

# NYE MODELLER FOR RUTEVALG

**Otto Anker Nielsen**  
**Institut for Planlægning (IFP)**  
**Danmarks Tekniske Universitet (DTU)**  
**Bygning 115, 2800 Lyngby**  
**Telefon 45 25 15 14; Fax 45 93 64 12; Email onielsen@ivtb.dtu.dk**

## 1 INTRODUKTION

Trafikmodeller består ofte to hovedtrin: Først beregnes antallet af ture (turproduktion) fordelt mellem destinationer (turfordeling) og på transportmidler (modal-split), og derefter fordeles turene på trafiknettet ved hjælp af en rutevalgsmodel (på engelsk: traffic assignment). Igennem det sidste år er forskellige problemer ved rutevalgsmodeller blevet diskuteret i forbindelse med konkrete modelarbejder (bl.a. i Ingeniøren). Her er det blandt andet blevet påpeget, at modellerne beregnede trafikmængder, der var større end vejenes kapacitet (manglende kapacitetsafhængighed) og at det var urealistisk, at alle trafikanter benytter samme rute (manglende stokastik).

I denne artikel diskuteres i afsnit 2, hvordan trafikanter vælger rute, mens afsnit 3 diskuterer, hvilke eksisterende typer rutevalgsmodeller, der bedst beskriver dette. Denne diskussion bygger på Nielsen (1996), men kan også ses som en fortsættelse af et noget bredere indlæg ved sidste års trafikdage (Nielsen, 1995). Derefter præsenteres i afsnit 4 en nyudviklet rutevalgsmodel, der både tager hensyn til trafikanternes manglende kendskab til trafiknettet (den traditionelle stokastik) og til deres forskellige præferencer (f.eks. valg af korteste versus hurtigste rute).

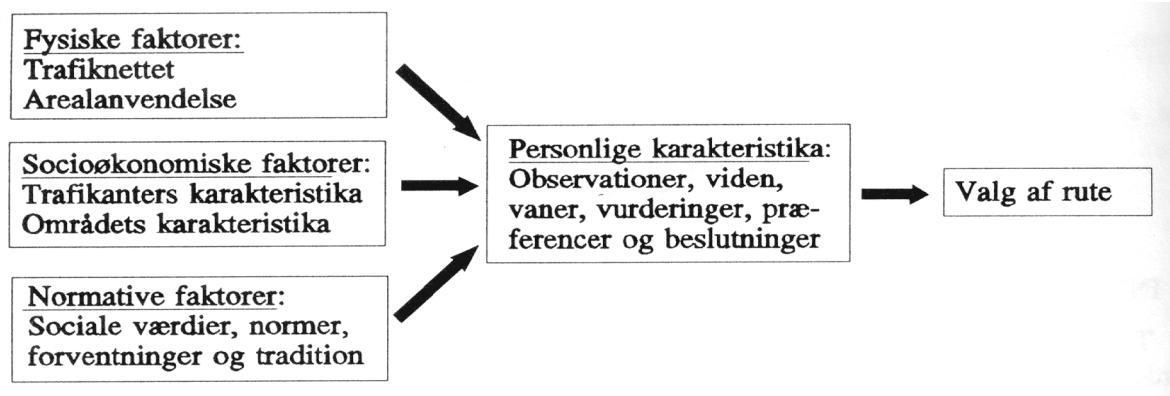
Det vises i afsnit 5, at den nye modeltype leder til en mere virkelighedsnær modellering af rutevalg, og derved til mere troværdige resultater af trafikmodelarbejder. De teoretiske diskussioner i artiklen underbygges i afsnit 6 med afprøvninger på forskellige fuldskala trafikmodeller, mens afsnit 7 peger på fremtidige forskningsbehov.

## 2 DISKUSSION AF RUTEVALG I BYOMRÅDER

Grundlæggende bør rutevalgsmodeller afspejle 1) De faktorer, der påvirker trafikanters rutevalg, 2) Hvordan trafikanter skelner mellem forskellige ruter, og 3) at rutevalg også indeholder en række stokastiske faktorer. I det følgende skitseres dette, idet der for en nærmere gennemgang henvises til Nielsen (1994, 2).

### 2.1 Faktorer, der påvirker trafikanters rutevalg

Et af de grundlæggende problemer i rutevalgsmodeller er at værdisætte de forskellige faktorer med betydning herfor (se figur 1). Som regel er det kun rejsemønstre (f.eks. rejse længde og tid), der værdisættes i en lineær funktion (generaliseret omkostning). Her multipliceres hver rejsemønstre med en vægtningsfaktor (Ortúzar & Willumsen, 1990, p.262 og Thomas, 1991, pp.46-47). I Danmark udregnes rejsemønstret ofte som:  $0,3 \cdot \text{længde} + 1,0 \cdot \text{tid}$  målt i hhv. km. og min. Det er klart, at dette er en meget stærk simplificering i forhold til de mange faktorer, der normalt påvirker rutevalg. I Nielsen (1994, 2) henvises f.eks. til undersøgelser hvor kun 12% af trafikanterne reelt minimerer rejsetid eller rejse længde.



**Figur 1** Grundlæggende faktorer med betydning for rutevalg.

## 2.2 Hvordan trafikanter skelner mellem forskellige ruter

Bovy & Stern (1990, pp.18-21) kategorisere rutevalg som simultane, sekventielle eller hierarkiske. I de fleste trafiknet forekommer alle tre. Ifølge det *simultane rutevalg* vælger trafikanten hele ruten før turens start og genovervejer ikke dette siden. Sådanne valg forekommer, hvis der ikke er forsinkelser under vejs, eller hvis trafikanterne er stærkt bundet af vane eller manglende viden om alternativer. Ifølge det *sekventielle rutevalg* genovervejer trafikanterne rutevalget hver eneste gang, der er en valgsituation under ruten. Det enkelte valg er uafhængigt af tidligere valg. Ifølge det *hierarkiske rutevalg* genovervejer trafikanten ruten, hver eneste gang, der er en valgsituation, men valget er afhængigt af tidligere valg. Dette er sandsynligvis den mest realistiske valgsituation: Normalt følges den valgte rute, men den ændres dog under visse betingelser.

## 2.3 Stokastik i rutevalg

Ordet 'stokastik' får måske én til at tænke på noget tilfældigt. Imidlertid dækker begrebet over en lang række faktorer, hvoraf kun nogle har at gøre med tilfældigheder:

1. Trafikanter har ikke fuldt kendskab til trafiknettet, hvorfor de ikke handler rationelt i forhold til de reelle rejsemønstre, men kun i forhold til de 'oplevede' rejsemønstre.
2. Forskellige ruter vælges ofte for variationens skyld.
3. Rejsetider ad en rute varierer ofte fra dag til dag på grund af andre trafikanter, lyssignaler, kødannelser eller forskellige trafikbelastninger, vejret, etc.
4. Forskellige kørevaner kan måske medføre forskellige optimale ruter for forskellige trafikanter.
5. Forskellige trafikanter har forskellige præferencer.

