



**TØI notat
1126/1999**

Transportmodeller for helhetlig samferdselsplanlegging

En kort oversikt over teori og metode

Jens Rekdal

Tittel: Transportmodeller for helhetlig samferdselsplanlegging. En kort oversikt over teori og metode

Forfatter(e): Jens Rekdal

TØI notat 1126/1999
Oslo, 1999-01
84 sider
ISSN 0806-9999

Finansieringskilde:

Vegdirektoratet

Prosjekt: 2415 Bruk av transportmodeller til vurdering av tiltak i kollektivtransport

Prosjektleder: Jens Rekdal

Kvalitetsansvarlig: Odd I Larsen

Emneord:

EMME/2 (EMMA); TRIPS; VIPS; Gravitasjonsmodeller; Logitmodeller; Reisemiddelvalg; Veivalg; Rutevalg; VD-funksjoner; Generalisert reisekostnad

Sammendrag:

Transportmodeller har lenge vært et viktig verktøy for planleggingen i transportsektoren. Hvis det er snakk om en helhetlig planlegging på tvers av de tradisjonelle delsektorene i transport, er det nærliggende å benytte modeller som har en geografisk dimensjon og som behandler de aktuelle reisemåter under ett. I dette notatet har vi forsøkt å gi et innblikk i hvordan denne type modeller er bygget opp, hvilke teorier og forutsetninger som ligger bak, og hvilke problemstillinger disse modellene er egnet til å belyse. Vi belyser prinsippene i de ulike vei- og rutevalgsalgoritmer som blir benyttet, prinsippene i gravitasjonsmodeller og logitmodeller, og hvordan firetrinns-modellene er bygget opp. Til slutt gir vi eksempler på hvordan man med begrensede ressurser kan etablere mer ad hoc-baserte modeller, som kan ha ett eller flere trinn til felles med firetrinns-modellene.

Title: Transport Models as a Transport Planning Tool. A Short Summary of Theories and Methods

Author(s): Jens Rekdal

TØI working report 1126/1999
Oslo: January 1999
84 pages
ISSN 0806-9999

Financed by:

Norwegian Public Roads Administration

Project: 2415 Transport models as a tool for the evaluation of public transport projects

Project manager: Jens Rekdal

Quality manager: Odd I Larsen

Key words:

EMME/2; TRIPS; VIPS; Gravitymodels; Discrete choice models; Mode choice; Route choice; VD-curves; Generalised travel time/cost

Summary:

There is a long tradition in the use of different types of models in transport planning. In multimodal planning spatial models offer great advantages with respect to an explicit treatment of route choice, mode choice, and geographical differences in transport level of service, which in turn can influence destination choice and travel frequencies. In this document we have tried to highlight the different elements in such models and the theories and assumptions behind them. We look into the principals and algorithms in route choice models for auto and transit assignment, theories and principles behind spatial interaction models, discrete choice models, and the traditional four-stage model. The document is concluded with some examples of how one, with limited resources on ad hoc basis, can establish models with one or more stages in common with the four-stage model.

Language of working report: Norwegian

Notatet kan bestilles fra:
Transportøkonomisk institutt, Biblioteket
Gaustadalleen 21, 0349 Oslo
Telefon 22 57 38 00 - www.toi.no

The working report can be ordered from:
Institute of Transport Economics, The library
Gaustadalleen 21, NO 0349 Oslo, Norway
Telephone +47 22 57 38 00 - www.toi.no

Forord

Vegdirektoratet har startet etatsprosjektet "Kollektivtransport" som blant annet innebærer en større satsing på transportplanlegging på tvers av de tradisjonelle skillelinjene mellom privat og kollektiv transport. Stadig større krav knyttet til økt mobilitet, kostnadseffektive transportløsninger og økte miljøkrav til transportsektoren medfører økte krav til samferdselsplanleggingen, til planleggere og dermed også til de verktøy og metoder som benyttes i planleggingen. Som en del av Vegdirektoratets etatsprogram er TØI engasjert til å gi en oversikt over teori og metodikk knyttet til geografiske, transportmiddelovergrepene transportmodeller, som i mange sammenhenger kan hevdes å være et nyttig og egnet hjelpemiddel i samferdselsplanleggingen.

Cand polit Jens Rekdal har vært prosjektleder fra TØIs side, og har også skrevet dette dokumentet. Forskningsleder Odd I Larsen har bidratt med faglige kommentarer underveis og har også stått for kvalitetssikringen. Fra Vegdirektoratets side har Ole A. Hagen vært prosjektleder og har også bidratt med nyttige kommentarer til innholdet i prosjektet. Avdelingssekretær Kari Tangen har hatt ansvaret for den endelige utformingen av dokumentet.

Oslo, januar 1999
TRANSPORTØKONOMISK INSTITUTT

Ingunn Stangeby
avdelingsleder

Innhold

Sammendrag

1 Innledning	1
2 Turmatriser	7
2.1 Reisemåter og reisemidler	7
2.2 Periodisering	8
2.3 Reiseformål	9
2.4 Behandling av turkjeder	10
3 Transportnettverk, vei- og rutevalg	13
3.1 Transportnettverk.....	14
3.1.1 Veinett.....	16
3.1.2 Kollektivnett	20
3.1.3 Kombinerte reisemåter.....	21
3.2 Rute- og veivalgsmodeller	21
3.2.1 Veivalgsmodeller for bilister	21
3.2.2 Rutevalgsmodeller for kollektivtrafikk.....	25
4 Etterspørselsmodeller	31
4.1 Gravitasjonsmetodikk	31
4.1.1 Hovedtrekk ved entropimaksimering	33
4.1.2 Generering og attrahering av turer.....	34
4.1.3 Turfordeling	37
4.1.4 Reisemiddelfordeling.....	39
4.1.5 Nærmere om avstandsfunksjoner.....	39
4.2 Modeller for diskrete valg.....	40
4.2.1 Hovedtrekk i teorien for diskrete valg.....	42
4.2.2 Et mål på tilgjengelighet - Logsummen.....	46
4.2.3 Modeller for valg av reisemiddel og destinasjon.....	46
4.2.4 Modeller for valg av reisefrekvens	51
4.2.5 Aggregering og implementering av disaggregerte modeller	53
4.2.6 Preferansefunksjoner eller avstandsfunksjoner	55
4.3 Noen praktiske sider ved metoder og modeller	56
4.3.1 Sterke og svake sider ved aggregert og disaggregert modellkonsept...	56
4.3.2 Estimering og kalibrering	56
4.3.3 Etterspørselseffekter, prognoser og fremskrivninger	57
4.3.4 Kobling mellom tilbud og etterspørsel	58
4.3.5 Lenkebaserte eller matrisebaserte beregninger av totale tidsbesparelser ("ingeniørssyndromet").....	60
4.3.6 Valg av 0-alternativ i prosjektanalyser	62

5 Ad hoc-modeller	63
5.1 Etablering av turmatriser	63
5.2 En modell som behandler kombinerte reisemåter.....	66
5.2.1 Nyttefunksjon for bilalternativet.....	68
5.2.2 Nyttefunksjon for kollektivalternativet.....	69
5.2.3 Nyttefunksjon for Park & Ride-alternativet	69
5.2.4 Kalibrering av alternativspesifikke konstanter	70
5.2.5 Oppsummering om PARI-modellen	73
5.3 En modell som behandler valg av reisetidspunkt	74
Litteratur	78
Vedlegg 1: Nærmere om vd-funksjoner	81
Vedlegg 2: Nærmere om Gumbel-fordelingens egenskaper	83

Sammendrag:

Transportmodeller for helhetlig samferdselsplanlegging

En kort oversikt over teori og metode

Dette dokumentet tar for seg en spesiell type planleggingsverktøy som har en relativt lang tradisjon innenfor samferdselsplanleggingen. Det dreier seg om en spesiell klasse av transportmodeller som har det til felles at de behandler etterspørselen etter alle viktige reisemåter i et studieområde og at de har en geografisk dimensjon. Den geografiske dimensjonen er ivaretatt ved en inndeling av studieområdet i et vanligvis stort antall delområder, eller soner. Etterspørselen blir målt i antall turer eller reiser mellom disse sonene, og disse turene fordeles altså også på de mulige reisemåtene mellom sonene. Slik sett kan hvert sonepar, ofte betegnet med begrepet sonerelasjon, betraktes som et delmarked eller markedssegment i det totalmarkedet som studeres. Tilbudssiden i denne type modeller består av forenklede matematisk formulerte versjoner av det transporttilbudet som finnes i studieområdet. Transporttilbudet i et område består vanligvis av et omfattende nettverk av veier, bussruter og andre kollektive transportmidler som for eksempel trikk, bane, tog og båt som knytter de ulike delområder sammen.

Innledningsvis i dokumentet gis kort gjennomgang av hvilke prosjekter og tiltak denne type modeller er egnet til å analysere og en kort beskrivelse av firetrinns-metodikken, som er en svært populær modelltype for transportmodeller. Deretter tar vi i kapittel 2 opp definisjoner og problemstillinger knyttet til turmatriser som danner hovedresultatet fra etterspørselsmodellene og er sentrale input i vei- og rutevalgmodellene. Hovedprinsippene bak etablering og kjøring av vei- og rutevalgmodellene er belyst litt mer i detalj i kapittel 3, mens etterspørselsmodellene er behandlet i kapittel 4. Her tar vi først for oss de ulike trinnene i gravitasjonsmetodikken, og så oppsummeres hovedpoengene ved teorien for diskrete valg, estimering av logitmodeller, og etablering av firetrinns-modeller basert på denne metoden, før avsnittet avsluttes med en oppsummering og noen kommentarer knyttet til praktisk bruk av modellene. I kapittel 5 forsøker vi å synliggjøre hvordan man med relativt begrensede ressurser, og litt ad hoc-basert, kan etablere relativt enkle transportmodeller som kan gi realistiske og interessante resultater. Slike modeller kan ha ett eller flere trinn til felles med de tradisjonelle firetrinns-modellene, men kan være vesentlig mer detaljert langs enkelte dimensjoner.

Notatet kan bestilles fra:

Transportøkonomisk institutt, Postboks 6110 Etterstad, 0602 Oslo

Telefon: 22 57 38 00 Telefax: 22 57 02 90

Firetrinns-modeller

De geografiske transportmodellene representerer et relativt ambisiøst forsøk på å kunne beregne prognoser for hvordan endringer i transportnettene, i form av endringer i infrastruktur, rutetilbud, priser, avgifter med mer, vil slå ut i endret etterspørsel mellom transportmidler, mellom geografiske områder, og reiseomfang generelt.

Den vanligste modelltypen når det gjelder transportplanlegging er en stor klasse modeller som kan betegnes som firetrinns-modeller. Betegnelsen stammer fra det forhold at modellene behandler fire typer beslutninger som er spesielt viktig i forbindelse med persontransport. Tradisjonelt har de fire trinnene vært behandlet sekvensielt og adskilt i egne modeller for hvert trinn, og dette gjøres fortsatt i mange modellsystemer. Utviklingen både når det gjelder teori og metode har imidlertid gjort det mulig å behandle de fire trinnene som mer eller mindre simultane beslutninger hvor rekkefølgen egentlig spiller en mindre rolle. Dette skjer gjennom mer eller mindre sterke koblinger mellom modellene på de ulike nivåene. De fire trinnene er:

1. **Veivalg for bilister og rutevalg for kollektivtrafikanter.** Hvis et gitt antall reiser skal foretas med en gitt reisemåte mellom to soner dreier det seg her om å fordele disse reisene på mulige reiseruter, enten langs veinettet, langs det kollektive transportnett eller langs gang- og sykkelveinettet. Reisetider for ulike deler av reisen og reisekostnader spiller viktige roller i denne type modeller.
2. **Reisemiddelvalg/reisemiddelfordeling.** Hvis et gitt antall reiser skal gjennomføres mellom to soner, behandler disse modellene fordelingen på de mulige reisemåter som finnes mellom de to sonene for eksempel bil, buss eller tog (avhengig av det faktiske transporttilbudet mellom de to soner). Viktige variable i denne type modeller er reisetider og reisekostnader for de tilgjengelige reisemåtene. Ofte tas også kjennetegn ved trafikantene med i denne type modeller, så som førerkortinnehav, bilhold, parkeringsmuligheter, og man forsøker ofte også på andre måter å segmentere trafikantene etter deres tilbøyelighet til å foretrekke spesielle reisemåter (indikatorer kan være kjønn, alder, rabattordninger, firmabil, med mer).
3. **Destinasjonsvalg/turfordeling.** Gitt at et bestemt antall reiser starter i en bestemt sone, vil denne type modeller fordele disse reisene på alle mulige reisemål. Reisemålene kan være alle soner området er delt inn i, inkludert den sonen hvor reisen starter. Grunnlaget for denne fordelingen er mål på de ulike soners attraktivitet som reisemål, indikert ved antall arbeidsplasser fordelt på næringer, antall bosatte og forekomsten av andre forhold i sonen som trekker til seg turer (idrettsanlegg, skoler, arealer til bestemte aktiviteter med mer). En soners attraktivitet vil også avhenge av hvor lett det er å komme seg dit. De mest avanserte modellene benytter her vanligvis et mål på samlede generaliserte kostnader fra startsonen til de øvrige soner. Det ”beste” målet på generaliserte kostnader viser seg å være det som i litteraturen betegnes for **logsummer**. Logsummen er kort sagt, og som betegnelsen antyder, logaritmen til en vektet sum av reisetider og reisekostnader for hver transportmåte, summert over alle transportmåter.
4. **Frekvensvalg/turgenerering.** I dette trinn er modeller som bestemmer hvor mange reiser som starter i hver sone i løpet av en gitt periode, for eksempel en

bestemt gjennomsnittstime (morgen-/ettermiddagsrush, ulike lavtrafikkperioder) eller et gjennomsnittsdøgn (ÅDT eller VDT). Sentrale variable i denne type modeller er antall hushold eller bosatte fordelt på kategorier kombinert med karakterstikker av husholdene innenfor hver kategori for eksempel når det gjelder inntekt, bilhold, sysselsetting, arbeidstidsordninger, med mer (bostedsbaserte modeller). Det kan imidlertid også være variabler knyttet til annet soneinnhold som genererer turer, avhengig av hvilket turbegrep som benyttes (delturer, rundturer, turkjeder).

