem tidskoefficienterne blev ikke estimeret ud fra interviewdata, men blev i stedet kalibreret v.h.a. simuleringer og faglige vurderinger (som beskrevet i Nielsen &

Segment	Pendlere	Erhvervsture	Uddannelse og fritid
Antal observationer	3.446	909	4.208
Variabel	Koeff.	Koeff.	Koeff.
Omkostning (skaleret til kr.)	1 (-10,3)	1 (-5,3)	1 (-9,0)
Tidsværdi for bus (Kr./h.)	35 (-7,7)	285 (-3,1)	12 (-8,0)
Tidsværdi for S-tog	27 (-10,0)	227 (-2,0)	9,0 (-6,2)
Tidsværdi for Regional og IC-tog		194 (-2,6)	9,1 (-10,3)
IC>60 min	65 (-4,4)		
Værdi for adgangs (til/fra nettet)	45 (-7,4)	270 (-4,7)	20 (-8,5)
Værdi for skjult ventetid	16 (-3,6)	73 (-2,5)	7 (-7,2)
Værdi for vente og skiftetid	38 (-7,2)	270 (-3,5)	28 (-9,4)
Tidsværdi for forsinkelse ved destinationen	49 (-8,5)	389 (-5,8)	32 (-12,1)
Straf for ikke at få en plads (Kr.)	2,6 (-6,5)	19 (-2,9)	3,0 (-12,5)
Skiftestraf (Kr.)	8,8 (-4,3)	64 (-5,5)	4,0 (-10,8)
Generaliseret tidskoefficient, t_{gen}	1,17 (-8,5)	2,5 (-5,4)	
Stokastik relateret til t_{gen}	89 % (-5,4)	173 % (-2,5)	
Fordeling relateret til omkostning			33 % (-6,6)
ϵ_a (% af middelværdien af nyttefunktionen)	5%		
Korrelation mellem tidskomponenter	90%		

Tabel 4. Estimerede koefficienter og stokastisk heraf (*t*-værdier i parentes).

Jovicic, 1999a).

Konvergens og regnetid

Det kollektive trafiknet i modellen bestod af omtrent 350.000 liniesegmenter, hvilket sammen med gang- og skiftestræk samt køreplaner resulterede i et beregningsnet med 350.000 knuder og 2,5 mio. kanter. Hver iteration tog ca. 15 minutter på en Pentium II, 400 MHz maskine, på grund af det store net og simulering af tidsværdier og afgangstidspunkter for hver eneste zone. Kombineret med de mange turformål og tidsintervaller medførte dette en regnetid på flere dage.

²⁶ Nye interviews i 1998 blev sammenkoblet med ældre interviews, ligesom modellens grunddata i form af trafiknet, turmatricer, m.v. var fra 1992.

Løsningsalgoritmen (Successive gennemsnits metode) simulerer hvert træ af ruter, der forlader en bestemt zone. Mange zone-par passerer typisk samme strækning i det primære kollektive trafiknet. Derfor blev der opnået konvergens på jernbanenet for de enkelte afgange, om end en bedre konvergens blev opnået summeret over alle afgange for hver linie inden for en tidsperiode (f.eks. morgenmyldretid). Trafik på 'fødenettet' (f.eks. lokale busser) konvergerede derimod ikke så hurtigt, fordi nogle ruter kun benyttes af trafik til en enkelt eller få zoner. Således blev der ikke nødvendigvis opnået konvergens for den enkelte busafgang. Derimod blev der opnået konvergens for den enkelte buslinie, når der blev summeret over en tidsperiode.