Det antages ofte, at forskellige rutevalg skyldes variationer i den måde trafikanter 'oplever' rejsemønstrene,  $c_{(e)a}$ , for forskellige strækninger,  $a$  (f.eks. Sheffi, 1985, p.272).  $c_{(e)a}$  antages at bestå af to komponenter, en deterministisk,  $c_a$ , og en tilfældig,  $\epsilon_a$  (svarende til grundlaget for logit- og probit-modellerne):

$$c_{(\varepsilon)a} = c_a + \varepsilon_a, \quad (1)$$

Endvidere antages at  $E[\varepsilon_a]=0$ , således at den gennemsnitlige oplevede og deterministiske rejsemodstand er identisk ( $E[c_{(\varepsilon)a}]=c_a$ ).

### 3 FORSKELLIGE RUTEVALGSMODELLER

Når trafikken stiger på en given strækning, falder trafikanternes hastigheder. En af hovedinddelingerne af rutevalgsmodeller er, hvorvidt de tager hensyn hertil (*trafikafhængige modeller*) eller ej (*ikke-trafikafhængige modeller*). En anden hovedinddeling er, hvorvidt modellerne tager hensyn til, at trafikanterne af forskellige årsager benytter forskellige ruter mellem givne lokaliteter (*stokastiske modeller*) eller ej (*deterministiske modeller*). I dette afsnit gennemgås disse fire hovedtyper af modeller, mens afsnit 4 gennemgår forskellige forbedringer heraf.

#### 3.1 Problemer med estimering af rutevalgsmodeller, alt-eller-intet modellen

Den simpleste rutevalgsmodel 'alt-eller-intet' modellen antager, at alle trafikanter mellem to punkter følger samme rute (deterministisk, ikke-trafikafhængigt rutevalg). Dette er i modstrid med den empiriske viden om trafikanters rutevalg, der ofte er fordelt på et stort antal ruter.

Selv om en rutevalgsmodel rent matematisk kan estimeres, så trafikmængderne svarer til snittællingerne, er det langt fra sikkert, at modellens turmønster svarer til virkeligheden. Betragtes en trafikmodel,  $f(\cdot)$ , der modellerer trafik mellem zoner, kan denne estimeres ud fra en GA-matrix,  $\overline{GA}_{ij}$ , ved at minimere afvigelsen  $afv$  mellem denne og modelleret trafik,  $\overline{T}_{ij}$ :

$$\min \left[ \sum_{i,j} afv(GA_{ij}, T_{ij}) \right], \quad T_{ij} = f(\cdot)_{ij}, \quad (2)$$

$$u. b. f(\cdot)_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j$$

Som det ses indgår både  $\overline{GA}_{ij}$  og  $\overline{T}_{ij}$  i minimeringsproblemet, og de to matrixer har samme dimension. Betragtes derimod estimeringen af en rutevalgsmodel, benyttes ofte følgende estimationskriterie:

$$\min \left[ \sum_{a \in \tau} afv(V_a, T_a) \right], \quad T_a = \sum_{i,j} (f(\cdot)_{ija}), \quad (3)$$

$$u. b. f(\cdot)_{ija} \geq 0 \quad \forall i, j, a$$

hvor  $f(\cdot)_{ija}$  er rutevalgsmodellen, der modellerer trafik mellem zone  $i$  og  $j$  ad strækning  $a$ .  $T_a$  og  $V_a$  er hhv. modelleret og talt trafik på strækning  $a$ . Der summeres kun over strækninger  $a$  med talt trafik givet ved mængden  $\tau$ .

Her er trafikken for hver strækning summen af bidrag fra mange zonepar. Således kan et givet estimat af  $T_a$ 'erne svare til mange forskellige kombinationer af  $f(\cdot)_{ija}$ 'erne, der måske endda tilsammen svarer eksakt til den talte trafikmængde. På trods af en sådan overensstemmelse kan

den enkelte trafikmængde  $f_{ija}$  være helt forkert, hvilket først vil give sig udslag i prognosesituationen. Dette er en naturlig konsekvens af, at der er langt færre snittællinger  $V_{a, (a \in T)}$  end modelleret trafik,  $f_{ija}$ .

Det understreges, at alt-eller-intet modellen kun bør benyttes, hvis der med sikkerhed kun er én rute mellem hvert zonepar i modellen. I alle andre tilfælde er modellen utroværdig.

### 3.2 Stokastiske ikke-trafikafhængige modeller (logit og probit)

De første stokastiske rutevalgsmøller var logit-baserede (f.eks. Dial, 1971) og byggede således på en antagelse om, at alle ruter er uafhængige. Dette medførte store problemer i trafiknet med overlappende ruter (jvf. figur 2). Typisk vil der være et stort antal del-alternativer i bymidter, mens der f.eks. for omfartsveje kun er få. Herved giver logitmodellen et forkert overordnet turmønster, og derved i særlig høj grad utroværdige prognoser.

For at undgå dette foreslog Daganzo & Sheffi (1977) i stedet at benytte probit-baserede rutevalgsmøller, og Sheffi & Powell (1981) formulerede en operationel løsningsalgoritme. Forudsætningerne herfor er:

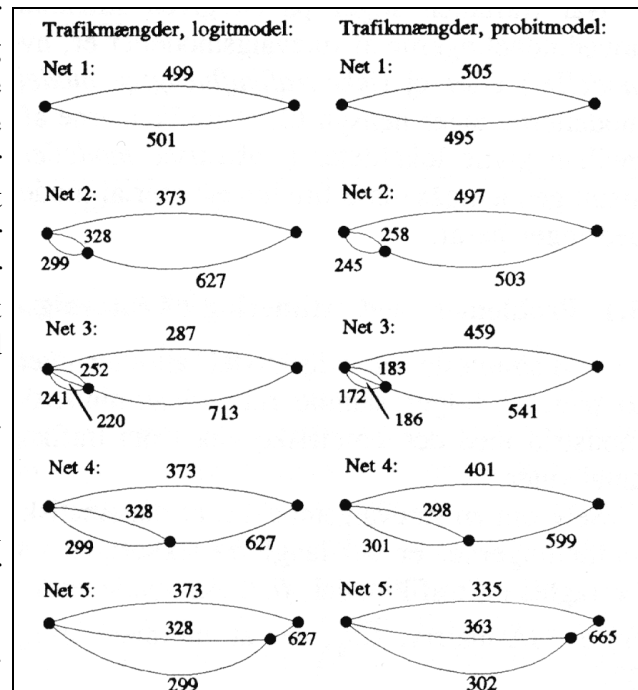
1. De enkelte strækninger opleves uafhængigt.
2. Strækninger med den samme deterministiske rejsemødstand har den samme fordeling af oplevede rejsemødstande.
3. Den oplevede rejsemødstand,  $c_{(p)a}$ , er normal fordelt<sup>1)</sup> med middelværdi lig den deterministiske rejsemødstand og med varians proportional hermed:

$$c_{(\varepsilon)a} \in \Phi(c_a, err \cdot c_a) \text{ eller } c_{(\rho)a} = c_a \cdot \rho_a, \rho_a \in \Phi(1, err), \quad (4)$$

hvor  $\Phi$  symboliserer normal fordelingen,  $c_a$  er den deterministiske rejsemødstand og  $err$  er den såkaldte *errorterm*.  $c_{(p)a}$  og  $\rho_a$  er introduceret for at simplificere notationen i det følgende,

På basis heraf viste de, at sandsynligheden for at benytte en bestemt strækning eller rute kan beskrives med en multinomial normal fordeling - eller med andre ord en probitmodel. Løsningsalgoritmen herfor er:

- 1) Initialisering: Sæt iterationsnummer  $n:=1$  og sæt trafikstrømmene  $T_{a(0)}:=0$  for alle strækninger, a. (0)et i  $T_{a(0)}$  symboliserer iteration nummer nul (initialisering).