Trinnene 3-4 benyttes til å generere etterspørsel i form av turmatriser, og disse fordeles på de ulike nettverkene i trinn 1. I de fire trinnene som er omtalt over savnes beslutningen om når en reise skal foretas. En mer langsiktig beslutning som påvirker trafikantenes reisehyppighet, nemlig bilholdet, trekkes heller ikke direkte inn som et eget nivå. I mange modeller kommer bilholdet likevel inn som segmenteringsvariabel i modellene for reisemiddelvalg og frekvensvalg. Grovt sett kan man si at det finnes to alternative tilnæringsmåter i etableringen av slike firetrinns-modeller. Det er en aggregert måte, som kan gis samlebetegnelsen gravitasjonsmodeller, og en disaggregert måte, som bygger på teorien for diskrete valg. Man kan også etablere "hybrid"-modeller som bruker gravitasjonsmetodikken til å beregne turmatriser, og modeller for diskrete valg, logitmodeller, til å fordele disse turene mellom reisemåter. Vei- og rutevalgmodellene inngår som et viktig element i firetrinns-modellene og benyttes også ofte alene i enkelte analyser.

Vei- og rutevalgmodeller

Denne type modeller er implementert i en del spesielle programpakker som er kommersielt tilgjengelig på programvaremarkedet på lik linje med for eksempel SPSS, EXCEL og annen software. Det spesielle med disse programpakkene er at de er utviklet med tanke på behandling av soner, turmatriser og ulike nettverk for privat og rutegående transport. I Norden er det hovedsakelig tre konkurrerende programpakker som benyttes i ulik grad av ulike miljøer i samferdselsetater, ved universiteter, av konsulenter og forskningsmiljøer. Dette er TRIPS, EMME/2 (EMMA) og VIPS. Det er forskjeller mellom disse programpakkene både når det gjelder algoritmer, funksjoner og ikke minst brukergrensesnitt. Forskjellene er imidlertid mest sannsynlig ikke så store at noen kan utrope én av dem som best. Noen er nok mer avanserte enn andre langs enkelte dimensjoner, men neppe i så stor grad at man får motstridende konklusjoner i analyser av det samme tiltak, hvis man har noenlunde samme forutsetninger.

Til grunn for **bilistenes veivalg** ligger først og fremst et kodet veinett. Et kodet veinett består av nummererte noder (vanligvis veikryss eller punkter der veien endrer karakter) og veilenker som binder nodene og sonene sammen. En lenke defineres for hver kjøreretning, slik at en toveiskjørt gate består av to lenker. Til nodene knyttes ofte kartkoordinater slik at veinettet kan fremstilles grafisk. Til lenkene knyttes vanligvis kjennetegn som lengde, skiltet hastighet, kapasitet pr kjørefelt, antall kjørefelt, og i byområder også en funksjonsmessig sammenheng mellom trafikkvolum på lenken og reisetid eller hastighet på den. Det kan også være spesiell koding knyttet til svingeforbud og forsinkelser i veikryss. Et veinett kan kodes mer eller mindre detaljert avhengig av den ressursbruk som anses hensiktsmessig.

Den *adferdsmessige forutsetning* som ligger bak en veivalgsmodell er enkel: Man forutsetter at alle biltrafikanter har full informasjon og foretar det veivalg som er best. Det kritiske her er hvilken forutsetning eller hvilket kriterium man skal benytte på ”det beste veivalg”. Det er tre kriterier som blir benyttet i denne sammenheng: raskeste vei, korteste vei og billigste vei. Det siste kriteriet innebærer bruk av generaliserte kostnader, en vektet sum av tid og kjørekostnader, der kjørekostnader kan avhenge av distanse, hastighet og monetære utlegg, for eksempel bompenger. De atferdsmessige forutsetninger som legges til grunn i en veivalgsberegning spiller nok større rolle for resultatene enn hvilken av de tre programpakkene som benyttes.

Spesielle problemer oppstår **når det er køer i veinettet**. Da vil hastigheten og kjøretiden avhenge av hvor mye trafikk det er på de enkelte veilenker. For ca 20 år siden ble det utviklet algoritmer også for dette problem. Poenget her er å få en trafikkfordeling i systemet som gir likevekt. Likevekt i denne sammenheng innebærer at alle kjøreruter som benyttes mellom to soner skal gi identiske reisetider/reisekostnader, mens alle andre mulige kjøreruter gir lengre reisetider/høyere kostnader. I likevekt har altså ingen bilister mulighet til å redusere reisetidene/-kostnadene ved å endre rutevalg. Alle de seriøse programpakkene har en algoritme for likevekt implementert. Noen programpakker har også andre prinsipper for fordeling av trafikk i et købelastet veinett. Disse gir imidlertid ikke en likevekt og bør derfor unngås, i hvert fall i analyser hvor reisetider/kostnader skal benyttes videre for eksempel i nytte-kostnadsanalyser.

Som grunnlag for modeller for **kollektivtrafikanteres rutevalg** må vi ha et kodet kollektivsystem. Dette består av et underliggende system av noder og lenker som representerer infrastrukturen i det området vi studerer. Kollektivrutene kodes som egne enheter som beveger seg i bestemte rutetraseer i infrastrukturnettet. For bussruter vil dette nettet bestå av veilenker, mens egne lenker og noder må kodes inn for ruter som går på egen trasé. En kollektivrute består av en sekvens med noder som ruten passerer mellom sine termini. Noen noder kan være holdeplasser hvor trafikantene gis anledning til å stige på eller gå av og hvor kollektivruten gjør et lite opphold. Andre noder passerer uten stopp for på- og avstigning. Kjøretiden mellom nodene og rutens frekvens er også viktige parametre, sammen med regulerings- og ventetid ved terminalene, vogntype og passasjerkapasitet.

De veivalgsmodeller som benyttes for kollektivtrafikk er noe mer avanserte enn de vi har for biltrafikk. De tar hensyn til at trafikantene både har gangtid, ventetid og eventuelt omstigningsulempe i tillegg til fremføringstiden om bord i kollektivrutene, og at disse reisetidskomponentene vektet forskjellig av trafikantene.

I et komplisert kollektivsystem vil det i tillegg sjelden være én bestemt reiserute som er entydig best. Dette gjør at moderne rutevalgsalgoritmer er basert på en strategitankegang. I stedet for en bestemt reiserute velger trafikantene en strategi for en reise mellom to punkter. Kommer for eksempel en trafikant til en holdeplass som betjenes av flere ruter, er det mulig at den endelige reiseruten bestemmes av hvilken av rutene som ankommer holdeplassen først. En optimal strategi kan hevdes å være en strategi som minimerer total forventet fremføringstid for hele reisen fra start- til målpunkt, hensyn tatt til alle reisetidskomponenter og vektleggingen av disse.

Hovedprinsippet i algoritmen er at det på hver holdeplass som passerer for en tur mellom to punkter, bestemmes et sett med ”attraktive” ruter som er attraktive i den forstand at hvis man legger en annen rute til, eller trekker en attraktiv rute fra dette

sett, så øker forventet fremføringstid i begge situasjoner. Slik sett vil det være en ”trade off” mellom økt frekvens, og dermed lavere ventetid ved å legge nye ruter til i det attraktive sett, og ulemper knyttet til at de ”nestbeste” rutene nødvendigvis vil medføre lengre tid knyttet til andre reisetidskomponenter (lengre gangtid, lavere fremføringstid). Når det attraktive settet med kollektivruter er fastsatt, fordeles trafikken på dem etter relativ frekvens. På samme måte som ved veivalgsmoellene for bilister er trafikkfordelingen på ruter og traseer, avhengig av de atferdsmessige forutsetninger som legges til grunn (vektfaktorer for reisetidskomponentene). Realistiske forutsetninger er sannsynligvis igjen viktigere for realistiske rutevalg enn hvilken av de tre programpakkene som benyttes.

Gravitasjonsmodeller

Gravitasjonsmetodikken er basert på en aggregert tilnæringsmåte for å etablere etterspørsel i form av turer mellom delområder i studieområdet. Litt forenklet kan man si at denne metoden fordeler et gitt antall turer i en turmatrise proporsjonalt med forekomsten av genererende og attraherende faktorer i sonene, og omvendt proporsjonalt med avstanden mellom sonene. I gravitasjonsmodellene beregnes sonenes genereringsevne og attraheringsevne først. Dette gjøres gjennom egne separate modeller for turgenerering og turattrahering. I genereringsmodellene er befolkningsstørrelsen en sentral variabel. Det er vanlig at befolkningen i hver sone er kategorisert etter segmenter med ulike reisefrekvens. Det er for eksempel grunn til å anta at sysselsatte reiser oftere enn barn og pensjonister. Bilhold er også en sentral variabel i disse modellene, og antall arbeidsplasser fordelt på ulike næringer kan fungere som en indikatorvariabel for generering av turer som ikke starter hjemme.

I attraheringsmodellene er antall arbeidsplasser den mest sentrale variabel. Spesielt for reiser til arbeid vil antall arbeidsplasser kunne gi gode indikasjoner på hvor mange reiser som ender opp i hver sone. Det er vanlig å dele arbeidsplassene inn etter næring (antall arbeidsplasser i varehandel, servicenæringer, industri, forvaltning med mer) eller i hvert fall etter publikumsattraktive og ikke publikumsattraktive arbeidsplasser. Antall arbeidsplasser er imidlertid sjelden tilstrekkelig til å fange opp alle type reiser som ender i en sone. Besøksreiser og ulike typer fritidsreiser kan ende opp i områder med få eller ingen arbeidsplasser. Utfordringen ligger her i å formulere estimerbare mål på soners attraktivitet når det gjelder denne type reiser.

Det er, kanskje med unntak for arbeidsreiser, vesentlig vanskeligere å estimere brukbare attraheringsmodeller enn genereringsmodeller. Dette skyldes at man ved estimering av genereringsmodeller i stor grad kan benytte data fra reisevaneundersøkelser som inneholder gode data for de aktuelle forklaringsfaktorene. Når det gjelder attraheringsmodeller, gir ikke reisevaneundersøkelsene alltid like gode data, og man blir dermed i større grad avhengig av aggregerte data for sonene til å etablere disse sammenhengene.

Neste steg i gravitasjonsmetodikken består i å fastsette en avstandsfunksjon som passer for den type reiser og det området man studerer. Hvis man plotter antall reiser i en reisevaneundersøkelse etter reiseavstand, vil man kunne danne seg et bilde av dette. Problemet blir da å velge en funksjonsform for avstandsfunksjonen som passer med den reiseavstandsfordelingen som ligger i reisevaneundersøkelsen.

Man ender her ofte opp men en énparameterfunksjon som avtar med reiseavstanden, ofte en negativ eksponensialfunksjon eller en negativ potensfunksjon.

Når antall turer til alle soner og antall turer fra alle soner og formen på avstandsfunksjonen er bestemt, gjenstår det å fordele turene på hvert enkelt element i turmatrisen. Her benytter man seg vanligvis av en metodikk som kalles entropimaksimering, som finner den mest sannsynlige turmatrisen som stemmer overens med de betingelser som er bestemt av antall turer fra og til sonene fra genererings- og attraheringsmodellene, og avstandsfunksjonen. Entropimaksimering kan også benyttes til å fordele antall turer på reisemåter. Her er det imidlertid et problem at avstandsfordelingen for ulike reisemidler kan være vidt forskjellig. Som nevnt er avstandsfunksjonen vanligvis en funksjon med bare én parameter. Det viser seg ofte i praksis at det er for mye forlangt for en eneste parameter å gi realistiske fordelinger både på reisemåter og avstand. Dette betyr at det ideelt sett burde vært en parameter for avstandsfølsomhet for hvert reisemiddel. Hvis man innfører en parameter for hvert reisemiddel, vil denne type gravitasjonsmodeller begynne å nærme seg logitmodellene både i utseende og funksjon. Faktisk vil en slik gravitasjonsmodell være et spesialtilfelle av en tilsvarende enkel logitmodell for reisemiddelvalg.

Logitmodeller

Teorien for diskrete valg tar mål av seg til å være konsistent med mikroøkonomisk teori. Vi skal imidlertid ikke insistere på en slik konsistens, da teorien ser ut til å stå utmerket godt på egne ben. I motsetning til gravitasjonsmodellene er denne metodikken individbasert, og den grunnleggende forutsetning er at et individ som står overfor flere gjensidig utelukkende valgbare alternativer velger det beste. Hvert alternativ er beskrevet med en rekke kjennetegn som individet tillegger varierende vekt avhengig av sine preferanser. Som observatører er det ikke sikkert at vi kan observere alle disse kjennetegnene, og noen er heller ikke målbare. Vi må derfor nøye oss med å registrere de målbare og observerbare kjennetegnene som er tilknyttet hvert alternativ og spesielt merke oss hvilket alternativ som faktisk velges. Vi kan nå regne med at den nytten individet oppnår ved det valg som er foretatt avhenger av de kjennetegnene vi har observert, pluss noe uobservert som vi i beste fall kan betegne som en stokastisk størrelse, eller et stokastisk restledd i nytten.

En reisevaneundersøkelse er i realiteten en oversikt over de transportrelaterte valg et utvalg respondenter har foretatt i løpet av en gitt periode. Hvis vi kan finne ut hvilke alternativer hvert individ hadde tilgjengelig for hvert valg og hvilke kjennetegn som er tilknyttet disse alternativene, kan vi formulere funksjonsmessige sammenhenger mellom den nytten som hvert individ oppnår ved å velge hvert av alternativene og de tilhørende kjennetegn. Hvert kjennetegn kan tilknyttes en parameter som sier noe om hvor viktig dette spesielle kjennetegnet ser ut til å være i totalvurderingen av alternativet.