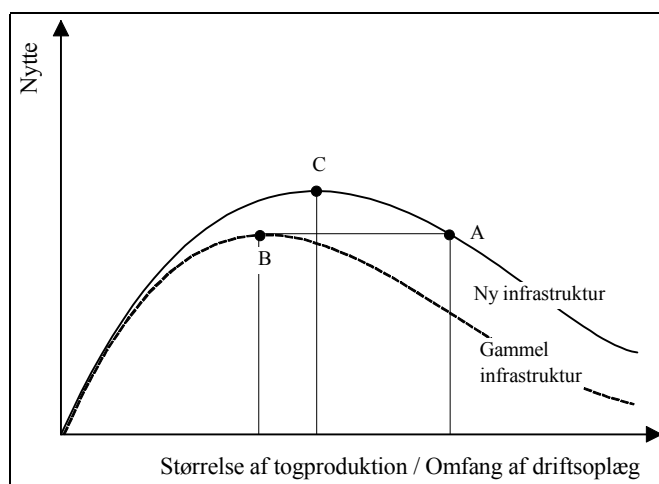
Frekvens- versus køreplansbaserede modeller

Arbejdet med København-Ringsted modellen viste, at det er muligt at arbejde med eksakte køreplaner i en fuldskala trafikmodel, og at en del af problemerne, der opstår i frekvensaggregerede modeller, derved kan undgås. De resultater, der opnås ved at benytte køreplaner er mere detaljerede, så det nu er muligt at undersøge skiftemønstre, variation af køretid over dagen m.m., ligesom kapacitetsproblemer og simulering af jernbanetraffikkens forsinkelser indgik i modellen.

En anden stor fordel ved at benytte hele køreplanen er, at forskellen mellem det idealiserede modelnetværk og det faktiske netværk er lille. Dette gør det muligt at udregne flere aspekter ved afviklingen af køreplanen, eksempelvis miljøeffekter, driftsomkostninger og materielbehov.

Men detaljeringsgraden har også sin pris, idet modellen er meget krævende hvad angår input. Således er det ikke nok, at formulere et driftsoplæg. Men dette skal også udmøntes i en egentlig køreplan, før modellen kan anvendes.

Men derudover var det nødvendigt at teste forskellige driftsoplæg, hver med sin 'optimale' køreplan. For en given infrastruktur repræsenteret ved den nederste kurve i figur 4, vil et driftsoplæg med få afgange give en ringe nytte, idet ventetiderne da er store. Hvis banen ikke trafikeres er nytten selvsagt lig nul. Men driftsoplæg med alt for mange tog vil også medføre en ringe nytte, idet togdriften da bryder sammen med massive



Figur 4. *Stiliseret sammenhæng mellem nytte og driftsoplæg af stigende kompleksitet.*

forsinkelser som følge. Optimum ligger således et sted imellem disse to yderpunkter. Ved en forbedret infrastruktur vil kurven herfor alt-andet-lige ligge over den gamle kurve. Men hvis der vælges et alt for ambitiøs driftsoplæg for den nye infrastruktur (repræsenteret med kurven til højre for pkt. A) risikeres *en ringere nytte* end for den gamle infrastruktur (med et optimal driftsoplæg givet ved pkt. B).

I praksis var arbejdet med at formulere infrastrukturvarianter, driftsoplæg, samt 'optimale' køreplaner herfor langt mere omfattende end ved tidligere udredninger, der byggede på mere skitse-mæssige vurderinger. Således er der bestemt både fordele og ulemper ved køreplansbaserede modeller:

- Den eksakte beskrivelse af køreplanen øger nøjagtigheden, og giver mere detaljeret input til effektberegninger og samfundsøkonomiske analyser.
- Men stiller også meget større krav til data, driftsoplæg, scenarier samt koordinering/optimering af køreplanerne.

KONKLUSIONER OG PERSPEKTIVER FOR FREMTIDIG FORSKNING

Artiklen har beskrevet udviklingen af rutevalgsmodeller - fra rent heuristiske metoder til ret omfattende modeller, der bygger på stokastisk nytteteori.