Figur 2 Sammenligning af stokastiske rutevalgsmøller af logit- og probit-typen for forskellige simple testnet (500 iterationer).

1) Normal fordelingen er ikke helt velegnet, idet den kan give negative værdier. Ved moderate  $err$  er dette dog ikke et problem. De få negative udfald bør trunkeres (se også Sheffi, 1985, p.298 for en diskussion heraf).

- 2) Opdatér rejsemødestande: Udtag  $c_{(e)a} \in \Phi(c_a, \text{err} \cdot c_a)$  for alle strækninger,  $a$ , ved at benytte en Monte Carlo simulation<sup>1)</sup>.
- 3) Alt eller intet rutevalg: Fordel turmatricen på trafiknettet med opdaterede  $c_{(e)a}$ 'er. Herved opnås nye trafikstrømme,  $T_{a(\text{tmp})}$ , på alle strækninger,  $a$ ,  $\text{tmp}$  betyder en temporær variabel.
- 4) Trinklængden fastlægges:  $\xi_{(n)} := 1/n$ .
- 5) Opdatering:  $T_{a(n)} := (1 - \xi_{(n)}) \cdot T_{a(n-1)} + \xi_{(n)} \cdot T_{a(\text{tmp})}$ , for alle strækninger,  $a$ .
- 6) Stopkriterie: Stop jvf. en mængde af stopkriterier, der alle skal opfyldes, ellers sæt  $n := n+1$  og gå til trin 2.

Ovennævnte algoritme er blevet implementeret i forbindelse med IFP's GIS-T projekt og afprøvet på en række fuldskala cases (se afsnit 6).

### 3.3 Trafikafhængige modeller (UE)

Når trafikken stiger på en given strækning, falder trafikanternes hastigheder. En af hovedinddelingerne af rutevalgsmodeller er, hvorvidt de tager hensyn hertil (*trafikafhængige modeller*) eller ej (*ikke-trafikafhængige modeller*).

Der er udviklet en række trafikafhængige modeller, der søger at finde en ligevægts situation, hvor ingen trafikant kan reducere sin egen rejsemødestand ved at skifte rute (det såkaldte User Equilibrium, UE). Sheffi (1985) viser, at modeller, der følger Successive Gennemsnits Metode (Method of Successive Averages, MSA), er konvergente. Derimod kan det let vises, at de to hyppigt benyttede metoder 'Capacity Restraint' og 'Incremental Loading' ikke er konvergente (se f.eks. Nielsen, 1994, 2). Det frarådes derfor at benytte de to metoder. Især Capacity Restraint vil ofte 'svinge frem og tilbage' mellem forskellige løsninger som funktion af antal iterationer.

Algoritmen i Successive Gennemsnits Metode, MSA, er af flere søgt optimeret, hvoraf den såkaldte Frank-Wolfe metode kan reducere beregningstiden betydeligt (1956, se også Sheffi, 1985, pp.117-120). Imidlertid tyder noget på, at metoden er knapt så hensigtsmæssig, hvis der også tages hensyn til forsinkelser i kryds (jvf. bl.a. erfaringer fra Hovedstadstrafikmodellen hos Anders Nyvig a/s), ligesom den må give mindre fordele for store trafiknet.

Rejsemødestanden i UE,  $c_a$ , bør bestå af to typer komponenter; en ikke-trafikafhængig (f.eks. rejselængde) og en trafikafhængig (typisk rejsetid), f.eks.:

$$c_a = k_{(l)} \cdot l_a + k_{(t)} \cdot t_a, \quad (5)$$

hvor  $l_a$  er længden (som regel korreleret med den direkte rejseomkostning) og  $t_a$  rejsetiden.  $k_{(l)}$  og  $k_{(t)}$  er vægtingen heraf.

Hver af de to typer komponenter kan bestå af flere variable, hver med forskellige vægtningsfaktorer. Hvis rejsemødestanden følger den såkaldte BPR-kurve<sup>1)</sup>, kan formel 5 omskrives til:

1) Nielsen (1994, 2) uddyber dette. Eventuelt kan en tilnærmelse med en Gumbel-fordeling benyttes for at øge beregningshastigheden, som vist i Ibid, afsnit 7.3.

2) Navnet stammer fra det amerikanske Bureau of Public Roads, der formulerede formelen i slutningen af 1950'erne. Siden er den benyttet i en række sammenhænge, herunder i Danmark.

$$c_a = k_{(l)} \cdot l_a + k_{(t)} \cdot t_{(0)a} \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \left( \frac{T_a}{T_{(cap)a}} \right)^\beta \right), \quad (6)$$

hvor  $T_a$  er trafikken på stækning  $a$ ,  $T_{(cap)a}$  er den praktiske kapacitet,  $t_{(0)a}$  er den 'frie' rejsetid (rejsetiden ved fri trafikafvikling) og  $\alpha$  og  $\beta$  er parametre.

BPR-formlens store udbredelse skyldes en række fordelagtige egenskaber (Nielsen, 1994, 2):

1. Den er lig den 'frie' rejsetid, når trafikbelastningen er nul.
2. Den kan omskrives til en funktion af hastigheden uafhængigt af strækningens længde. Dette gør det muligt at estimere generelle parametre for alle strækninger af samme type.
3. Den indeholder to uafhængige parametre,  $\alpha$  og  $\beta$ ; den første fastlægger, hvor meget hastigheden aftager ved stigende trafikbelastning, og den anden hvor hurtigt.
4. Formlen er ikke afgrænset ved den praktiske kapacitet. Dette giver en algoritmæssig fordel i rutevalgmodellen (Nielsen, 1996).

Derudover har BPR-formlen (og formel 6) vist sig anvendelig i praksis<sup>1)</sup>. Imidlertid har det også vist sig (bl.a. jvf. Matthäi & Stanton, 1993), at det ville være bedre, hvis de to parametre estimeres separat for forskellige strækningstyper eller for de enkelte strækninger (dvs.  $\alpha_a$ 'er og  $\beta_a$ 'er). F.eks. vil en langsom bil på en mindre vej forårsage forsinkelser selv ved lave trafikbelastninger (lille  $\beta$ ), mens det samme ikke er tilfældet på en motorvej (stor  $\beta$ ). Desværre har der ikke været tilstrækkeligt empirisk grundlag til at estimere separate  $\alpha$ 'er og  $\beta$ 'er i de modelarbejder, der er udført ved IFP.