Vi har nå en situasjon hvor vi for hver respondent i reisevaneundersøkelsen kjenner alle alternativer i en gitt beslutningssituasjon, for eksempel i valget mellom ulike reisemidler på en gitt reise. Vi har formulert en funksjon for hvert alternativ som inneholder alle målbare kjennetegn knyttet til alternativet (for eksempel reisetider og reisekostnader med bil og buss). Men vi vet at vi mangler noen av forklaringsfaktorene fordi disse ikke er målbare eller ikke er observert. Den grunnleggende antakelsen nå er at hvert alternativs nyttefunksjon er tilknyttet et

stokastisk restledd som er identisk fordelt over individer og alternativer i datagrunnlaget.

Hvis vi kjenner, eller forutsetter noe om den statistiske fordelingen til restleddene vil de ukjente parametre, eller vekt faktorene knyttet til hvert kjennetegn for alle alternativer la seg estimere. I estimeringen benyttes en metode som kalles "maksimum likelihood". Hvis vi antar at restleddet er Gumbel-fordelt (Gumbel-fordelingen likner på Normalfordelingen, men er litt skjev med "hale" mot høyre), ender vi opp med den velkjente logitmodellen. Logitmodellen gir en valg-sannsynlighet for hvert alternativ som avhenger av forskjeller mellom de estimerte nyttefunksjoner for hvert alternativ.

Denne teorien kan benyttes i enhver diskret valgsituasjon hvor man har oversikt over hvilke alternativer som er tilgjengelig, hvilke kjennetegn disse er karakterisert med og data for en rekke valg som er foretatt av individer, hushold, eller andre aktører. Fordelen med denne metodikken fremfor gravitasjonsmetodikken er at man i større grad baserer seg på estimerte preferanser eller vekt faktorer knyttet til kjennetegn som er viktige når det er snakk om planlegging av transporttiltak. Metoden kan gi innblikk i hvordan ulike befolkningsgrupper vekt legger ulike standardfaktorer og hvordan de foretar sine valg på basis av dette. Et interessant resultat fra denne type modeller er at et mål på konsumentoverskudd, eller nettonytte, i en gitt valgsituasjon, følger av de forutsetninger som er lagt til grunn. I firetrinns-modeller av denne typen benyttes dette målet ofte som en egen variabel i modeller på høyere beslutningsnivå. Slik sett blir det dermed en kobling mellom modeller på de ulike beslutningsnivå, og endringer i for eksempel reisetider i transportnettverket vil dermed kunne påvirke ikke bare rutevalget og reisemiddelvalget, men også turfrekvensene gjennom logsummene fra reisemiddelvalgsmodellen som går via logsummene fra destinasjonsvalgsmodellen og helt opp til frekvensmodellen.

1 Innledning

Vi står i dag overfor store utfordringer i transportsektoren. På den ene siden står kravet om økt mobilitet og fleksibilitet i transport, både med hensyn til å knytte markeder og markedsaktører sterkere sammen, og med hensyn til enkeltindivider som også er prisgitt den transportstandard sektoren tilbyr. På den andre siden står kravet om en mer effektiv utnyttelse av samfunnets ressurser. Dette gjelder først og fremst de økonomiske ressurser, men i stadig større grad kreves det at planleggingen også tar miljømessige hensyn. I tillegg blir samferdselssektoren stadig mer komplisert, både når det gjelder antall aktører, organiseringen av disse og den transportstandard som tilbys.

Alle disse forholdene setter stadig større krav til planleggere og også til selve planleggingen. Det settes dermed også store krav til den metodikk og de verktøy som benyttes i planleggingen. I dette dokumentet skal vi fokusere på en type verktøy og metodikk det blir stadig vanligere å benytte seg av i samferdselsplanleggingen. Det dreier seg her om transportmodeller av ulike typer og detaljeringsgrad. Først kan det imidlertid være grunn til å understreke at en transportmodell pr definisjon er en forenklet utgave av den virkelighet den representerer. Man studerer bare en del av virkeligheten, den delen som er av spesiell interesse, og forsøker å danne seg et bilde av hvordan denne delen fungerer. Dette bildet forsøker man å formulere som en teori, eller mer nøyaktig gjennom konseptuelle modeller, som lar seg representere ved matematiske sammenhenger. Spørsmålet er så om disse sammenhengene lar seg tallfeste – om de er estimerbare. I tilfelle må man ha tilgang til relevante data. Det vil her være snakk om både data som beskriver virkelighetens infrastruktur og transporttilbud, data som beskriver befolkning og de aktiviteter befolkningen beskjeftiger seg med, og data som beskriver hvordan befolkningen opptrer i innenfor disse rammene av transporttilbud og aktivitetstilbud. Veien fra teori til numerisk implementert modell er med andre ord kronglete.

På den andre siden har utviklingen når det gjelder både teori og metode på dette feltet vært stor de seneste årene. Det skjer også stadig nye gjennombrudd på forskningsfronten på dette området, noe som gjør at man stadig kan utvikle mer realistiske modeller. Forbedret datahåndtering og datautstyr har gjort at denne siden ikke lenger er noen flaskehals i forhold til å formulere mer kompliserte modeller som fanger opp flere av de faktorene som kan tenkes å påvirke transportomfanget. I dag kan flaskehalsene hevdes i større grad å være et spørsmål om datakvalitet til estimering og kompetanse blant dem som etablerer og bruker modellene.

Mer realistiske og kompliserte modeller setter større krav til de data vi estimerer disse modellene på. De reisevaneundersøkelser som gjennomføres både nasjonalt, regionalt og lokalt er sjelden designet spesielt med tanke på estimering av transportmodeller. Erfaringer fra modellutvikling, både i Norge og internasjonalt, viser at vi i større grad bør være opptatt av kvaliteten på dette sentrale feltet, som

er fundamentet for enhver transportmodell. Datakvalitet kan derfor hevdes å være en av dagens flaskehalsen i utviklingen av mer realistiske transportmodeller. Større grad av realisme og kompleksitet setter også større krav til både utviklere og brukere av modellene. Modellering av transport er i dag et relativt smalt felt innenfor transportplanlegging og forskning, i hvert fall i Norge. Utfordringen ligger i å få flere høyskoler og universiteter til i større grad å trekke dette inn i undervisningen, og på et høyere nivå i studiet.

Det finnes, og kan etableres, utallige modeller som behandler etterspørsel etter persontransport og som er mer eller mindre skreddersydd til bestemte problemstillinger eller situasjoner. Vi kan for eksempel ha en spesialmodell for et bestemt fergesamband, en modell for utvikling i flytrafikken over tid, og en rekke andre modeller som vanligvis behandler et mer eller mindre veldefinert delmarked, eller etterspørsel etter reiser på et forholdsvis høyt aggregeringsnivå. I dette dokumentet skal vi imidlertid konsentrere oppmerksomheten om en spesiell modelltype som ofte benyttes i forbindelse med planlegging på et geografisk nivå, og spesielt i byområder.

Et felles kjennetegn ved slike modeller er at de har en geografisk dimensjon hvor det geografiske området som studeres vanligvis er inndelt i et stort antall delområder. Et annet kjennetegn ved disse modellene er at de behandler flere ulike reisemåter samtidig. Disse to kjennetegnene medfører at slike modeller baserer seg på en forholdsvis detaljert geografisk beskrivelse av transportsystemet i studieområdet.

Slike modeller har lenge vært benyttet som et hjelpemiddel i transportplanlegging for ulike områder. Bruk av slike modeller gjør at man kan få frem at et bestemt transporttiltak også kan påvirke andre aktører enn de som blir direkte berørt av tiltaket. Disse aktørene kan for eksempel være kollektivtraffikkselskaper og også ulike trafikantgrupper. Disse modellene kan derfor hevdes å være sektor-overgripende, noe som i de fleste sammenhenger vil være en stor styrke.

De miljøer som driver slike modeller bruker vanligvis forholdsvis store ressurser på løpende å samle inn og systematisere transportrelaterte data for modellområdet. Dette kan være data som beskriver de ulike geografiske delområdene studieområdet er inndelt i, trafikktegninger på sentrale transportårer, data for infrastruktur og rutetilbud og endringer i dette, og en lang rekke andre observasjoner og utvalgsundersøkelser som er relevante for transportplanleggingen i området. Slike data vil vanligvis være nyttige i seg selv og ikke bare i forhold til oppdatering og utvikling av modellene.

Denne type modeller kan benyttes til å få frem effekter av en lang rekke tiltak. Tiltakene kan grovt sett deles inn i tre grupper:

- Infrastruktur
- Rutetilbud
- Priser

Når det gjelder infrastruktur, kan det være snakk om nye baner eller veier, forlengelser eller andre endringer i eksisterende veier og banetraseer, innføring av kollektivfelt, annen form for prioritering av kollektivtrafikk, etablering av nye terminaler og samordnet utbygging av transportsystem og bebyggelse. Når det gjelder rutetilbud, kan man se på effekter av nye ruter, endret frekvens på

eksisterende ruter, nedlegging eller omlegging av ruter, endringer i lengden på ruter eller andre større omlegginger i rutetilbudet. Store infrastrukturtiltak kan også innebære endringer i rutetilbudet. Dette kan gi forbedringer for noen trafikantgrupper, mens andre kan komme dårligere ut.

De priser som trafikantene står overfor når det gjelder transport, bør i stor grad gjenspeile samfunnets kostnader. Transportmodellene kan brukes til å gjennomføre analyser knyttet til optimal prissetting av ulike typer transport. For kollektivtransport vil det her være aktuelt å se på takstnivå og takststruktur. Problemstillinger kan være knyttet til differensiering over tid, på retning og på reiselengde. For privatbiltransport vil det kunne dreie seg om ulike former for kjøprising, bompengeproblematikk og nivå på generelle avgifter.

Alle de tiltakene som er nevnt over vil kunne påvirke trafikantenes generaliserte kostnader for å reise. Generaliserte kostnader er den oppofrelsen, målt i tid og penger, som trafikantene "betaler" for å reise. Et bestemt samferdselstiltak innrettet på et avgrenset delområde vil kunne påvirke de generaliserte kostnader også i andre delområder. Dette vil avhenge av hvordan trafikantene reagerer på endringene i generaliserte kostnader. Dette vil igjen kunne påvirke lønnsomheten for eventuelle andre samferdselstiltak som vurderes gjennomført. Slike avhengigheter og systemeffekter vil kunne fanges opp med en transportmodell av denne type.

Når vi skal evaluere bestemte samferdselstiltak, er vi interessert i beregninger knyttet til følgende effekter:

- endringer i trafikantnytte
- endringer i trafikkinntekt
- endringer i systemkostnader
- endringer i veitrafikantenes kostnader
- miljømessige konsekvenser og trafikksikkerhet

Fordelen med å benytte transportmodeller er at man kan gjennomføre slike beregninger på en konsistent måte. De ulike aktørene i et område vil ha et felles og konsistent datagrunnlag for samferdselsplanlegging. Dette er spesielt viktig når man har å gjøre med store og kompliserte kollektivsystemer som samlet sett betjener et stort antall mulige reiserelasjoner og gir muligheter for alternative reiseruter mellom gitte områder.

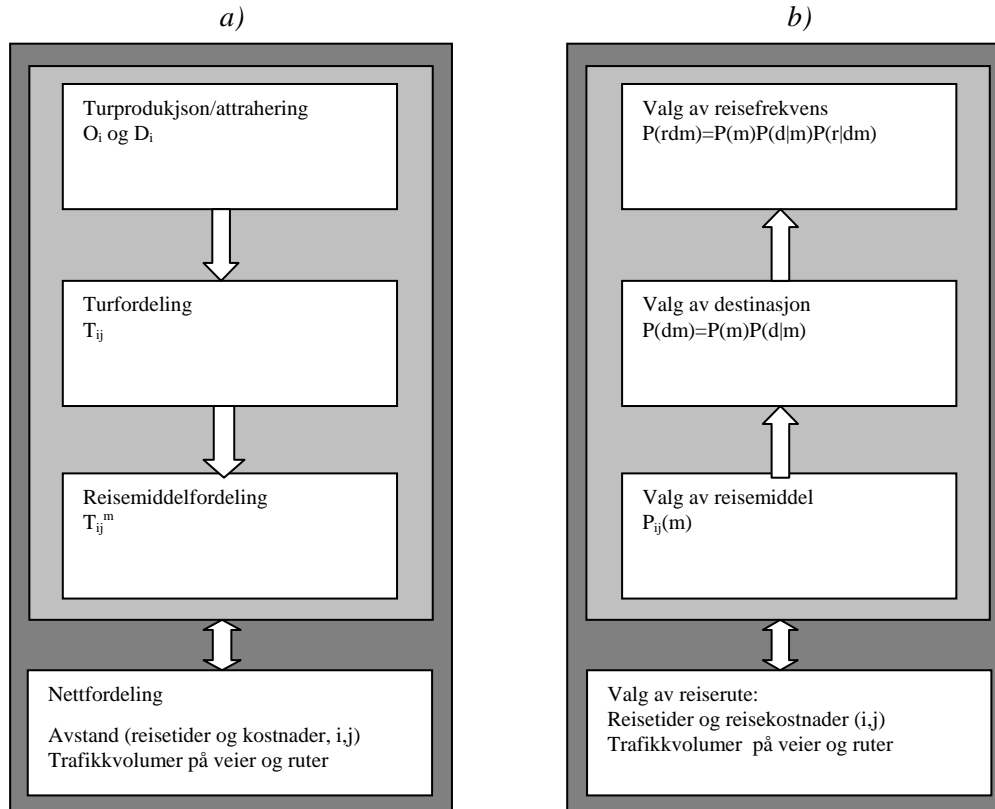
Man kan selvsagt alltid stille spørsmålstegn ved hvor "god" en transportmodell vil være i forhold til å fange opp realistiske effekter av ulike tiltak. Her er det ingen entydige svar. Ingen modell vil kunne behandle alle typer transport like godt. Siden det tross alt bare er snakk om modeller, vil man alltid kunne peke på svakheter og mangler ved slike verktøy. Det er egentlig bare gjennom systematisk bruk av modellene man finner ut av dette. Enhver modellanalyse bør derfor også inneholde en resultatevaluering hvor man også peker på forhold som kunne vært bedre ivare tatt. Ved slike evalueringer kan man fremskaffe innsikt som gjør at vi kommer videre i utvikling av bedre modeller.