Nuværende state

Artiklen startede i afsnit 2 med en beskrivelse af grundlæggende krav til rutevalgsmodeller, mens afsnit 3 undersøgte, hvorvidt disse krav var opfyldt i stokastiske modeller. Afsnit 4 beskrev generelt udvidelsen af rutevalgsmodeller til at beskrive flere trafikantklasser. Dette er af stor betydning, fordi forskellige trafikantgrupper i virkeligheden har ret forskellige præferencer. For vejtrafik har det derudover betydning for beskrivelse af forskellige køretøjstypers ejenskaber (afsnit 6). Afsnit 5 udvidede modellerne yderligere til at beskrive variation af præferencer inden for en bestemt klasse, og beskrev en række problemstillinger i forbindelse med estimation af den type modeller.

Afsnit 6 beskrev vejspecifikke forhold for rutevalgsmodeller, med henblik på at modellere forsinkelser på såvel vejstrækninger som i vejkryds og andre knudepunkter. Mens afsnit 7 beskrev erfaringer og estimationsresultater fra en stor vejvalgsmodel, der blev implementeret i Havnetunnelprojektet.

Afsnit 8 beskrev særlige forhold for rutevalgsmodeller for kollektiv trafik, der bl.a. skal kunne beskrive komplicerede køreplansbaserede net med mange parallelle linier med deraf følgende komplicerede korrespondance- og adgangsførhold. Mens vejvalgsmodeller direkte modellerer kapacitetsforhold, sker det i kollektive rutevalgsmodeller ved import af diskrete forsinkelsesfordelinger fra togsimuleringsmodeller eller ved simulering af forsinkelser ud fra statistiske fordelinger. Afsnit 9 beskriver erfaringer med estimering og brug af en stor kollektiv rutevalgsmodel, der blev implementeret i forbindelse med København-Ringsted projektet.

Alt-i-alt har artiklen beskrevet udviklingen af rutevalgsmødeller med stigende kompleksitet og raffinement. Grundlæggende har modellerne nu nået et stade, hvor de bygger på et veludviklet teorigrundlag og lader sig estimere ved hjælp af statistiske metoder. Derudover er det lykkedes at inkludere mere brede valgkriterier, f.eks. betalingsvillighed i Havnetunnelprojektet og præferencer for forskellige kollektive trafikmidler i København-Ringsted projektet.

Perspektiver for fremtidig forskning

Men der er naturligvis også en række punkter, hvor modellerne kan forbedres, eller hvor de kan testes yderligere:

- Med hensyn til modellernes beskrivelse af trafikantadfærd, er der et behov for mere grundlæggende empirisk viden både i form af dybdegående interviews og RP-data.
- Metodisk kan estimationsmetoder udvikles betydeligt, både hvad angår den enkelte fordeling (især m.h.t. logaritmisk normalfordelte koefficienter), og med hensyn til korrelerede fordelinger.
- Tidsværdier og indkomst er korrelerede, hvilket måske er grunden til den store varians af koefficienterne i de præsenterede modeller. Imidlertid er det vanskeligt at estimere diskrete valgmodeller hvor en koefficient i nyttefunktionen er afhængig af en socioøkonomisk variabel. Dette kræver derfor en del yderligere metodisk udvikling.
- I København-Ringsted projektet viste det sig, at tidsværdierne steg med turlængden. Sådanne ikke-lineariteter er dog vanskelige at estimere, ligesom det øger regnetiden af løsningsalgoritmen markant. Men modeller af den type bør dog i fremtiden forsøges implementeret i praksis.
- Med de opbyggede vejvalgsmødeller kan der gennemføres eksperimenter for forskelle mellem system optimum, bruger ligevægt og stokastisk brugerligevægt, hvilket kan klarlægge potentialet ved at gennemføre trafikinformatik, trafikstyring og evt. roadpricing. Herunder kan metoder til at internalisere bilisternes eksternaliteter (påvirkning af omgivelser) gennem roadpricing eller andre betalingssystemer undersøges ved brug af modeller.
- For kollektiv trafik kan rutevalgsmødeller forbedres m.h.t. beskrivelse af togkoncepter, siddeplads-sandsynlighed, skifteforhold, terminalforhold, regularitet, m.v. Det er imidlertid ikke særligt metodisk krævende at inkludere disse forhold i de beskrevne modeller, idet det primært kræver et bedre datagrundlag (mere omfattende interviews).
- For kollektive rutevalgsmødeller er der endvidere et behov for mere effektive algoritmer. Eksempelvis bør grupperingen af afgange for en bestemt linie kunne benyttes til at optimere korteste vejs algoritme ved dynamisk opbygning af beregningsgrafene. En sådan tilgang er med succes implementeret i det Canadiske EMME/2 software for deterministisk køreplansbaseret rutevalg, og en lignende tilgang forsøges nu i Banestyrelsen Rådgivning. En yderligere reduktion af regnetiden kan måske opnås med en kombination af frekvens-