Når trafikken overstiger den praktiske kapacitet, overestimerer BPR-formlen hastigheden. En simpel heuristisk måde til at undgå dette, er i stedet at benytte en meget lav hastighed, når trafikken overskrider den praktiske kapacitet.

### 3.4 Stokastisk bruger equilibrium (SUE)

Som regel vil rutevalg både være stokastisk og trafikafhængigt. Her opnås en ligevægt (equilibrium), hvor ingen trafikant kan reducere sin 'oplevede' rejsemodstand ved ensidigt at skifte rute (det såkaldte *Stochastic User Equilibrium, SUE*). Sheffi (1985, pp.309-327) viser, hvordan denne tilstand kan modelleres<sup>1)</sup>. Løsningsalgoritmen svarer til løsningen af probit modellen i afsnit 3.2 bortset for trin 2 og 3:

- 2) Opmåler rejsemodstande: Udregn  $c_{a(n)} = f(c_{(0)a}, T_{a(n-1)}) \forall a$ , hvor  $f(\cdot)$  er sammenhængen mellem trafik og rejsemodstand ('Speed-flow kurven' eller 'rejsemodstandsfunktionen').
- 3) Rutevalg: Turmatricen fordeles på trafiknettet med en *stokastisk rutevalgmodel* (f.eks. probit-modellen) baseret på  $c_{a(n)}$ 'erne. Herved modelleres  $T_{a(tmp)}$ 'erne for alle strækninger,  $a$ .

Løsningsalgoritmen består således af to løkker: En ydre af trin 2-6 og en indre, der er den

1) I Danmark er den valideret ved køreforsøg (Matthäi & Stanton, 1993) og som en del af praktiske modelafprøvninger (Nielsen, 1994, 2). Bedst resultat blev opnået med værdier for  $\alpha$  og  $\beta$  på hhv. 0.8 og 1.5.

2) SUE formuleredes først af Daganzo & Sheffi (1977) og løsningsalgoritmen herfor af Sheffi & Powell (1982).

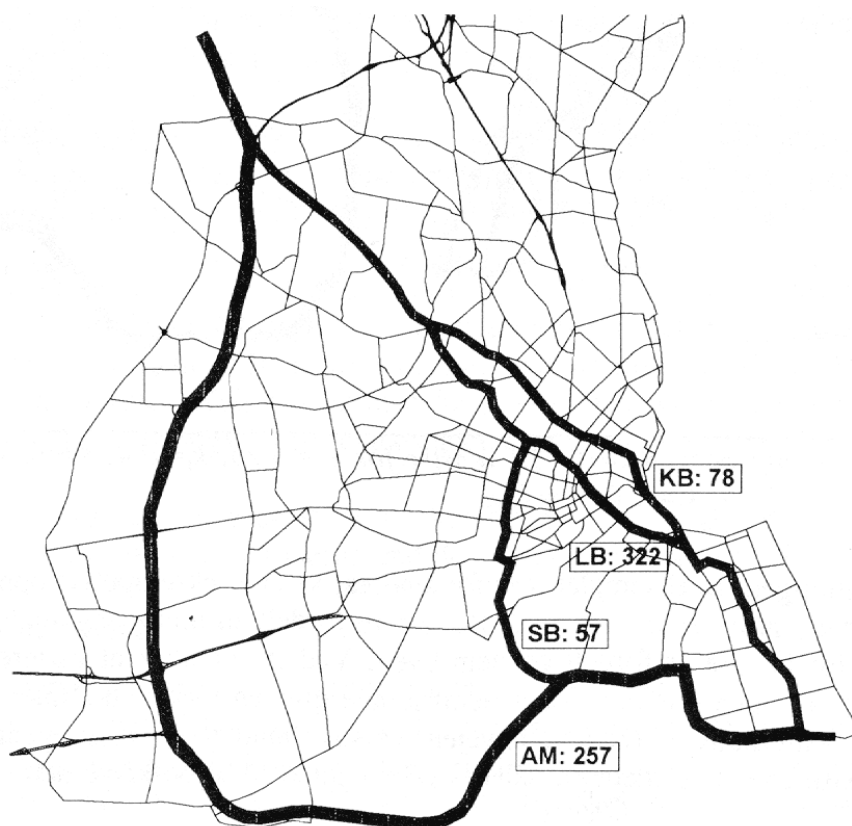
stokastiske rutevalgsmode i trin 3. Umiddelbart synes dette at resultere i en horribel beregningstid. Imidlertid viser Sheffi (1985, pp.332-335), at antallet af iterationer kan reduceres ved at lægge hovedparten i den ydre løkke. Faktisk kan der opnås et godt resultat ved kun at have en enkelt iteration i den indre løkke. Denne tilgang benyttes i modelkørsler ved IFP.

Det diskuteres ofte, hvornår probit-modellen, en trafikafhængig model (UE) eller kombinationen heraf (SUE) bør benyttes. Den probitbaserede model kan benyttes i *svagt* belastede trafiknet og UE i *stærkt* belastede trafiknet. SUE bør benyttes ved alle andre belastningssituationer (Sheffi, 1985, p.336-339). Da alle tre tilfælde som regel optræder i forskellige dele af danske byområder, anbefales det altid at benytte SUE.

#### 4 MODELLERING AF FORSKELLE I TRAFIKANTERS PRÆFERENCER

Ovenfor blev formuleringen af rejsemotstandene,  $c_a$ , ikke diskuteret nærmere. I probit-modellen (og SUE) håndteres  $c_a$ 'erne som homogene variable i den enkelte Monte Carlo simulering. Afsnit 4.1 diskuterer denne tilgang, mens der i afsnit 4.2 foreslås en fremgangsmåde, der også kan håndtere forskelle i trafikanters præferencer.

Figur 3 viser observeret rutevalg fra et case for biltrafikken til og fra lufthavnen, der benyttes i det følgende. Caset er særligt velegnet til test af rutevalgsmodeller, fordi Vejdirektoratet i 1990 gennemførte en grundig undersøgelse af dette rutevalg.