På den andre siden vil det også være usikkerhet knyttet til andre sider av en tiltaksevaluering. Dette gjelder kanskje spesielt kostnadsvurderinger, men også

hvilke enhetspriser man skal bruke i evalueringen når det for eksempel gjelder ulykkeskostnader, forurensning med mer. Det er ikke sikkert at man bør stille strengere krav til de resultater man kan hente ut av en transportmodell enn det man vil gjøre til andre sentrale variable i en slik evaluering.

De vanligste modellverktøy når det gjelder transportplanlegging er en stor klasse modeller som vi kan betegne som *firetrinns-modeller*. Denne type modeller består egentlig av et antall delmodeller og kan derfor også betegnes som *modellsystemer*. Delmodellene er vanligvis programmert i et dataprogram som kjører de fleste delmodeller i en bestemt rekkefølge og etter bestemte regneprosedyrer. Betegnelsen stammer fra det forhold at modellene behandler fire typer beslutninger som ”opptrer” i forbindelse med persontransport. Tradisjonelt har disse trinnene vært behandlet sekvensielt og adskilt, og dette gjøres fortsatt i mange modeller. De fire trinnene er vist i figur 1.1. Vi ser at de tre øverste trinnene er fysisk adskilt fra det siste trinnet. De tre øverste trinnene representerer etterspørselsmodellene i et slikt modellsystem. Denne type modeller skal vi behandle i kapittel 4 i dette notatet. Det siste, eller nederste trinnet i figur 1.1 representerer transporttilbudet slik det fremstår gjennom forenklete transportnettverk med tilhørende vei- og rutevalgmodeller som det er vanlig å behandle innenfor kommersielt tilgjengelige programpakker som TRIPS, EMME/2 (EMMA) og VIPS. Denne type modeller skal vi behandle i kapittel 3 i dette notatet.

I figur 1.1 illustreres firetrinns-metodikken basert på a) tradisjonelle gravitasjonsmodeller og b) disaggregert modelleringsteknikk. Vi ser at det er en sentral forskjell mellom de to prinsipielt forskjellige typer etterspørselsmodeller. I figur 1.1.a) peker pilene mellom de tre øverste nivåene nedover. Dette innebærer en implisitt forutsetning om at beslutningen om å gjennomføre en reise gjennomføres før beslutningen tas om hvor man skal reise, og hvordan, altså med hvilket reisemiddel, og det er ingen kobling mellom disse beslutningene. I figur 1.1.b) går som vi ser pilene mellom de tre øverste nivåene oppover. Dette innebærer at man kan la beslutningene på overliggende nivåer avhenge av ”situasjonen” på de lavere nivåene. Det er altså en kobling mellom beslutningsnivåene for de disaggregerte valgmodellene, og denne koblingen fremheves ofte som en stor fordel med denne type modeller fremfor de tradisjonelle firetrinns-modellene basert på gravitasjonsmetodikken.



Figur 1.1: Firetrinns-modeller basert på a) aggregerte gravitasjonsmodeller og b) disaggregerte valgmodeller

I de aggregerte gravitasjonsmodellene (figur 4.1.a) kan fremgangsmåten oppsummeres som følger:

1. **Turgenerering.** I dette trinn bestemmes hvor mange reiser som starter og ender i hver sone i en gitt periode. Dette gjøres med spesielle modeller for generering og attrahering av turer. Sentrale forklaringsvariable i slike modeller er beskrivelser av befolkning, arbeidsplasser og andre variable som har betydning for generering og attrahering av reiser i geografiske områder.
2. **Turfordeling.** Når vi har bestemt antall reiser som starter og ender i hver sone, er neste oppgave å fordele disse på hver enkelt sonerelasjon i en turmatrise. Her benyttes selve gravitasjonsmetodikken.
3. **Reisemiddelfordeling.** Gitt at det skal foretas et bestemt antall reiser mellom to soner, så dreier reisemiddelfordelingen seg om å fordele disse turene på mulige reisemidler mellom de to sonene. Her kan man benytte en gravitasjonsmodell som beregner reisemiddelfordeling og turfordeling simultant. Det har imidlertid blitt mer og mer vanlig å benytte logitmodeller (disaggregerte valgmodeller) for å beregne reisemiddelfordelingen, også i modeller som benytter metodikken for gravitasjonsmodeller i turfordelingen.
4. **Nettfordeling.** Gitt at et antall reiser skal foretas med en gitt reisemåte mellom to soner, så dreier nettfordelingen seg om å fordele denne trafikken på de veier eller de kollektive ruter som det vil være naturlig å benytte mellom de to soner. Her benyttes nettverksmodeller av den type som er omtalt i kapittel 3.

Trinnene 1-3 benyttes altså til å generere turmatriser for mulige reisemåter, og disse fordeles på det kodete vei- og kollektivnettet i trinn 4. De tradisjonelle firetrinns-modellene har imidlertid ofte vært kritisert fordi disse fire trinnene ikke samsvarer spesielt godt med hvordan folk i virkeligheten foretar reisebeslutninger. Bare unntaksvis vil man ha beslutninger som foretas uavhengig av hverandre i rekkefølgen 1-4. Vi kan imidlertid ofte få brukbare modeller ved å late som om beslutninger tas på en bestemt måte, selv om det ikke er slik i virkeligheten.

Her representerer de disaggregerte valgmodellene et stort fremskritt. I disse modellene er det mer eller mindre sterke koblinger mellom de ulike trinnene. Rekkefølgen for reisebeslutningene spiller derfor en mindre rolle. I disse modellene starter man imidlertid som nevnt på det nederste trinnet (jfr pilene i figur 1.1).

1. Gjennom modellene **for vei- og rutevalg** på det nederste trinnet får man bestemt sannsynlige reisetider og reisekostnader for privat og kollektivtransport (og eventuelt også for ulike kollektive transportmidler).
2. **Modeller for valg av reisemiddel** tilordner en valgsannsynlighet til hvert reisemiddel basert på forskjeller mellom reisemidlene når det gjelder reisetider, kostnader og komfort.
3. **Modeller for valg av destinasjon** tilordner en valgsannsynlighet for hver mulig destinasjon basert på forskjeller i attraktivitet og forskjeller i tilgjengelighet til hver destinasjon med mulige reisemidler.
4. **Modeller for reisefrekvens** tilordner en sannsynlighet for å foreta en (eller flere) reiser basert på forskjeller i kjennetegn mellom befolkningssegmenter og tilgjengelighet til mulige destinasjoner med mulige reisemåter.

I de fire trinnene som er illustrert i figur 1.1 savner vi beslutningen om når en reise skal foretas. En mer langsiktig beslutning som er viktig for reiseaktiviteten, nemlig bilholdet, trekkes heller ikke direkte inn. I mange modeller kommer bilholdet inn ved at man segmenterer befolkningen eller husstandene etter bilhold. I andre modellsystemer er bilholdet, som i stor grad er en husholdsbeslutning, med som et eget nivå i beslutningsstrukturen.

I figur 1.1 er koblingen mellom nettverksmodellene på det nederste trinnet og etterspørselsmodellene på de tre øverste trinnene illustrert med piler i begge retninger. Dette skyldes at nettverksmodellene blir benyttet både i forkant og i etterkant av etterspørselsberegningene. I forkant beregnes det reisetider og kostnader knyttet til de ulike reisemåtene man har kodet inn i nettverkene. Disse går som input i etterspørselsmodellene. Resultatet fra etterspørselsmodellene, i form av turmatriser, blir siden benyttet til å beregne lenke- og rutevolumer i transportnettet.

2 Turmatriser

Før vi gir oss i kast med de ulike typer transportmodeller som er i fokus i dette notatet, kan det være hensiktsmessig å først knytte noen kommentarer til hva vi skal mene med begrepet turmatriser. De transportmodellene som vi skal behandle har alle minst én ting til felles, og det er en geografisk dimensjon. Dette innebærer at studieområdet er inndelt i geografiske soner eller områder hvor trafikken starter og ender. Soneinndelingen er, som vi skal komme tilbake til ved flere anledninger, et svært viktig aspekt ved enhver transportmodell av denne type.

Turmatrisen(e) er hovedresultatet fra en sonebasert modell for etterspørsel etter transport og danner sentrale input til modeller for vei- og rutevalg. En turmatrise er strengt tatt bare en tabell som viser antall turer i den perioden som studeres mellom alle par av soner som er definert for studieområdet. Hvis det er "n" definerte soner, vil det være (n x n) sonepar i matrisen. Tabell 2.1 viser organiseringen av en generell turmatrise. I tabellen er "T₁₂" totalt antall turer i den perioden som studeres som starter i sone 1 og ender i sone 2 i det definerte studieområdet. Det totale antallet turer fra sone 2 til sone 1 er "T₂₁". Mellom sone 1 og 2 går det altså (T₁₂ + T₂₁) turer i perioden. Tallene langs diagonalen i tabellen (T₁₁, T₂₂, ..., T_{nn}) er korte turer som starter og ender i samme sone. Totalt antall turer som starter i en sone, for eksempel sone "2", kan finnes ved å summere linje nr 2 i tabellen (O₂ = Σ_j T_{2j}). Totalt antall turer som ender i sone 2 finnes ved å ta kolonnesummen (D₂ = Σ_i T_{i2}). Totalt antall turer i studieområdet kan finnes ved å summere alle elementene (i = j = 1, 2, ..., n) i tabellen eller ved å summere kolonnesummene (T = Σ_i O_i = Σ_j D_j = Σ_{ij} T_{ij}).

Tabell 2.1: Den generelle turmatrisen

Sone	1	2	.	.	.	n	Σ (fra)
1	T ₁₁	T ₁₂	.	.	.	T _{1n}	O ₁ =Σ _j T _{1j}
2	T ₂₁	T ₂₂	.	.	.	T _{2n}	O ₂ =Σ _j T _{2j}
.
.
.
n	T _{n1}	T _{n2}	.	.	.	T _{nn}	O _n =Σ _j T _{nj}
Σ (til)	D ₁ =Σ _i T _{i1}	D ₂ =Σ _i T _{i2}	.	.	.	D _n =Σ _i T _{in}	T=Σ _{ij} T _{ij}

2.1 Reisemåter og reisemidler

For analyseformål vil en oversikt over totaltrafikken mellom sonene i perioden sjelden være tilstrekkelig. Som oftest er vi minst avhengig av tall fordelt på

reisemåter. Antallet matriser vil da avhenge av hvor mange *alternative* reisemåter, eller kombinasjoner av reisemidler, som er tilgjengelig i studieområdet. En liste over mulige reisemidler i et område kan være relativt begrenset.¹ En fullstendig liste over antall mulige reisemåter kan derimot bli svært lang i enkelte områder. Hvis det for eksempel er fem mulige reisemidler i et område, kan det i prinsippet være mulig å kombinere disse reisemidlene på 120 alternative måter. Et så stort antall alternativer vil imidlertid sjelden være tilgjengelig på én og samme sone-relasjon. Mange av alternativene vil det heller ikke være spesielt interessant å skille mellom.

I praksis er det vanlig å aggregere reisemåtene opp til et mer håndterlig antall, hvor man tar hensyn til hvilke kombinasjoner man hyppigst kan observere i studieområdet. I byområder slår man ofte sammen alle kollektive reisemidler i kombinasjon med gange og sykkel som tilbringer, til samlebetegnelsen "kollektivtransport". Privatbil, som fører og passasjer, og drosje aggregeres ofte til samlebetegnelsen "biltransport". Da kan man for eksempel sitte igjen med reisemåtene kollektivtransport, biltransport, gange hele veien, sykkel hele veien og bil i kombinasjon med kollektivtransport (Park & Ride), som fem alternative reisemåter.

Tabell 2.2 viser at en oppdeling av turmatrisen på et antall reisemåter "m", ikke bringer inn noe prinsipielt nytt i forhold til den generelle turmatrisen i tabell 2.1. Oppdelingen av totalmatrisen på reisemåter bør imidlertid være slik at hvis vi for eksempel summerer antall turer fra sone 1 til sone 2 over antall reisemåter, får vi det samme tallet som står i tabell 2.1 ($T_{12} = \sum_m T_{12}^m$, $\mathbf{T} = \sum_m \mathbf{T}^m$). Dette innebærer at en kombinert reise som ikke er spesifisert som en egen transportmåte, for eksempel Park & Ride, ikke bør være representert både i matrisen for biltransport og i matrisen for kollektivtransport.

Tabell 2.2: Turmatrise, for reisemåte "m".

sone	1	2	.	.	.	n	Σ (fra)
1	T_{11}^m	T_{12}^m	.	.	.	T_{1n}^m	$O_1^m = \sum_j T_{1j}^m$
2	T_{21}^m	T_{22}^m	.	.	.	T_{2n}^m	$O_2^m = \sum_j T_{2j}^m$
.
.
.
n	T_{n1}^m	T_{n2}^m	.	.	.	T_{nn}^m	$O_n^m = \sum_j T_{nj}^m$
Σ (til)	$D_1^m = \sum_i T_{i1}^m$	$D_2^m = \sum_i T_{i2}^m$.	.	.	$D_n = \sum_i T_{in}^m$	$\mathbf{T}^m = \sum_{ij} T_{ij}^m$

2.2 Periodisering

I områder hvor transporttilbudet, etterspørselen og etterspørselens sammensetning varierer over dagen, vil man som oftest ha behov for periodiserte matriser som gjenspeiler trafikksituasjonen for typiske trafikkperioder som er finere inndelt enn

¹ for eksempel gange, sykkel, privatbil fører, privatbil passasjer, drosje, buss, båt, T-bane, trikk og tog.

ÅDT eller VDT. Det er vanlig at trafikken i disse matrisene spenner over et timesintervall og at man har matriser for 4-10 typiske tidsperioder. Periodiserte matriser er nærmest et krav hvis:

- det er rushperioder med betydelig kø på veinettet,
- kollektivtilbudet varierer mellom driftsperioder, og/eller
- det er trafikkregulerende avgifter i perioder av døgnet.