og køreplansbaserede principper i samme model (dette er tilfældet i EMME/2's model for rent deterministisk rutevalg).

- Modellerne opnår i dag ikke helt tilfredsstillende konvergens, på trods af regnetider på op til en uge. Derfor er regnetid selv med dagens computerkraft et vigtigt emne. Og som en del af vurdering heraf, er der et behov for yderligere forskning i modellernes usikkerheder og konvergensadfærd.
- En mere grundlæggende udvidelse af modellerne kan være at gøre dem multimodale, f.eks. til modellering af tilbringertransportmidler, f.eks. brug af cykel eller bil til stationer. For fjernrejser, der ofte indeholder flere transportmidler, vil multimodale modeller ligeledes være en gevinst.
- En anden grundlæggende udvidelse er tidsafhængige modeller, hvor rejsmodstandenes ændringer og derved betydning for rutevalg modelleres eksplicit over hele tidsperioder (f.eks. en dag).
- For godstrafik, kan modellerne udvides med interaktion med egentlige logistikmodeller, eller med indbygning af principper herfra.

Således er der stadig mange spændende emner for videre forskning, udvikling og forbedring af rutevalgsmodeller i praksis.

TAK TIL

Min forskning og implementering af modellerne i artiklen er gennemført med hjælp fra en lang række forskellige personer.

PÅ DTU takkes Steen Leleur for grundig vejledning i mit Ph.D.-studie, og for at have sporet mig ind på forskning. N.O. Jørgensen takkes for opbakning og mange gode råd vedr. ansøgninger og organisering af mine forskellige projekter. Bill Stanton og Line Matthai for en række kørselsforsøg til estimering af speed-flowkurver. Camilla Riff Brems for mange gode diskussioner vedr. rutevalgsmodeller for kollektiv trafik, og Rasmus Dyhr Frederiksen og Nikolaj Simonsen for et langt og frugtbart samarbejde vedr. programmering og implementering af vejvalgsmodeller, herunder udvikling af modeller for krydsforsinkelser.

I Banestyrelsen Rådgivning takkes Thomas Israelsen, Bo Grevy og Erik Rude Nielsen, for assistance med håndtering af data og modelkørsler, samt med analyser og illustreringer af resultater. Per Thorlacius takkes for arbejdet med at håndtere kollektive trafiknet i GIS, og Dorte Filges for hjælp til ledelse af Kh-Rg modelprojektet samt sammen med Jens W. Brix (Banestyrelsen Planlægning) for mange faglige diskussioner af kollektive rutevalgsmodeller. Majken Vildrik Sørensen (nu Ph.D.-studerende på CTT) takkes for metodiske diskussioner og for praktiske tests af kollektive rutevalgsmodeller, og Anders Kaas for levering af regularitetsdata og togsimuleringer til den kollektive rutevalgsmodel, samt ledelse af delprojektet herom i Kh-Rg projektet.