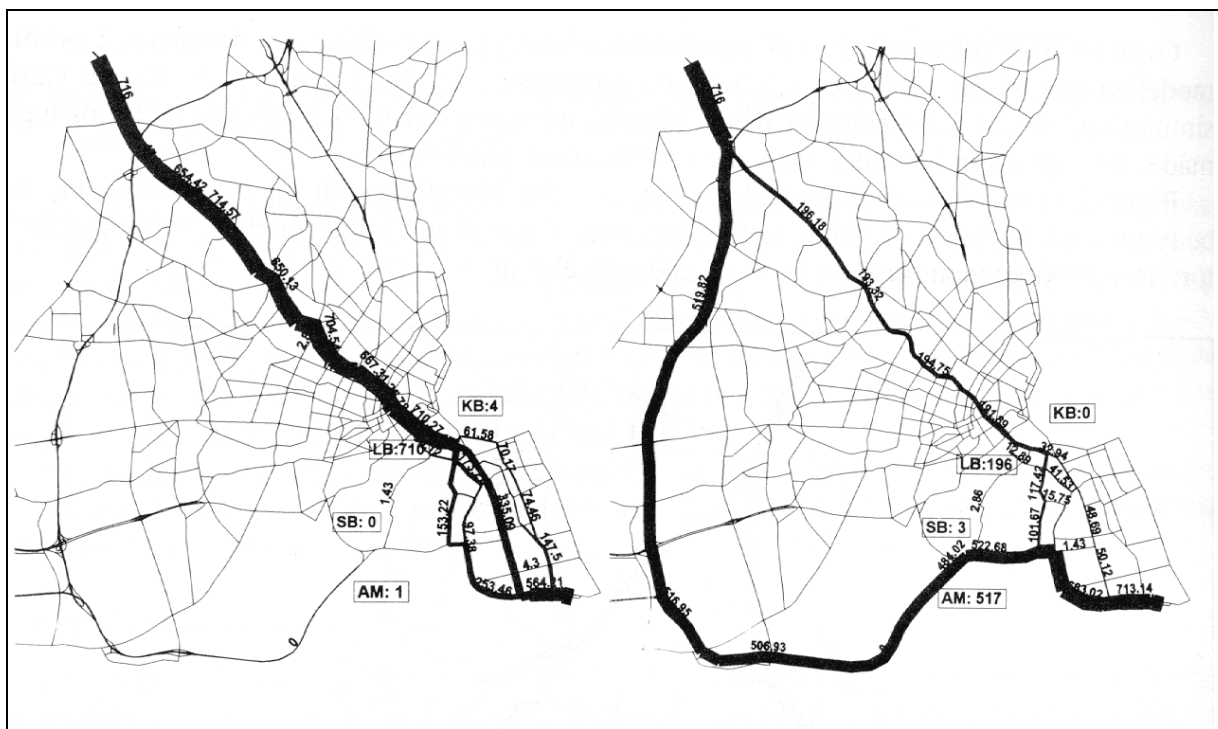


Figur 3 Observeret rutevalg mellem Farum og Kastrup.

#### 4.1 Stræknings baseret stokastik

Den strækningsbaserede stokastik i den traditionelle SUE betyder, at alle trafikanter i modellen har samme vægtningsfaktorer på de enkelte rejsemønstre (har samme præferencer).

Figur 4 viser på den venstre side et eksempel på brug af den strækningsbaserede SUE, hvor et rutebundt af trafik mellem Farum og Kastrup er modelleret<sup>1)</sup>. I eksemplet passerer de fleste ruter den centrale del af København, hvilket skyldes den givne vægtning mellem rejse længde og tid. Hvis errortermen øges vil trafikken blive fordelt over flere del-alternativer gennem centrum. Imidlertid vil kun få ruter blive fordelt ad den længere med noget hurtigere Motorringvej. De modellerede rutevalg svarer tydeligvis ikke til de observerede.



**Figur 4** Strækningsbaseret SUE. Til venstre for  $\epsilon_a=0.25$ ,  $k_1=0.4$ ,  $k_2=0.6$ , til højre for  $\epsilon_a=0.25$ ,  $k_1=0.0$ ,  $k_2=1.0$ .

Hvis vægtningen fra eksemplet ovenfor ændres, kan der eksempelvis opnås et resultat som vist på figur 4's højre side. Her er de fleste ture fordelt ad motorringvejen med få del-alternativer, og for få ture er fordelt gennem byen. Ved systematisk at variere vægtene  $k_1$  og  $k_2$  viste det sig, at ingen kombinationer heraf kunne give en virkelighedsnær fordeling mellem de to hovedalternativer (Motorringvejen versus bundtet af ruter gennem byen). Den strækningsbaserede SUE alene er således ikke i stand til at beskrive dette rutevalg.

1) Frederiksen & Simonsen (1996) har implementeret SUE i et C-program for forfatteren. En af faciliteterne i dette program, er en mulighed for at gemme 1) Alle ruter, der starter i en bestemt zone, 2) Alle ruter, der slutter i en bestemt zone, 3) Alle ruter der passerer en bestemt strækning. De tre kriterier kan frit kombineres.



## 4.2 Præference-baseret stokastik (hele ruter)

Hvis én trafikants rute betragtes, kan den oplevede rejsemodstand,  $c_{(\rho)ab}$ , beregnes som:

$$c_{(\rho)ab} = \rho_a \bullet c_{ab} = \rho_a \bullet (k_{(l)b} \bullet l_a + k_{(t)b} \bullet t_a), \quad (7)$$

hvor  $c_{ab} = k_{(l)b} \bullet l_a + k_{(t)b} \bullet t_a$  er trafikant  $b$ 's rejsemodstand og  $\rho_a$  symboliserer den stokastiske simulering af rejsemodstanden for strækning  $a$ .

Man kan nu antage, at  $k_{(l)b}$  og  $k_{(t)b}$  varierer for forskellige trafikanter, f.eks. fordi de har forskellige præferencer. Denne variation kan beskrives ved en stokastiske simulering af vægtene (simuleringen kan symboliseres ved  $\rho_{(l)}$  og  $\rho_{(t)}$ ). For en specifik rute for én trafikant, kan vægtene antages at være de samme for alle del-strækninger. Dette er ensbetydende med, at trafikanten ikke ændrer sin vægtning af længde versus tid under turen (sagt mere teoretisk, at den enkelte trafikant har en konstant præference eller nyttefunktion). Under denne antagelse kan man opstille følgende funktion for alle trafikanters oplevede rejsemodstande:

$$c_{(\rho)a} = \rho_a \bullet ( \rho_{(l)} \bullet k_{(l)} \bullet l_a + \rho_{(t)} \bullet k_{(t)} \bullet t_a ), \quad (8)$$

På basis heraf kan SUE ændres ved at justere trin 2 og 3:

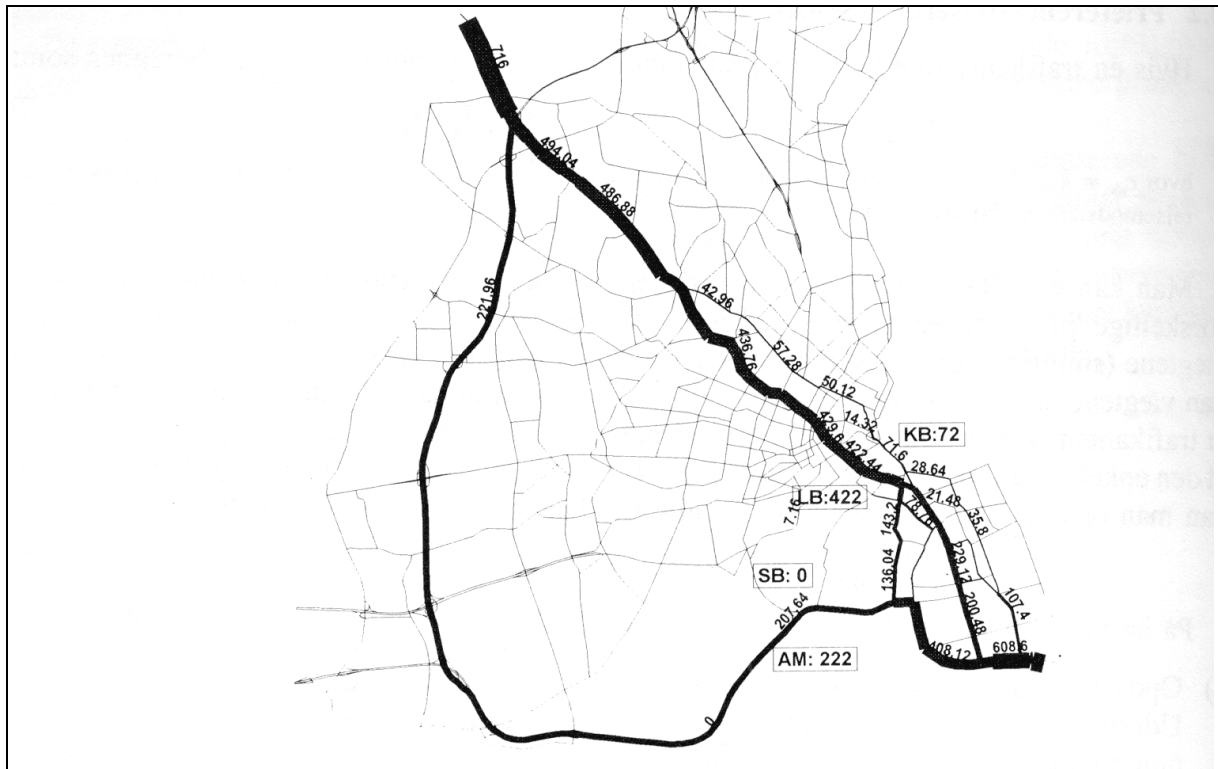
- 2) Opdatér rejsemodstandene: Udtag  $\rho_a$  for alle strækninger,  $a$ , og  $\rho_{(l)}$  og  $\rho_{(t)}$  én gang. Udregn  $c_{(\rho)a(n)}$  ved brug af formel 8, hvor  $t_a$  f.eks. følger BPR-formlen ( $n$  er iterationsnummeret).
- 3) Alt eller intet rutevalg: Fordel turmatricen på trafiknettet jvf. de opdaterede  $c_{(\rho)a(n)}$ 'er. Herved modelleres nye trafikmængder,  $T_{a(\text{tmp})}$ , for alle strækninger,  $a$ .

Hvis errortermene  $\rho_{(l)}$  og  $\rho_{(t)}$  er lig nul, er denne model lig den traditionelle SUE. Således vil trafikanterne følge ruter givet ved samme vægtning af rejsemodstande (som i figur 3 og 4). Hvis samtidig errortermen for  $\rho_a$  er forholdsvis stor, vil der være mange delalternativer til disse ruter.

Hvis errortermene for  $\rho_{(l)}$  og  $\rho_{(t)}$  modsat er forholdsvis store, vil trafikanterne også vælge mellem forskellige hovedalternativer (i eksemplet motorringvejen versus ruterne gennem byen. Hvis errorterm for  $\rho_a$  samtidig er lille vil trafikanterne ifølge modellen kun benytte få delalternativer til disse ruter. Hvis errortermen for  $\rho_a$  er lig nul, vil der kun vælges optimale ruter for de forskellige vægtninger af rejsemodstandene. I eksemplet er der kun fem sådanne optimale ruter<sup>1)</sup>.

Figur 5 viser rutevalgene med en fornuftig kombination af  $\rho_a$ ,  $\rho_{(l)}$  og  $\rho_{(t)}$ . Som det ses svarer dette langt bedre til observationerne end den strækningsbaserede SUE.

1) Motorringvejen blev valgt med,  $k_{(l)} \in [0,00; 0,07]$  ( $k_{(t)} = 1 - k_{(l)}$ ), og fire forskellige ruter gennem byen over Langebro i intervaller mellem 0,08; 0,22; 0,90; 0,96 og 1,00.



Figur 5 Modificeret SUE:  $k_1=0.2$ ,  $k_2=0.8$ ,  $\rho_a=0.2$ ,  $\rho_{(0)}=1.0$  og  $\rho_{(1)}=1.0$ .

### 4.3 Konvergensproblemer

Som tidligere nævnt, er successive gennemsnits metode (MSA) og varianter heraf, den eneste klasse af rutevalgmodeller, der er påvist at være konvergente. Imidlertid kan man stadig diskutere, hvor hurtigt MSA konvergerer, og hvordan det påvises, at den har fundet en stabil løsning (se f.eks. Powell & Sheffi, 1982, Sheffi, 1985, pp. 327-331 og Van Vuren, 1995). Hertil benyttes typisk to hovedtyper af stop-kriterier:

1. Sammenlign resultater (f.eks. trafikmængder eller rejsetider) fra de to sidste iterationer.
2. Sammenlign resultater med snittællinger eller målte rejsetider.

Det første kriterie tester til en vis grad om algoritmen er konvergeret (omend dette ikke nødvendigvis er tilfældet), mens det andet sikrer en rimelig overensstemmelse mellem model og observationer. Imidlertid er det forfatterens erfaring efter test af en række forskellige kriterier af ovennævnte type, at de ikke nødvendigvis sikrer en 'god' model. Sådanne problemer kan påvises ved at køre SUE to gange med samme forudsætninger (bortset fra nye Monte-Carlo simuleringer) og derefter sammenligne resultaterne. Selv om stopkriterierne er opfyldt, kan der nemlig være forholdsvis store marginale forskelle mellem modelkørsler. Dette vil give problemer, hvis modellen benyttes til at beskrive konsekvenserne af forskellige planforslag, f.eks. nye infrastrukturprojekter. Ofte vil det være umuligt at skelne mellem marginale forskelle og den stokastiske simulering i modellen, hvis kun de traditionelle konvergenskriterier er opfyldt.

I Nielsen (1996) diskuteres denne problemstilling nærmere, og en ny metode præsenteres, der konvergerer hurtigere. Tabel 1 viser beregningstider og forskellige karakteristika for IFP's

version af de to metoder brugt på to danske cases. Det benyttede antal iterationer sikrer konvergens - også set ud fra en marginal betragtning.

Case	Karakteristika		SUE		Optimeret SUE	
	Zoner	Strækninger	Iterationer	Tid (min)	Iterationer	Tid (min)
Næstvedtrafikmodellen	106	314	200	1,4	40	0,6
Hovedstadstrafikmodellen	269	2.765	500	64	100	30

*Tabel 1 Beregningstider for to danske modeller med SUE.*

## 5 FORTOLKNING OG BETYDNING AF DEN NYE MODELTYPE

Den væsentligste metodeforbedring ved den præferencebaserede SUE er, at den beskriver to typer 'stokastisk adfærd'. Den første ( $\rho_a$ ), beskriver trafikanters oplevelse af rejsemodstande på strækningniveau, mens den anden ( $\rho_{(i)}$  og  $\rho_{(j)}$ ) beskriver forskelle i trafikanternes præferencer.