Kø på veinettet medfører eksterne effekter fra bilkjøring. De eksterne effektene er kostnader som bilistene påfører samfunnet og som de ikke betaler for. I rush-situasjoner vil disse kostnadene bestå av miljø- og køkostnader. Hvis man opererer med ÅDT- eller VDT-matriser, vil slike kostnader være umulige å anslå på en tilfredsstillende måte.

Hvis kollektivtilbudet varierer over døgnet mellom ulike driftsperioder, vil kostnadene knyttet til de ulike driftsperiodene også variere. Dette betyr at det også vil være ulike kostnader knyttet til det å forbedre tilbudet i de ulike driftsperiodene. En ekstra avgang i rushperiodene hvor det i utgangspunktet er mange avganger fra før, vil vanligvis koste mer enn en ekstra avgang i lavtrafikkperioder, når en del av det materiellet som benyttes i rushperiodene står parkert. Dette betyr at enhetskostnadene knyttet til å frakte en ekstra passasjerer også varierer mellom driftsperiodene, noe man strengt tatt bør ta hensyn til i en analyse. Slik sett vil man også ha behov for periodiserte turmatriser.

Hvis det er trafikkregulerende avgifter i rushperiodene i det området man studerer, vil trafikantene stå overfor ulike kostnader ved ulike reisetidspunkt. Dette vil i seg selv medføre et behov for periodiserte turmatriser. Disse avgiftene vil også kunne medføre at trafikantene faktisk betaler for de ekstra kostnadene som påløper i rushsituasjoner som er omtalt over. De eksterne kostnadene som er omtalt over kan da være internalisert.

Periodiserte turmatriser vil gi en ekstra toppskrift i matrisen i tabell 2.2 (for eksempel "p"). Vi må fortsatt kreve at antall turer summert over reisemåter og perioder gir totalt antall turer i tabell 2.1 ($T_{12} = \sum_{mp} T_{12}^{mp}$, $\mathbf{T} = \sum_{mp} \mathbf{T}^{mp}$).

2.3 Reiseformål

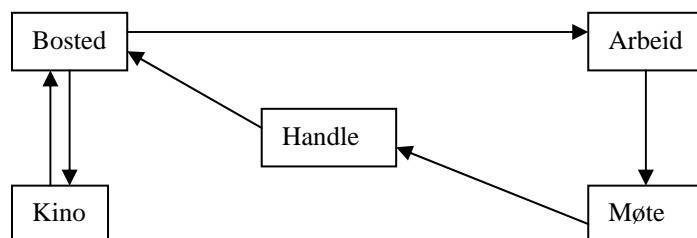
I enkelte analyser kan også reiseformålsfordelingen være av spesiell interesse. Det kan for eksempel være slik at reiseformålsfordelingen varierer sterkt mellom reisemåtene, samtidig som at det er store forskjeller mellom reiseformålene når det gjelder verdsetting av forbedringer av tilbudet. Det kan samtidig være slik at reiseformålsfordelingen varierer over døgnet, og at man derfor kommer et stykke på vei med periodiserte matriser. I enkelte situasjoner vil derfor en periodisering av matrisene være tilstrekkelig.

Hvis man for eksempel opererer med fire reisemåter og fire trafikkperioder, vil antall turmatriser være 16 til sammen. I analyser hvor man i tillegg kan ha et stort antall alternative transportløsninger med tilhørende turmatriser, begynner totaltallet å nærme seg grensen for det håndterbare. Mye taler derfor for at man enten må operere med periodiserte matriser eller matriser for et antall viktige reiseformål. Ofte vil man være interessert i forbedringer knyttet til et spesielt

reisemiddel, og situasjonen kan være slik at andre reisemidler kan behandles mer kursorisk. Dette vil imidlertid avhenge av problemstillingen og situasjonen i det området som studeres.

2.4 Behandling av turkjeder

I virkeligheten gjennomføres reiser vanligvis som turkjeder, for eksempel med startpunkt om morgenen hjemme, til arbeidsplass via andre destinasjoner og med retur til bosted på ettermiddagen og kanskje en fritidsreise om kvelden. Et eksempel på en slik sekvens med reiser er vist i figur 2.1. Denne reisesekvensen kan kanskje hevdes å være typisk for en sysselsatt person uten småbarn. I figuren er det, som vi ser, seks delreiser. Disse seks delreisene har ulike formål, eller reisehensikter.



Figur 2.1: Eksempel på turkjede

Den første reisen, arbeidsreisen, starter hjemme. Man kunne imidlertid godt tenke seg at den første reisen kunne gått direkte til et møte i stedet for til arbeid. Da hadde vi fått en reise i arbeid, eller tjenestereise, som den første reisen. Man kan også tenke seg andre reiseformål som starter hjemme tidlig om morgenen, for eksempel bringe barn til skole eller barnehage. I begge disse tilfellene ville arbeidsreisen startet et annet sted enn hjemme. Den andre delreisen må karakteriseres som en tjenestereise. I dette tilfellet starter tjenestereisen på arbeidsstedet, men den kunne altså like godt ha startet hjemme, og kanskje også et annet sted (for eksempel hos en kunde). Det samme gjelder for delreisen med innkjøp som formål, og også for returreisen til bosted. Den type reiser to siste delreisene representerer, fra bosted til fritidsaktivitet og returen til bosted, vil være vesentlig lettere å håndtere i en modell enn turkjeden (bosted→arbeid→møte→handle→bosted).

I modellsammenheng har det tradisjonelt vært vanlig å betrakte retur-reisen som et speilbilde av utreisen. Dette vil gi turmatriser som er symmetriske om diagonalen. I mange sammenhenger, som i eksempelet over, er dette imidlertid helt urealistisk. En slik kjede vil typisk være sekvensielt bundet over tid, og den vil derfor vanligvis foregå under til dels vidt forskjellige omstendigheter. Den første reisen, i dette tilfellet arbeidsreisen, vil vanligvis foregå i morgenrushperioder, hvor fremkommeligheten på veiene kan være lavere enn for eksempel midt på dagen, hvor tjenestereisen kan tenkes å bli gjennomført. Motsatt vil ofte kollektivtilbudet være best i rushperioden om morgenen og kanskje dårligere noen timer midt på dagen. Det vil også være en sammenheng mellom valget av reisemiddel på den første reisen og for de påfølgende reiser i en slik

turkjede. Det er ikke nødvendigvis slik at det er transportkvaliteten for den første reisen som er avgjørende for valg av transportmiddel. Ofte vil dette valget kunne avhenge av en totalvurdering for hele turkjeden.

Turkjeder er svært vanskelige å behandle på en realistisk måte i modellene. I de tradisjonelle gravitasjonsmodellene skiller det ofte mellom turer som starter eller ender hjemme (bostedsbaserte) og turer som verken starter eller ender hjemme. Returen behandles vanligvis som et speilbilde av utreisen. Ved en slik tilnærming kan man for eksempel ende opp med et firedelt turbegrep med separate modeller for turgenerering og attrahering for:

- bosted – arbeid tur/retur (arbeidsreiser)
- bosted – annet tur/retur (innkjøpsreiser, fritidsreiser, tjenestereiser, besøksreiser med mer)
- arbeid – annet tur/retur (tjenestereiser, innkjøpsreiser med mer)
- annet – annet tur/retur

I de disaggregerte valgmodellene har man vanligvis litt større fleksibilitet i behandlingen av turkjeder. I disse modellene er begrepet "rundtur" sentralt. En rundtur er en turkjede som gjennomføres med ett og samme hovedreisemiddel. Når en rundtur inneholder mer enn én destinasjon, må det gjøres noen betraktninger knyttet til hva som er hovedformål med reisen. Det er vanlig å bestemme hovedformål og sekundære formål ut i fra følgende klassifisering:

1. Arbeid/skole
2. Tjenestereise
3. Øvrige ærend (etter hvor lang tid gjøremålet tar)
4. Hente/levere andre

Hovedformålet med den lange rundturen i figur 2.1 kan slik sett hevdes å være å komme på arbeid. Det sekundære formålet er kanskje forretningsmøtet, altså tjenestereisen. I praksis klarer man sjelden å behandle mer enn ett sekundært gjøremål i en turkjede. Man kan imidlertid komme et stykke på vei med bare ett alternativt gjøremål. Dette avhenger imidlertid av hvor hyppig slike omfattende turkjeder forekommer i de data som er innhentet i reisevaneundersøkelsen.

I de modellsystemer hvor man har forsøkt seg på å modellere sekundære destinasjoner eller gjøremål, er reisene inndelt etter hovedformål med en rangering tilsvarende den som er vist over. Det vil dermed være egne modeller for et antall hovedformål, la oss for eksempel si arbeidsreiser, tjenestereiser, innkjøpsreiser, besøksreiser og fritidsreiser. Hvis man følger en slik rangering, vil en arbeidsreise kunne ha en tjenestereise som sekundært formål, men ikke omvendt. En tjenestereise vil tilsvarende kunne ha en innkjøpsreise som sekundært formål, men ikke omvendt. Dette innebærer at modellene for arbeidsreiser vil være mest omfattende og bygge på resultater fra de øvrige modellene.

Slik sett vil en arbeidsreise kunne gjennomføres enten direkte til/fra jobb eller via et sekundært gjøremål. Det sekundære reisemålet vil eventuelt kunne være en

tjenestereise, en innkjøpsreise, besøksreise eller en fritidsreise. I hver av de fire lavere rangerte modellene må det dermed være et nivå som angir sannsynligheten for å foreta følgende typer reiser:

1. En ren (tjeneste-, innkjøps-, besøks-, eller fritids-) reise uten et sekundært gjøremål
2. En (tjeneste-, innkjøps-, besøks-, eller fritids-) reise med et sekundært gjøremål
 - i. en (tjeneste-, innkjøps-, besøks-, eller fritids-) reise i forbindelse med arbeidsreisen
 - ii. en (innkjøps-, besøks-, eller fritids-) reise i forbindelse med tjenestereisen
 - iii. en (besøks-, eller fritids-) reise i forbindelse med et høyere rangert reiseformål

Av denne listen fremgår det at det blir flere alternative reisetypene jo lavere rangert reiseformålet er.² Strukturen i et slikt omfattende modellsystem blir fort uoversiktlig, spesielt når man tar i betraktning at man også skal ta hensyn til hvor de ulike reisene starter (bostedsbasert eller arbeidsplassbasert) og i tillegg skal modellere destinasjonsvalget for de sekundære formålene. Med en slik angrepsmåte beveger vi oss også et stykke bort fra den tradisjonelle firetrinnsmetodikken. Fordelen med denne type modeller er imidlertid at man i sterkere grad får ivaretatt avhengigheten i reisemiddelvalget for delreiser i rundturer. Bruk av rundturbegrepet med eller uten et sekundært gjøremål innebærer uansett en forenkling av virkeligheten som innebærer at visse reiser forsvinner. Hvis man modellerer delreiser og betrakter returen som et speilbilde av utreisen, vil man imidlertid kunne risikere å overestimere trafikkvolumene. Det er med andre ord ingen fasitsvar på hvordan dette problemet bør angripes. Dette er en av årsakene til at modellsystemer vanligvis må korrigeres noe for å stemme bedre overens med observasjoner (for eksempel trafikktegninger) enn det de vil gjøre i utgangspunktet.

² I modellen for tjenestereiser vil det bare være 2 alternative typer reiser, mens for eksempel modellen for besøksreiser kan ha 4. Datamaterialet vil imidlertid avgjøre hvilke alternativer det er hensiktsmessig å ta med. Besøks- og fritidsreiser gjennomføres for eksempel sjelden i forbindelse med en tjenestereise.

3 Transportnettverk, vei- og rutevalg

Modeller for trafikantenes atferd, dvs vei- og rutevalg i de ulike transportnettene, er svært sentrale i ethvert transportmodellsystem. Hvis disse modellene ikke gir realistiske resultater, kan man komme skjevt ut i evalueringen av ulike samferdselstiltak. Denne type modeller er blant annet implementert i de kommersielt tilgjengelige programpakkene, TRIPS, EMME/2 og VIPS, som er de mest brukte programpakker av denne typen i Norden. Disse programpakkene er utviklet spesielt med tanke på å behandle transportnettverk og transporttilbud med en geografisk dimensjon, og de spiller egentlig flere roller i en tradisjonell transportmodell.

For det første har disse programmene databasefunksjoner som muliggjør en oversiktlig og relativt detaljert koding av faktiske transportnettverk i det området som studeres. Koding, vedlikehold og oppdatering av transportnettene er en relativt ressurskrevende oppgave. Et slikt løpende arbeid setter også krav til håndtering og registrering av data. De siste årene har man i noen modellmiljøer begynt å utforske muligheter knyttet til en større grad av automatisering av dette arbeidet. Mange av de data man trenger til etablering av transportnettene finnes i ulike dataformater i forskjellige registre og databanker som samferdselsetatene løpende oppdaterer og vedlikeholder. Det er derfor først og fremst et spørsmål om å koble disse registrene og databankene sammen og hente ut de nødvendige data i et riktig format. Man rapporterer om varierende suksess med dette arbeidet, og det er fremdeles et stykke igjen før de mest hensiktsmessige og ressursbesparende rutiner er etablert. Foreløpig er vi derfor i stor grad avhengig av manuelt arbeid på dette området. Dette er tema for avsnitt 3.1 i dette kapitlet.

Den andre rollen disse programpakkene spiller, er knyttet til trafikantenes vei- og rutevalg i transportnettene. Det er her snakk om ferdig utviklede algoritmer eller regneprosedyrer som setter brukeren i stand til å etablere forskjellige modeller for trafikantenes vei- og rutevalg. Det finnes flere ulike algoritmer for dette formål. Rutevalget for bilister behandles vesentlig forskjellig fra rutevalget for kollektivtrafikanter. Innenfor hvert av disse feltene er det flere prinsipielt forskjellige algoritmer i bruk. Noen er ganske like og skilles bare av små nyanseforskjeller, mens andre har prinsipielt forskjellig oppbygning og kan derfor også gi svært forskjellige resultater. I tillegg står brukeren fritt til å legge inn og teste ut et nærmest ubegrenset antall modeller innenfor hver algoritme. Vi kan legge merke til at vi her skiller mellom en modell og en algoritme. En algoritme er bare et programskall som består av matematiske sammenhenger. En modell får vi først når vi har gitt algoritmen innhold, i denne sammenheng i form av vei og kollektivnett, turmatriser og nødvendige atferdsmessige forutsetninger.