I TetraPlan takkes Christian Overgaard Hansen for mange gode metodiske og praktiske råd, Mogens Nielsen og Jens Møller-Pedersen for programmering af kollektive rutevalgsmodeller, Goran Jovicic for sit store arbejde med estimation af modellerne, Henrik Paag for ledelsen af Havnetunnelmodelprojektet og Peter Engelund for ledelse af TetraPlans indsats i København-Ringsted projektet.

I Hague Consulting Group takkes Andrew Daly og Charlene Rohr for metodiske diskussioner samt arbejde vedrørende estimering af vejvalgsmodellen i Havnetunnelprojektet og den kollektive rutevalgsmodel i Kh-Rg projektet.

Endelig takkes de forskellige finansieringskilder. Herunder i særlig grad DTU for at finansiere mit Ph.D.-studie, Transportrådet for støtte i starten af mit arbejde efter Ph.D.-studiet, Ørestadsselskabet for at stille Ørestadsmodellen til rådighed samt for finansiering af arbejdet med at operationalisere vejvalgsmodellerne (til erstatning af de tidligere algoritmer i Ørestadsmodellen), Vejdirektoratet og Trafikministeriet for tro på de ret avancerede og nye metoder, som Havnetunnelkonsortiet foreslog til projektet, og Banestyrelsen for finansieringen af den omfattende modeludvikling i København-Ringsted projektet.

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.

Beckhor, Shlomo (1999). *Integration of Behavioural Transportation Planning Models with the Traffic Assignment Problem*. Ph.D.-afhandling. Senate of the Technion, Israel Institute of Technology. Tishrei 5760, Haifa. 184 pp.

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

Daganzo, C.F. & Sheffi, Y. (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*. No. 11(3), pp. 253-274.

Dial, R. B. (1971). A probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm which obviates Path Enumeration. *Transportation Research*. No. 5(2). pp. 81-111.

Dial, R. B. (1997). Bicriterion traffic assignment: fast algorithms and examples. *Transportation Research Part B*. Vol. 31. pp. 357-379.

Dial, R. B. (1999). Minimal-revenue congestion pricing part I: A fast algorithm for the single-origin case. *Transportation Research Part B*. Vol. 33. pp. 189-202.

Frederiksen, Rasmus Dyhr & Simonsen, Nikolaj (1997). *Modellering af rutevalg under hensyntagen til knudepunkter*. Eksamensprojekt, IFP/DTU. Januar 1997.

Highway Capacity Manual (1994) Update. Transportation Research Board, Special Report 209, Washington, DC.

Horowitz, A. J. (1997). Intersection delay in Regionwide Traffic Assignment: Implications of the 1994 Update of the Highway Capacity Manual. *TRB-Annual meeting*, Washington, January. Pre-prints, Paper No.970463.

Matthäi, Line L. & Stanton, Bill. Traffic Planning in Copenhagen using TransCAD. Eksamensprojekt, IVTB, DTU.

Møller-Pedersen, J. (1999). Assignment model for timetable-based systems (TPSchedule). *27th European Transport Forum (PTRC Annual meeting)*. Proceedings of Seminar F, Transportation Planning Methods, Vol. P 434. pp. xxx-168. Cambridge, September.

Nielsen, O. A. (1994). *Optimal brug af persontrafikmodeller – En analyse af persontrafikmodeller med henblik på dataøkonomi og validitet*. Ph.D.-Afhandling. Rapport nr. 76, IVTB, DTU. 1994.

Nielsen, O. A.. (1996a). Do Stochastic Traffic Assignment Models Consider Differences in Road Users' Utility Functions? *24th European Transport Forum" (PTRC Annual Meeting)*. Proceedings, Seminar D & E – Part 2, Transportation Planning Methods. Uxbridge, UK. 2-6 September.