Den *strækningsbaserede opfattelse* ( $\rho_a$ ) svarer i en vis grad til det sekventielle rutevalg, der blev introduceret i afsnit 2.2. Derudover gør  $\rho_a$  det muligt at håndtere overlappende ruter og derved undgå problemerne ved logit-modellerne. Dette dækker det meste af punkt 1, 2 og 3 i afsnit 2.3. Den *præferencebaserede opfattelse* svarer i en vis grad til det simultane rutevalg og gør det muligt at beskrive forskelle i trafikanters vægtning af rejsemodstande (deres præferencer eller nyttefunktioner) og forskelle i køreadfærd (punkt 4 og 5 i afsnit 2.3. Den *stræknings- og præferencebaserede opfattelse* kan da siges at dække det hierarkiske rutevalg. Dette princip dækker faktorerne i figur 1 bedre, end de to andre principper hver for sig.

I eksemplet med trafikken mellem Farum og Kastrup (figur 3, 4 og 5) gjorde brugen af  $\rho_{(i)}$  og  $\rho_{(j)}$  det muligt at reproducere det overordnede rutevalg mellem Motorringvejen og ruterne gennem byen. Derudover var modellen i stand til at beskrive, at del-alternativer blev valgt geografisk systematisk: Trafikanter over forskellige broer til Amager havde forskellige præferencer, hvilket påvirkede graden og typen af del-ruter i de forskellige oplande til de fire broer. Dette svarede glimrende til en detailanalyse af Vejdirektoratets undersøgelse (1990). Hvis SUE derimod som tidligere ikke tager højde for forskelle i præferencer, vil det kunne give systematiske afvigelser selv ved en strategisk brug af modellen. I eksemplet ville det for den samlede model (alle zone-par) f.eks. kunne lede til en forkert overordnet vurdering af konsekvenserne af en Havnetunnel.

## 6 PRAKTISKE ERFARINGER

Den modificerede SUE er med succes testet på en række fuld-skala trafikmodeller<sup>1)</sup>, der alle blev implementeret i et Geografisk Informationssystem. Ud over at lette arbejdet med modellerne gav dette langt bedre muligheder for kvalitetssikring af modellerne og analyse af

1) Modellen for biltrafikken til og fra Kbh. Lufthavn Kastrup (121 strækninger i det primære analyseområde, 25 zoner, Nielsen, 1994, 2), en model for Næstved med opland (versioner med 134 strækninger og 33 zoner og med 314 strækninger og 106 zoner, Nielsen, 1994, 2), en model for København (versioner med 2,422 strækninger, 97 zoner og med 2,765 strækninger og 269 zoner, Nielsen, 1994, 2), en model for lastbiltrafikken til og fra Kbh. Havn (endnu ikke offentliggjort), en model til vurdering af ombygningen af Helsingørmotorvejen (Jørgensen, 1996) og endelig en model for byen Bandung (5 mio. indb.) i Indonesien (980 strækninger og 180 zoner, Nielsen & Israelsen, 1996).

resultaterne end ved brug af traditionelle trafikmodelpakker<sup>1)</sup>.

En væsentlig del af kvalitetssikringen bestod i at undersøge træer af ruter til eller fra forskellige zoner, bundter af ruter mellem zoner, samt neg af ruter over en bestemt strækning. Dette vil erfaringsmæssigt kunne afsløre problemer, der ikke kan findes ved blot at undersøge de totale trafikstrømme (jvf. afsnit 3.1). Faktisk viste det sig i mange af modellerne, at parameterkombinationer i temmelig store intervaller gav stort set samme gennemsnitlige afvigelser fra snittællinger (Nielsen, 1996). Således var det her essentielt at benytte mere nuancerede metoder til at estimere parametrene, såsom de nævnte træer, bundter eller neg af ruter.

Den matrixestimationsmetode, der benyttes til at estimere OD-matricen, bør svare til den benyttede rutevalgsmodel. Er dette ikke tilfældet, vil matricen blive skæv-vredet. Desværre estimeres matricer alligevel ofte med metoder, der bygger på for simplificerede rutevalgsmodeller, mens der benyttes mere avancerede rutevalgsmodeller, som en del af de færdige trafikmodeller. Dette giver en klar inkonsistens mellem estimation og brug af trafikmodellerne. Nielsen (1994, 1 & 2) beskriver forskellige kendte matrixestimationsmetoder, mens Nielsen & Israelsen (1996), Jørgensen (1996) og Frederiksen (1996) benytter en ny forbedret metode, 'Multiple Path Matrix Estimation Method (MPME)', der skitseres i Nielsen (1994, 1) og operationaliseres i Nielsen (1997). Metoden er en forbedring i forhold til 'Single Path Matrix Estimation (SPME)' (Nielsen, 1994, 1), der i sig selv gav en række metodiske fordele i forhold til tidligere metoder. SPME har med succes været benyttet i en række modelarbejder i Danmark (Nielsen, 1994, 2) og i udlandet (Caliper, 1996<sup>1)</sup>).

## 7 PERSPEKTIVER FOR FREMTIDIG FORSKNING

De praktiske modelafprøvninger peger på en række emner, der bør undersøges nærmere. En række af disse har en mere algoritmæssig karakter (se Nielsen, 1996 og Van Vuren, 1995), mens følgende har en mere generel karakter:

Alle afprøvningerne af SUE i København pegede på et behov for at kunne modellere forsinkelser i knudepunkter (primært vejkryds og rundkørsler, men i mindre omfang også kilestrækninger). I mange tilfælde er det forsinkelser i knudepunkter, og ikke strækningskapaciteter, der er flaske-halse i trafiknettet. Derudover er der også ved lave trafikbelastninger en forsinkelse i knudepunkter (f.eks. deceleration, venten for rødt lys, acceleration). For at tage højde herfor kan der implementeres en knudepunktsmodel som en del af trin 2 og 3 i SUE. I GIS-T projektet arbejdes for øjeblikket dels med denne videreudbygning af SUE, dels med at udvikle en GIS-baseret 'netfortolker', der ud fra vejtyper, antal kørespor, hastigheder og trafikmængder kan automatisere opbygningen af data for vejknuder. Dette er nødvendigt, da dette ellers ville kræve et uforholdsmæssigt stort arbejde.

En yderligere videreudbygning af SUE kunne være at indbygge afhængigheder mellem flere

---

1) SUE blev implementeret i C af Frederiksen & Simonsen (1996). Selvom modellen primært tænkes benyttet sammen med et geografisk informationssystem (GIS), kan den således også benyttes uafhængigt heraf. Alt-eller-intet delen blev optimeret for at sikre en hurtigere beregningstid end i de traditionelle trafikmodelpakker. For øjeblikket programmeres en Windows-baseret brugerflade for at lette brugen. En del af denne er et slags ekspertsystem, der kan assistere brugeren med at specificere de mange parametre, der indgår i modellen (en række parametre, herunder stopkriterier og muligheder for analyser er ikke beskrevet i detaljer i denne artikel).

2) Metoden er implementeret af det amerikanske firma Caliper Corporation i GIS-T'et TransCAD på basis af Nielsen (1993) og (1994, 1).

strækninger og knudepunkter, f.eks. for at kunne beskrive lange køer eller grønne bølger. Sheffi (1985) giver nogle retningslinier herfor, men det vil kræve et stort arbejde at implementere sådanne metoder, indsamle det nødvendige data samt validere metoderne.