Ofte kan man komme langt i prosjektevalueringer ved bruk av faste turmatriser og denne type modeller alene. Endringer i rutevalget vil ofte være den største etterspørseffekten av et samferdselsprosjekt. Både EMME/2, TRIPS og VIPS har i tillegg et stort antall "tilleggsfunksjoner" som gjør at man kan gjennomføre

transportanalyser, etablere etterspørselsmodeller med mer, i sin helhet innenfor programpakken. I kapittel 5 skal vi gi et par eksempler på hvordan dette kan gjøres. I dette kapitlet skal vi imidlertid fokusere på etableringen av transportnettene, og algoritmene for vei- og rutevalg i disse. Vi skal videre først og fremst fokusere på de prinsippene som benyttes, som i og for seg er ganske lik disse programpakke imellom og vil derfor i liten grad gå inn på hver enkelt programpakke. Den største forskjellen mellom disse programpakke er nok brukergrensesnittet.

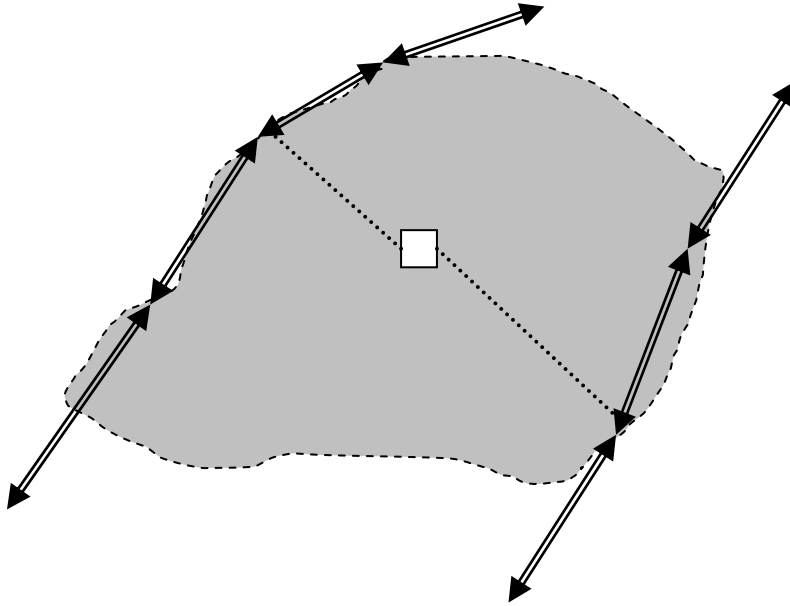
3.1 Transportnettverk

Den geografiske inndelingen av studieområdet i soner er en svært viktig premiss i enhver transportmodell av denne typen. I realiteten representerer sonene en aggregering av "aktiviteter" som har betydning for transport mellom dem. I praksis kan man tenke seg hele studieområdet som et todimensjonalt koordinatsystem med x- og y-koordinater. Sonene vil da være representert som punkter i dette koordinatsystemet med tilhørende koordinater. Disse punktene definerer antall mulige start- og målpunkter for turene i turmatrisene. Mens trafikken i virkeligheten starter og ender i et nærmest uendelig antall punkter i geografien, må disse punktene slås sammen til et modelleringsmessig mer håndterbart antall start- og målpunkter. Det vil her alltid være en motsetning mellom kravet til detaljering på den ene siden og hensynet til hva som er praktisk håndterbart på den andre.

Når man skal ta stilling til hvilke soner det er hensiktsmessig å etablere, bør man derfor ha en oversikt over bosettingsstruktur, lokaliseringen av arealer for ulike aktiviteter (arbeidsplasser, skoler, hoteller, idrettsanlegg, kino, utesteder med mer) og transporttilbudet (infrastruktur og kollektivruter) i det aktuelle området. Det er også et spørsmål om på hvilket nivå man har tilgang til aktuelle geografiske data som skal benyttes til å beskrive sonene.

Det vil alltid være et spørsmål om hvor detaljert inndelt studieområdet må være. Her er det ikke noe fasitsvar, og det blir ofte en avveining mellom hensynet til problemstillingen som skal studeres og de ressurser man har til rådighet. I Oslo-området er det om lag 1 million bosatte og rundt 600 000 arbeidsplasser. Her opereres det med en vanlig inndeling i ca 450 soner. Det kan hevdes at dette tallet er for lavt selv for de mest overordnede praktiske analyser og at denne inndelingen bare er brukbar for teoretiske formål. Dette har man også tatt hensyn til i dette området, og de fleste praktiske analyser gjennomføres nå med en finere soneinndeling, spesielt i de områder som er lokalisert i analysens kjerneområde.

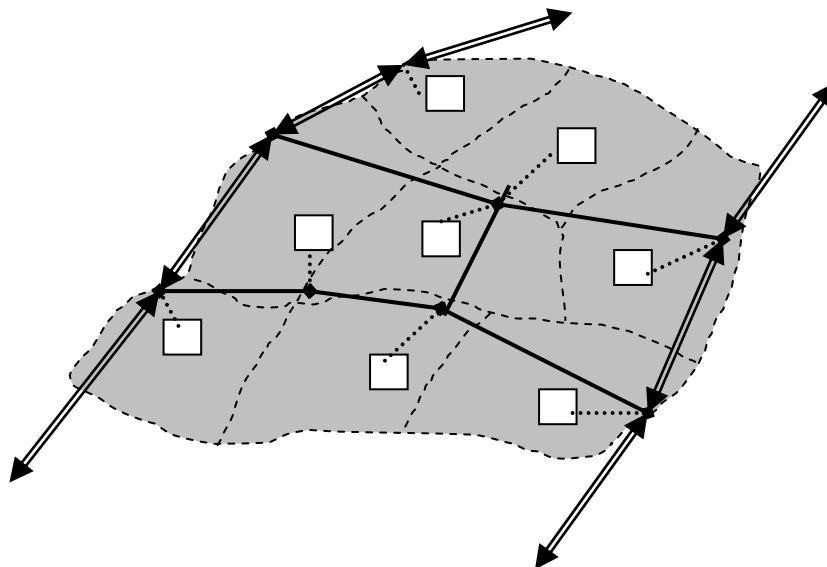
Figur 3.1: Illustrasjon av et område representert som en sone i et transportnettverk.



Figur 3.1 gir et eksempel på hvordan en sone kan representeres i et transportnett. Det geografiske området er markert med grå skravur og er avgrenset av den stiplede linjen som omslutter området. Sonen som representerer det geografiske området er markert med den lille hvite firkanten i figuren. Dette punktet kalles for sonens *centroide*, og all trafikk til og fra det geografiske området starter og ender her. Pilene i figuren representerer hovedveiene i området, og de prikkete linjene knytter sonencentroiden til veinettet. Disse linjene representerer lokalveinettet og gangmulighetene innenfor sonen.

For å illustrere viktigheten av en hensiktsmessig soneinndeling, kan vi nå tenke oss at det går bussruter til og fra sentrum langs de to hovedveiene i figur 3.1. I punktene der pilene ender tenker vi oss at det er bussholdeplasser. Vi lar sonen representere et boligområde med 500 bosatte fordelt på blokkbebyggelse i vest og eneboliger i øst. La oss videre forutsette at de to bussrutene har et likeverdig tilbud til og fra sentrum (mot sør i figuren). Spørsmålet er nå hvilken av de to bussrutene kollektivtrafikantene vil velge. Svaret vil avhenge av gangavstanden fra sonencentroiden til holdeplassene. Et rutevalg vil dermed være svært følsomt for hvilke avstander som er lagt inn på tilknytningslenkene.³

³ I noen algoritmer vil alle kollektivtrafikantene som skal reise på en bestemt sonerelasjon bare velge én holdeplass som første påstigningssted. Andre algoritmer fordeler trafikken på flere holdeplasser dersom det finnes alternativer.



Figur 3.2: Illustrasjon av en mer detaljert soneinndeling

Figur 3.2 viser en mer detaljert representasjon av det området som i figur 3.1 er representert med bare én sone. Vi ser at lokalveinettet er kodet inn, og at vi i stedet for den ene sonen nå har 8 soner som representerer delområder i det aktuelle området. Vi kan tenke oss at de tre sonene langs den vestlige busstraséen representerer boligblokker mens de resterende fem sonene representerer mer spredtbygd villaområde. Denne kodingen vil gi en vesentlig bedre beskrivelse av virkeligheten enn kodingen i figur 3.1. Det er imidlertid ikke sikkert at denne detaljerte kodingen lar seg gjennomføre innenfor en rimelig ressursinnsats. Dette vil avhenge av hvilke data man har tilgjengelig og på hvilket nivå. Vi skal senere gi et eksempel som illustrerer viktigheten av en mer detaljert soneinndeling.

3.1.1 Veinett

Alle punkter langs veinettet som er av spesiell interesse, slik som veikryss, holdeplasser, og punkter hvor veien endrer karakter, kan representeres som spesielle punkter med tilhørende koordinater. Disse punktene kalles vanligvis noder. Veiene kan da representeres som retningsbestemte vektorer i planet mellom disse nodene. Vektorene representerer de faktiske kjøremuligheter i studieområdet, og et helt veinett består altså av et stort antall slike vektorer eller veilenker mellom de koordinatfestede nodene. Veinettet knyttes til sonene ved hjelp av spesielle tilknytningslenker slik at det i praksis blir mulig å bevege seg mellom alle soner via sonetilknytningene og langs opptil flere mulige veivalg i veinettet.

Hver enkelt veilenke kan tilordnes en rekke data som dels kan være til hjelp i oppdatering og vedlikehold av nettverket, og dels har betydning for veivalget mellom sonene og dermed også for kjøretider og kostnader for reiser mellom disse. Som eksempel på de mest vanlige lenkedata kan vi nevne:

- Avstand mellom den noden hvor lenken starter og den noden hvor den ender
- Antall kjørefelt
- Kjørehastighet (gjennomsnittlig, skiltet)
- Kapasitet
- Eventuelle bompenger
- Koder for lenketype, klassifisering av lenken
- Hvilke kjøretøyer som er tillatt, eventuelt forbudt (gang- og sykkeltrafikk, tungtrafikk, busstrafikk, med mer)

I byområder, hvor kjøretidene kan variere ganske sterkt over døgnet, søker man å ta hensyn til dette i kodingen av veinettet ved å tilordne hver enkelt veilenke en funksjon som gir lengre kjøretid på lenken når trafikken øker. Disse funksjonene kalles gjerne for *volume-delay-funksjoner* (*vd-funksjoner*). Man tenker seg at veilenken har en maksimal kapasitet i den perioden som studeres, vanligvis en time, og en maksimal hastighet ved fri trafikkflyt. Formålet med disse funksjonene er å oppnå tilnærmet riktige kjøretider fra sone til sone når bilmatrisene legges ut på det kodede veinettet og samtidig få en rimelig realistisk fordeling av trafikken på de enkelte veilenker. Problemet med denne type funksjoner er at årsakene til den forsinkelsen som oppstår når det er trengsel sjelden er knyttet til selve veilenken, men som oftest er relatert til hva som skjer i det krysset (eventuelt det punktet hvor veien endrer karakter) lenken ender i (vedlegg 1 gir en mer grundig diskusjon av problemer knyttet til vd-funksjoner).

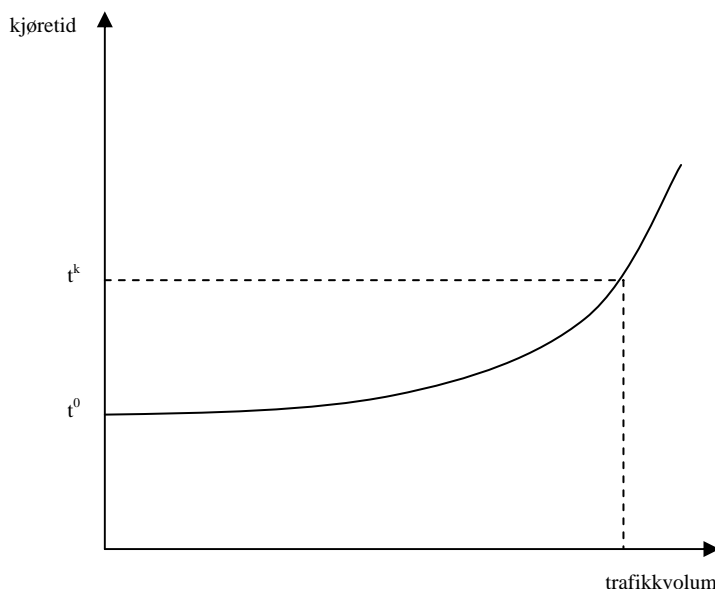
Figur 3.3 viser en typisk vd-funksjon av denne type. Reisetidene ved fri flyt vil ha sitt minimum definert ved skiltet hastighet og lenkelengden. Det er imidlertid bare på et fåtall veier i et byområde man klarer å holde fartsgrensen. Av typiske forhold som bidrar til reduserte gjennomsnittlige hastigheter i forhold til den skilte hastighet kan nevnes:

- horisontal og vertikal veigeometri
- ukodede veikryss på lenken (avhengig av veinettets detaljeringsgrad)
- fotgjengeroverganger
- parkeringsplasser langs veien
- feltbredde og antall kjørefelt
- lyskryss, vikeplikt

Slike forhold må tas i betraktning når man fastsetter t^0 for en slik funksjon. Ulike veiklasser kan etableres med bakgrunn i disse forholdene slik at man kan fastsette t^0 for et sett med funksjoner.