- Nielsen, Otto Anker (1996b). Nye modeller for rutevalg. *Trafikdage på AUC'96*. Bind 1, s. 111-124.
- Nielsen, O.A. (1997). 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.. (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.. (1998b). 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., Simonsen, N. & Frederiksen, R. D. (1998c). Using Expert System Rules to establish data on Intersections and Turns in Road Networks. *International Transactions in Operational Research* Vol. 5, No. 6, pp. 569-581. Pergamon.
- Nielsen, O. A.; Simonsen, N. & Frederiksen, R. D. (1998d). 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., Israelsen, T. & Nielsen, E.R. (1998e). Handling Traffic Modelling Networks in GIS – Conflicts-, Solutions- and Applications. 8th *World Conference on Transport Research*. Antwerp, Belgien.
- Nielsen, O. A. & Jovicic, G. (1999a). A large-scale stochastic Timetable-based transit assignment model for route and sub-mode choices. *27th European Transport Forum (PTRC Annual meeting)*. Proceedings of Seminar F, Transportation Planning Methods, Vol. P 434. pp. 169-184. Cambridge, September.
- Nielsen, O. A., Jovicic, G. & Møller-Pedersen, J. (1999b). En model for passagerers rutevalg under hensyntagen til kapacitets og regularitetsproblemer. *Trafikdage på AUC*. Vol. 2. pp. 461-476.
- Nielsen, O.A. m.fl. (1999c). København-Ringsted modelkomplekset – fra togsimulering til samfundsøkonomi. *Trafikdage på AUC*. Vol. 1, s. 483-494.
- Nielsen, O.A. & Frederiksen, R.D. (1999d). En stokastisk flerklasse vejvalgmodel med fordelte koefficienter for tider og omkostninger. *Trafikdage på AUC*. Vol. 2. s. 483-494.
- Nielsen, O.A. (2000a). 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. , Hansen, C. O., & Daly, A (2000b). A Large-scale model system for the Copenhagen-Ringsted railway project. *9th International Conference on Travel Behaviour Research*. Proceedings, Vol. 8, Methods Workshop 7: Microeconomic perspectives on traveller behaviour and valuation research. Gold Cost, Queensland, Australia, July.
- Nielsen, O. A., Daly, A. & Frederiksen, R. D. (2000c). A stochastic multi-class road assignment model with distributed time and cost coefficients. *9th International Conference on Travel Behaviour Research*. Proceedings, Vol. 12, Application Workshop 4: Large scale model systems. Gold Cost, Queensland, Australia, July.
- Nuzzolo, A., Russo, F. & Crisalli, U. (1997). A pseudo-dynamic assignment to extraurban networks using a C-logit route choice model. *25th European Transport Forum, Proceedings of Seminar F, Transportation Planning Methods*, Vol. II. pp. 95-105.
- Paag, H. & Nejst Jensen, H. (1999). Havnetunnel i København. *Trafikdage på AUC*. Vol. 2, pp. 477-482.
- Powell, W. B. & Sheffi, Y. (1982). The Convergence of Equilibrium Algorithms with Predetermined Step Sizes. *Transportation Science*. No. 16(1), pp. 45-55.
- Sheffi, Y. & Powell, W. B. (1981). A comparison of Stochastic and Deterministic Traffic Assignment over Congested Networks. *Transportation Research B*. No. 15(1), pp. 53-64.

- Sheffi, Y. & Powell, W. B. (1982). An Algorithm, for the Equilibrium Assignment Problem with Random Link Times. *Networks* 12(2), pp. 191-207.
- Sheffi, Y. (1985). *Urban Transportation Networks*. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ.
- Sørensen, Majken Vildrik & Nielsen, O.A. Validering og test af stokastisk trafikmodel. *Trafikdage på AUC*. Vol. 1, pp. 35-54.
- Thorlacius, P. (1998b). Time-and-Space Modelling of Public Transport Systems Using GIS. *Trafikdage på AUC*.
- Van Vuren, T. (1995). The trouble with SUE stochastic assignment options in practice. *Proceedings PTRC Summer Annual Meeting*. University of Warwick, England, Seminar H. pp. 41-52.
- Wardrop, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. *Institution of civil engineers*. London.