Et andet forskningsemne er at bygge videre på det beskrevne koncept for også at forbedre modelleringen af rutevalg for kollektiv trafik. Her vil forskelle mellem præferencer være særligt relevant, f.eks. for at beskrive forskellige vægtninger af ventetid, køretid, forskellige transportmidler, skiftetid, antal skift, skjult ventetid, etc. Muligvis vil metoden endda kunne udvides til at behandle transportmiddelvalg.

## **8 KONKLUSION OG DISKUSSION**

I artiklen er forskellige rutevalgsmodeller præsenteret og diskuteret. Konklusionen er, at der for bytrafik altid bør benyttes modeller, der både er stokastiske og trafikafhængige. Af trafikafhængige modeller er det hidtil kun vist, at Successive Gennemsnits Metode (MSA) er konvergent. Stochastic User Equilibrium metoden (SUE) bygger på dette princip, men tager derudover hensyn til, at rutevalg rummer et stokastisk element. Dette element bør modelleres af en probit-model snarere end en logitmodel, da der ellers ikke tages hensyn til, at ruter ofte er afhængige variable.

I artiklen præsenteres en forbedret udgave af SUE, der rummer to typer stokastiske faktorer - den ene beskriver trafikanters 'oplevede' rejsemodstande på strækningsniveauet (som i den traditionelle SUE), mens den anden beskriver forskelle i trafikanternes præferencer. Denne model har vist sig at give en mere realistisk beskrivelse af trafikstrømme i tilfælde, hvor både rejse længde (eller omkostning) og rejsetid har en betydning for trafikanters rutevalg. Dette er tilfældet i Danmark.

Set i et bredere perspektiv kan der drages paralleller mellem diskussionen af rutevalgsmodellerne og modeller for transportmiddelvalg. Eksempelvis er ulemperne ved logit-modellens forudsætning om gensidig uafhængighed mellem alternativer også gældende for transportmiddelvalg (f.eks. valg mellem bil, cykel, tog, bus og S-bus). Ved anvendelse af probitmodeller for transportmiddelvalg kan forudsætningen om gensidig uafhængighed undgås ligesom for rutevalg. Dette undersøges nærmere i IFP's GIS-T projekt i samarbejde med TetraPlan a/s.

En anden parallelitet er, at den nye tilgang med modellering af forskelle mellem trafikanters præferencer (vægtning af de enkelte elementer i rejsemodstandsfunktionen) kan tolkes som, at nyttefunktionen ikke blot kan opfattes som én variabel i logit- og probitmodeller. Dette underbygger den diskussion om logitmodeller, der var i Nielsen (1995) og Gärling (1994).

I rutevalgsmodeller for biltrafik, giver den præsenterede metode en væsentlig bedre overensstemmelse med, trafikanters rutevalg. For modeller for kollektiv trafik rummer den præsenterede metode et stort potentiale, hvilket vil blive undersøgt nærmere i det videre forløb af GIS-T projektet.

*Stud polyt Rasmus Dyhr Frederiksen og Nikolaj Simonsen takkes for hjælp til at implementere den foreslåede metode og for hjælp i nogle af case-studierne, Stud Polyt Erik Rude Nielsen & Thomas Israelsen takkes for test på Bandung-modellen og Civ.Ing. Susan Galsøe for korrekturlæsning. Transportrådet takkes for økonomisk støtte til GIS-T projektet.*

## REFERENCER

- Bovy, P.H.L. & Stern, E (1990). *Route Choice: Wayfinding in Transport Networks*. Kluwer Academic Publishers, Studies in Operational Regional Science, Vol. 9.
- Caliper Corporation. *Travel Demand Modelling with TransCAD 3.0*. 1996, Newton, Massachusetts.
- 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.
- Frank, M & Wolfe, P (1956). An Algorithm for Quadratic Programming. *Naval Research Logistics Quarterly*. No. 3(1-2). pp.95-110.
- Frederiksen, Rasmus Dyhr & Simonsen, Nikolaj (1996). *GIS-Baseret modellering af rutevalg*. 18-points projekt, IFP, DTU.
- Frederiksen, Rasmus Dyhr. (1996). *Forbedrede metoder til estimation af turmatricer*. 12 points kursusarbejde under afslutning, IFP, DTU.
- Gärling, Tommy. (1994). Behavioral assumptions overlooked in travel choice modelling. *Seventh International Conference on Travel Behaviour*, 1994, pp.115-126.
- Jørgensen, Lars. (1996). *Brug af GIS-baserede rutevalgsmodeller til vurdering af trafikale konsekvenser af ombygningen af Helsingørmotorvejen*. 12 points opgave, IFP, DTU.
- Matthäi, Line L. & Stanton, Bill. (1993). *Traffic Planning in Copenhagen using TransCAD*. Eksamensprojekt, IVTB (nu IFP), DTU.
- Nielsen, Otto Anker. (1993). *A new method for estimating trip matrices from traffic counts*. Paper 1993-3, IVTB, DTU.
- Nielsen, Otto Anker. (1994,1). A new method for estimating trip matrices from traffic counts. *Seventh International Conference on Travel Behaviour*, Chile. Preprints. pp.2-14.
- Nielsen, Otto Anker. (1994, 2). *Optimal brug af trafikmodeller - En analyse af persontrafikmodeller med henblik på dataøkonomi og validitet*. Ph.D. afhandling. Rapport 76, IVTB (nu IFP), DTU.
- Nielsen, Otto Anker. (1995). En diskussion af dagens brug af trafikmodeller - teori og empiri. *Trafikdage på AUC '95. Bind 2*, pp. 633-652.
- Nielsen, Otto Anker. (1996). Do Stochastic Traffic Assignment Models Consider Differences in Road Users Utility Functions?. Paper to be presented at *24th European Transport Forum" (PTRC annual Meeting), London, UK. Seminar M*.
- Nielsen, Otto Anker. (1997). Multiple-Path OD-Matrix estimation (MPME) based on Stochastic user Equilibrium Traffic Assignment. Paper submitted to *TRB'97*.
- Nielsen, Erik Rude & Israelsen, Thomas. (1996). *Implementing a Traffic Model for Bandung using GIS*. Eksamensprojekt, IFP, DTU.
- Ortúzar, J.de D. & Willumsen, L.G (1990). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons.
- Powell, W.B. & Sheffi, Y. (1982). The Convergence of Equilibrium Algorithms with Predetermined Step Sizes. *Transportation Science*. No. 16(1). pp.45-55.
- Sheffi, Yosef. (1985). *Urban Transportation Networks*. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ.
- 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.

Thomas, R. (1991). *Traffic Assignment Techniques*. Avebury Technical, The Academic Publishing Group.

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.

Vejdirektoratet, ØSA (1990). *Biltrafikken mod Københavns Lufthavn Kastrup - Analyse og vurdering af konsekvenserne af en Tårnbymotorvej*. Udført af Anders Nyvig a/s.