I denne sammenheng er det vanlig å definere veiens kapasitet i det punkt hvor reisetiden er doblet i forhold til situasjonen ved fri flyt. Dette er derfor ingen kapasitetsgrense i absolutt forstand, men snarere en konvensjon som til en viss grad gjør det mulig å benytte seg av hastighetsmålinger til å bestemme funksjonsformen frem til dette punkt. Det ligger i denne definisjonen at man må tillate trafikkvolumer på veglenkene som overskrider kapasitetsgrensen. Når trafikkvolumene øker ytterligere, vil man imidlertid nærme seg utrygg grunn.

Utenfor denne kapasitetsgrensen vil man i praksis kunne observere at trafikkvolumene pr tidsenhet begynner å avta. Dette fenomenet kan ikke gjenskapes med denne type modeller. Funksjonene bør altså være bratte utenfor kapasitetsgrensen, men de kan heller ikke være så bratte ved store trafikkvolumer at man får numeriske problemer med konvergens i veivalgsberegningene. Det kan derfor godt være at man i modellen ender opp med en biltetthet på en lenke som i praksis ikke er mulig.

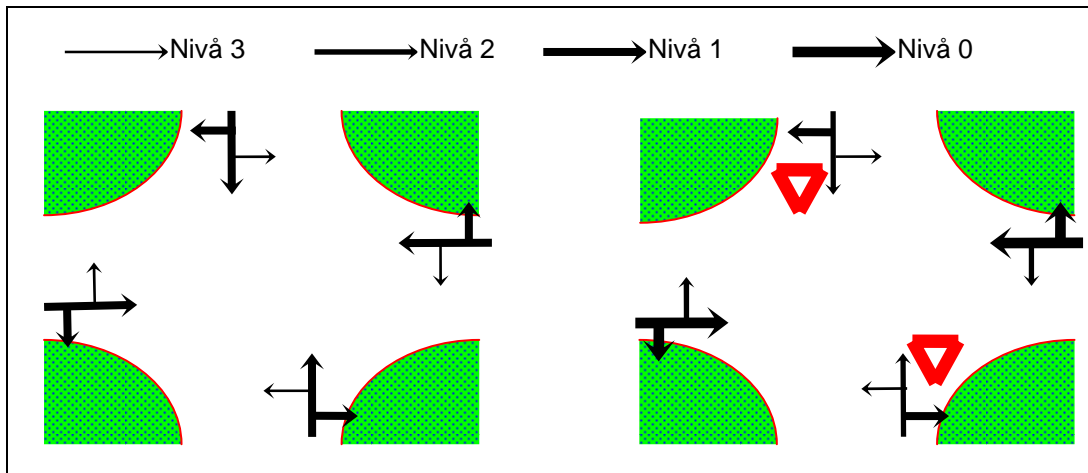


Figur 3.3: Typisk vd-funksjon i nettverksmodeller.

Kapasiteten på lenken, " x^k " i figur 3.3, må som nevnt i stor grad relateres til kapasiteten i det påfølgende veikryss eller eventuelt der lenken endrer karakter (færre kjørefelt, lavere skiltet hastighet med mer). I vanlige veikryss vil denne avhenge av kryssende og motgående trafikk. De veivalgsalgoritmer som finnes i dagens programpakker kan imidlertid ikke håndtere forsinkelser som avhenger av trafikkvolum på andre lenker. Man kan eventuelt knytte vd-funksjoner til svingebevegelser i veikryss, mens siden disse heller ikke kan avhenge av trafikkvolumene på andre svingebevegelser eller lenker, faller litt av poenget med denne type funksjoner bort. Basert på observasjoner kan man derimot legge inn faste tidstillegg på spesielle svingebevegelser hvis man anser dette som hensiktsmessig. Dette kan gjøres på ulike måter.

En mulig fremgangsmåte som ikke krever detaljerte registreringer i hvert enkelt veikryss, utnytter at svingebevegelsene grovt t_x^k kan deles inn i fire nivåer avhengig av hvor mange svingebevegelser man har vikeplikt for. Man tenker seg da at dette vil avgjøre hvor stor forventet forsinkelse svingebevegelsen i gjennomsnitt vil medføre. Det øveste nivået, nivå 0, representerer en situasjon hvor det er forkjørsrett og dermed ingen eller liten forventet forsinkelse, avhengig av mulighetene for forbikjøring av ventende biler. På nivå 1 har bilene vikeplikt for én svingebevegelse og dermed høyere forventet forsinkelse enn nivå 0, men lavere enn nivå 2 og 3. En slik kategorisering av svingebevegelser i veikryss er vist i figur 3.4.

Det første veikrysset representerer et vanlig veikryss, mens det andre viser situasjonen i et kryss mellom en forkjøringsvei og en vei med vikeplikt. Denne fremgangsmåten kan med fordel også benyttes på lysregulerte veikryss. En slik kategorisering med tilhørende verdier for forventet forsinkelse vil sannsynligvis gi mer realistiske veivalg og dermed også reisetider mellom sonene i nettverket. Forsinkelsene vil imidlertid kunne variere ganske sterkt med trafikkvolumene over døgnet og også mellom veikryss i ulike deler av veinettet. Ulike verdier for forventet forsinkelse avhengig av variasjonen i trafikkvolumer over døgnet vil dermed også kunne gi enda mer realistiske resultater fra denne type modeller.



Figur 3.4: Svingebevegelser i veikryss kategorisert etter nivåer for forventet forsinkelse

Dette tema knyttet til kapasitetsfunksjoner og forsinkelser i veikryss er altså mildest talt problemfylt. De funksjoner man benytter kan imidlertid til en viss grad verifiseres hvis man har et sett med gode turmatriser, korrekte tellinger og kjøretidsmålinger og rimelig holdbare atferdsmessige forutsetninger til grunn for veivalgsberegningene. Problemerkene er størst hvis det er stor trengsel. Her skal vi huske at en relativt stor del av trafikken, selv i Oslo-området, avvikes under forhold som tilnærmet kan karakteriseres som fri flyt. Under slike forhold kan vd-funksjonene gi relativt gode beskrivelser av virkeligheten.

Vi skal også påpeke at den type nettverk og modeller det er snakk om her ikke bør benyttes til detaljerte veivalgsanalyser i situasjoner med høy trengsel. På den andre siden bør man kunne kreve at de bilturmatriser man legger ut på det kodede nettverk gir rimelig realistiske trafikkfordelinger på veiene og et tilnærmet korrekt bilde av reisetidene i området. Her må imidlertid kvaliteten på turmatrisene, detaljeringen av veinett og soneinndeling og de atferdsmessige forutsetninger som legges til grunn også tas i betraktning.

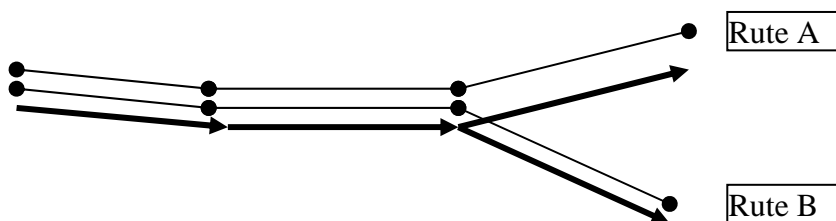
3.1.2 Kollektivnett

Hver enkelt kollektivrute i studieområdet må være representert i kollektivnettet. For ruter som går på egne traseer må infrastrukturen først legges inn som egne lenker. Det lages vanligvis en liste som angir hvilke kjøretøyer som finnes i studieområdet. Denne listen inneholder også data som beskriver kjøretøyene. Av typiske data i kjøretøybeskrivelsen kan nevnes:

- passasjerkapasitet
- tids- og avstandsavhengige driftskostnader
- energibruk
- størrelse på kjøretøyparken

For hver kollektivrute angis frekvens, gjennomsnittlig kjørehastighet, kjøretøytype og vanligvis rutenummer og en verbal rutebeskrivelse. Kollektivrutens bevegelse langs traseen angis som en sekvens av noder. Mellom disse nodene må det være sammenhengende lenker, enten vanlige veilenker eller spesielle lenker som representerer togspor, trikkeskinner, egne bussveier med mer. En hel rutebeskrivelse består dermed av en lang liste med noder som ruten passerer mellom de noder som representerer endeholdeplassene. Hvis ruten pendler, må tilbaketurnen også kodes inn.

Figur 3.5 gir en illustrasjon på hvordan kollektivrutene kan kodes inn i nettverket. Lenkene er representert med tykke piler, mens kollektivrutene er angitt som linjer mellom punkter. En slik linje som går mellom to punkter eller noder, kalles for et rutesegment. I figur 3.5 er det som vi ser seks rutesegmenter, tre for hver av kollektivrutene. Til hvert segment er det vanligvis knytte en rekke data. Disse data beskriver ulike kjennetegn ved denne spesifikke delen av kollektivruten. Typiske kjennetegn er kjøretid eller hastighet og en angivelse av hva som skjer på den noden segmentet ender i. Hvis denne noden er en holdeplass, angis vanligvis stopptid, og eventuelle på- og avstigningsforbud. På denne måten kan man skille mellom ekspressruter som ikke stopper eller bare stopper for på- eller avstigning, og ruter med et hyppigere stoppmønster og dermed lavere hastighet.



Figur 3.5: Eksempel på koding av kollektivruter

Siden all trafikk i turmatrisene starter og ender i sonecentroidene, må kollektivtraseene knyttes sammen med disse. Dette kan i prinsippet gjøres på flere måter. I figur 3.1 ser vi at sonen er knyttet direkte til holdeplassene med en sone-tilknytning. I figur 3.2 er gangmulighetene kodet mer detaljert, og den finere soneinndelingen kan bidra til en mer realistisk fordeling av trafikk på kollektiv-

rutene. Siden hastigheten når vi går vanligvis er lav (4-5 km/t) i forhold til fremføringshastigheten om bord i et kjøretøy, er en detaljert soneinndeling og beskrivelse av tilgjengelighet til kollektivtilbudet svært viktig for å oppnå realistiske resultater med denne type verktøy.

For å illustrere dette, kan vi studere et eksempel basert på figur 3.1 og 3.2. La oss si at gangavstanden fra sone til holdeplass i figur 3.1 er satt til 1,5 km, mens avstandene fra soner til holdeplasser i figur 3.2 varierer fra 0,5 km til 2 km. Hvis vi regner 5 km/t, vil gangtiden i det første tilfellet være 18 minutter, mens den korteste gangtiden i det andre tilfellet vil være 6 minutter og den lengste 24 minutter. I dette tilfellet vil vi dermed ha en feilmargin på 18 minutter, som hvis kjøreturen inn til sentrum for eksempel er på 30 minutter og ventetiden er 5 minutter, vil gi en betydelig feilmargin også på total fremføringstid fra sone til sone. Dette er en type aggregeringsfeil som kan medføre mer eller mindre alvorlige feil også i beregninger av etterspørsel i området.

3.1.3 Kombinerte reisemåter

De fleste former for kombinerte reisemåter kan behandles med denne type verktøy gjennom oppfinnsom og tilstrekkelig detaljert koding av reisemidler og infrastruktur. I byområder hvor det er relativt vanlig med overganger mellom ulike kollektive transportmidler er det som nevnt tidligere, vanlig å behandle disse ved å definere en egen mer eller mindre ensartet kollektiv reisemåte med en ensartet tilbringermåte til kollektivsystemet. Mating med buss til tog og T-bane kan for eksempel behandles på denne måten. Enkelte problemstillinger kan imidlertid kreve mer differensierte studier av tilbringertransport. Som eksempler på slike studier kan nevnes etablering av nye terminaler og mer generelle analyser av tiltak som kan tenkes å påvirke transportkvaliteten for kombinerte reiser.

Sykkel som tilbringertransport kan for eksempel representeres som en egen tilbringermåte ved detaljert koding av sykkelstier og fremkommelighet for syklistene. Innfartsparkering og drosje som tilbringertransport representerer en større utfordring blant annet fordi bruk av bil på tilbringerreisen gir større fleksibilitet i valg av omstigningspunkt. Det kan ligge ulike vurderinger bak valgene av omstigningspunkt tilknyttet eventuelle ærend underveis og kvaliteten på transporttilbudet på returreisen. Behandling av kombinerte reiser krever også at man har egne turmatriser for disse reisemåtene. Realistiske beregninger på etterspørselssiden setter kanskje større begrensninger i forhold til behandling av kombinerte reisemåter enn mulighetene til å beskrive dem som egne transportnettverk.

3.2 Rute- og veivalgsmodeller

3.2.1 Veivalgsmodeller for bilister

De mest benyttede algoritmene for valg av reisevei som benyttes til fordeling av biltrafikk i et veinett bygger på hypotesen om en likevekt i transportsystemet. Denne likevektshypotesen postulerer i korthet at bilistene alltid vil forsøke å minimere reisetiden (eller kostnaden) og at de har full informasjon om reisetider på alternative ruter. Bilistene velger dermed alltid den raskeste (eller billigste) vei

mellom startpunkt og endepunkt. Denne likevekten er under disse omstendighetene karakterisert ved at ingen kan forbedre sin reisetid ved å endre reiserute.

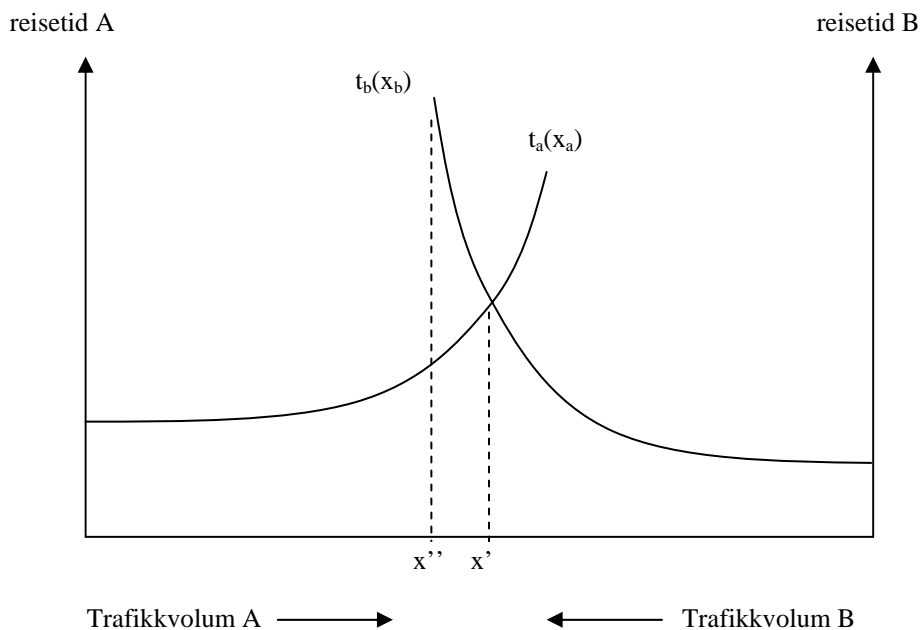
F H Knight (1924) var kanskje den første til å formulere ideen om trafikklikevekt i et transportsystem. Wardrop lanserte ca tjue år senere i *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research* sine to prinsipper om "user equilibrium" og "system optimum" og formaliserte med dette Knights tanker om likevekt i et kapasitetsbegrenset transportnett. I 1956 formulerte Beckman, Winston and McGuire et optimeringsproblem for løsning av trafikklikevektsproblemet. Denne formuleringen ligger fortsatt til grunn for de fleste løsningsalgoritmene som benyttes i dag.

Likevektshypotesen er imidlertid relativt enkel å plukke fra hverandre. For det første er det urealistisk å forutsette at alle bilister til enhver tid kjenner reisetidene eller kostnadene knyttet til alle relevante reiseruter. For det andre er det ikke sikkert at det bare er reisetider og kostnader som er avgjørende for bilistenes valg av reiserute. Til slutt kan selve tanken om en likevekt virke relativt absurd i et samfunn og et transportsystem i stadig forandring. Disse tre forholdene kan utdypes i ulike retninger og det finnes også flere argumenter som opponerer mot likevektshypotesen.

Selv om vi verken liker eller tror på likevektshypotesen, er det minst én viktig årsak til at vi i modellsammenheng bør holde oss til denne. Hvis vi skal benytte modellene til analyser av reisetidsbesparende tiltak, er vi nødt til å være sikre på at den trafikkfordeling vi beregner på veiene representerer en stabil og entydig løsning og at vi alltid vil få løsninger med de samme karakteristika, selv om veinettet eller trafikkvolumene, eller begge deler, endrer seg. Noe annet ville gi relativt vilkårlige resultater fra slike analyser, noe vi neppe er tjent med.

Det er vanlig å illustrere Wardrops 1. likevektsprinsipp i et badekardiagram som vist i figur 3.6. Vi betrakter her for enkelhets skyld et bestemt sonepar og forutsetter at disse er sammenknyttet av bare to alternative veier. Den ene veien (B) er raskere enn den andre, men har lavere kapasitet. Sammenhengen mellom kjøretid og trafikkvolum på de to veiene er markert ved kurvene $t_a(x_a)$ og $t_b(x_b)$ i figuren. Et gitt antall biler, angitt ved den horisontale avstanden mellom tidsaksene i figuren, skal kjøre mellom de to sonene i den perioden som studeres. Spørsmålet er hvorledes bilene vil fordele seg på de to veiene under forutsetning av at sjåførene kun legger vekt på å oppnå så lav reisetid som mulig og har full informasjon om denne. Svaret er selvsagt under skjæringspunktet mellom de to kurvene ved den stiplede loddrette linjen merket x' . Denne løsningen er en stabil likevekt fordi uansett valg av reiserute kan ingen bilister redusere sin reisetid ved å endre sitt rutevalg.

En konsekvens av dette er at alle valgte reiseruter mellom startpunkt og målpunkt medfører identiske reisetider (kostnader). Reiserutene på relasjonen kan dermed inndeles i to grupper; alle reiseruter som blir benyttet og som medfører identiske reisetider, og alle reiseruter som ikke blir benyttet og som altså har lengre reisetid.



Figur 3.6: Illustrasjon av hypotesen om trafikklikevekt i et veinettverk

Man skal merke seg at selv om "user equilibrium" er basert på "rasjonelle rutevalg", så vil ikke denne likevekten nødvendigvis innebære rutevalg som minimaliserer total kjøretid i systemet. Dette skyldes forhold som i økonomiske fagkretser kalles eksterne effekter mellom brukere av veisystemet. Slike eksterne effekter oppstår når det er kø og skyldes at bilistene i sitt reisemiddel- og rutevalg ikke tar hensyn til den forsinkelsen de påfører de andre bilistene i systemet.

Wardrops 2. prinsipp om "system optimum" beskriver en situasjon der de eksterne effektene er internalisert, og hvor bilistene i tillegg til sine egne kostnader også tar hensyn til andre bilisters reisekostnader. En slik situasjon vil man oppnå i den grad man kan innføre et system med ideell veipricing (bl a Larsen 1990).

Det er minst fire forskjellige algoritmer for fordeling av trafikk i et veinett. Alle er iterative og benytter såkalt "all or nothing assignment" (korteste/raskeste vei) for å fordele trafikken i hver iterasjon. Forskjellene mellom algoritmene ligger i hvorledes reisetidene og trafikkvolumene på de aktuelle reiserutene oppdateres mellom hver iterasjon og hvilken informasjon som benyttes til dette.

Algoritmen for lineær approksimasjon er den metoden som ligger nærmest opp til likevektshypotesen. Med denne metoden beregnes arealet under vd-funksjonene på hver lenke gitt den trafikken som går på lenken. Disse arealene summeres over alle lenker som inngår i de kjøreruter som er korteste vei mellom hver iterasjon. I første iterasjon legges all trafikk på korteste vei. Dette gir høye reisetider på disse reiserutene. I andre iterasjon vil dermed andre reiseruter gi lavere reisetider. Dette gjør det mulig mellom hver iterasjon å finne ut i hvilken retning trafikkvolumene skal endres for hver av de mulige veivalgene og optimal

endring i trafikkvolumer kan estimeres. Siden algoritmen søker etter minimerte reisetider, representert ved at det totale arealet under vd-funksjonene er minst mulig, kan man sette et konvergenskrav til løsningen. Dette innebærer at de reiserutene som er benyttet i løsningen, gir identiske reisetider på konvergenskravet nær.

I algoritmen for trinnsvis nettfordeling av trafikken deles totaltrafikken inn i et antall like store deler tilsvarende antall iterasjoner som skal benyttes. For hver iterasjon økes trafikkmengden som fordeles på veinettet. Den raskeste reiseruten fylles opp først. Deretter fordeles det trafikk på den nest raskeste ruten. Dette fortsetter til all trafikk er fordelt. Hvis antall trinn er tilstrekkelig stort, kan denne metoden tilnærmet gi samme volumer på veinettet som metoden for lineær approksimasjon, men forskjellige reisetider på de ulike veiene. Dette gjør at metoden ikke kan benyttes til beregninger av reisetider til input i nytte-kostnads-analyser.

I algoritmen for begrenset kapasitet legges all trafikk ut på korteste reiserute i hver iterasjon. Dette gir høye reisetider på den ruten som til enhver tid er kortest. Lenketidene oppdateres langsomt, slik at en annen reiserute blir raskest i neste iterasjon. Metoden søker dermed gjennom flere mulige veivalg, og det som til syvende og sist bestemmer trafikkvolumene er antall ganger hver rute har vært raskest på et gitt antall av de siste iterasjoner.

Algoritmen for suksessive gjennomsnitt oppdaterer trafikkvolumene på ulike kjøreruter mellom hver iterasjon ved å inndele trafikkvolumene i stadig finere intervaller. I første omgang legges alt ut på korteste vei. I neste omgang legges halvparten på den korteste ruten og halvparten på den som er nest kortest, osv. Etter hvert som trafikkvolumene blir finere inndelt, tas flere og flere reiseruter i betraktning, helt til mer trafikk kan bli fordelt på de rutene som i utgangspunktet var raskest. På denne måten vil stadig finere inndelte trafikkvolumer forskyves mellom de ulike reiserutene. Denne metoden konvergerer, men det tar lang tid. Metoden gir heller ikke løsninger som oppfyller likevektskravet.

Det er altså algoritmen for lineær approksimasjon som er den vi bør benytte i hvert fall når vi skal beregne reisetider som skal inngå i analyser. Denne er da også implementert i alle de mest benyttede programpakken som i dag er tilgjengelig på det kommersielle marked.

Alle disse algoritmene er egentlig bare programskall som muliggjør veivalgs-beregninger. Som planleggere og utredere må vi legge inn data i disse programmene, og disse dataene er vi ansvarlige for selv. Veinettet med tilhørende vd-funksjoner er, som vi har vært inn på over, svært sentrale input til slike beregninger. Like viktige er imidlertid de atferdsmessige forutsetningene man må legge til grunn i slike beregninger. Spørsmålet her er hvordan trafikantene vektlegger reisetid opp imot reisekostnader. Man kan tenke seg at "motstanden" for en gitt trafikant på en bestemt reiserute kan representeres med følgende sammenheng:

$$3.i \quad C_{ij} = a t_{ij} + b k_{ij}$$

Denne sammenhengen kan betegnes generaliserte kostnader, og den inneholder en tidskomponent "t_{ij}" og en kostnadskomponent "k_{ij}". Forholdet mellom parametrene "a" og "b" angir denne trafikantens vektlegging av tid og kostnader.

Hvis vi dividerer hele uttrykket med "a", får vi et uttrykk for de generaliserte kostnader målt i reisetid. Dividerer vi med "b", får vi målt de generaliserte kostnader i kroner. Slik sett vil forholdet "a/b" representere denne trafikantens tidsverdi. Å fastsette verdien på disse parameterne når vi skal gjennomføre veivalgsberegninger er en stor utfordring. De turmatrisene vi har til rådighet er sammensatt av enkeltreiser gjennomført av individer i ulike situasjoner med til dels heterogene preferanser knyttet til reisetid og reisekostnader. Reisekostnadene kan i tillegg være sammensatt av komponenter som kjøreavhengige kostnader, bompenger, fergekostnader, parkeringskostnader med mer, hvor vi verken har opplysninger om betalingsform (rabattkort) eller om hvem som betaler (arbeidsgiver). Dette bringer inn problemstillinger knyttet til hvilke og hvor stor andel av de ulike kostnadskomponenter som kan karakteriseres som atferdsrelevant.

Tar vi alt dette i betraktning, vil vi innse at vi i beste fall vil være i stand til å etablere grove gjennomsnittlige parameterverdier på "a" og "b", og at det nødvendigvis vil være tilknyttet en ikke ubetydelig variasjon rundt gjennomsnittene. At vi opererer med slike grove gjennomsnitt vil i seg selv gi inntrykk av en presisjon i veivalgsberegningene som naturligvis ikke vil være til stede i praksis. De programpakken som benyttes i dag gir til en viss grad muligheter til å løse på forutsetningen om homogene preferanser ved å definere egne kjøretøy- eller trafikantklasser som har ulike kjørekostnader. En slik tilnærming krever imidlertid også et apparat til å behandle denne differensieringen på etterspørselssiden.

3.2.2 Rutevalgmodeller for kollektivtrafikk

Rutevalgmodellering for kollektivtrafikken har ikke så lang tradisjon som modelleringen på bilsiden. Først sent på 70-tallet ble fokus for alvor innrettet mot dette feltet. Modelleringen fikk et gjennombrudd på midten av 80-tallet med arbeidet til H Spiess og M Florian (Spiess 1984 og Spiess og Florian 1989).

De fleste algoritmene for rutevalg er basert på konseptet om *optimale strategier*. En strategi er i denne sammenheng definert som "et sett regler som når de benyttes gjør at en trafikant kan nå sin destinasjon fra ethvert punkt i transportnettet". Dette kan virke som en relativt diffus definisjon. Med de begrepene som er innført tidligere i dette kapittelet kan imidlertid en strategi i denne sammenheng illustreres med følgende enkle regler:

1. Gå fra sonecentroide O langs korteste gangvei til holdeplass X.
2. Ta den første bussruten som kommer av A og B
3. Gå av ved holdeplass Y
4. Gå fra Y langs korteste gangvei til sonecentroide D.

Begrepet *attraktive linjer* er en sentral del i rutevalgsalgoritmen. På hver node hvor kollektivlinjer passerer kan det defineres et sett med linjer som er attraktive i den forstand at dersom de tas med i strategien eller vurderingen, så reduseres den totale forventede reisetiden fra denne noden til målpunktet for reisen. Det er ikke sikkert at alle de ruter som passerer holdeplassen passerer det området som er reisens destinasjon. Om en kollektivrute i denne forstand er attraktiv eller ei, er derfor knyttet til om den ekstra reisetiden kan oppveies gjennom reduksjon av ventetiden som følge av at det tar kortere tid å vente hvis man har flere ruter å

velge mellom. Den optimale strategien er det settet regler som når de benyttes minimerer total forventet reisetid.

Reisetidskomponentene som vanligvis inngår i den forventede, eller generaliserte, reisetiden er:

$$\begin{aligned} 3.ii \quad & \text{Generalisert reisetid} \\ & = \text{gangtid} * \text{gangtidsvekt} \\ & + \text{ventetid} * \text{ventetidsvekt} \\ & + \text{påstigningstid} * \text{påstigningsvekt} \\ & + \text{kjøretid ombord i reisemiddelet} \end{aligned}$$

Gangtiden er definert gjennom avstanden på gang- og veilenkene, og en eksogent gitt ganghastighet. Ventetiden på en node n er gitt ved formelen:

$$3.iii \quad V_n = vtf_n / \sum_i (1/hdwy_i),$$

hvor $hdwy_i$ er tid mellom avganger på rute i ($i=1,2,\dots$ antall attraktive ruter som trafikkerer noden), og vtf er en ventetidsfaktor, som angir hvor stor andel av tidsintervallet mellom avgangene for de attraktive rutene som faktisk medgår til ventetid. Når de attraktive linjer på en node er bestemt, er sannsynligheten for at ruten blir brukt (kommer først), eller *rutesannsynligheten* gitt ved formelen:

$$3.iv \quad P_i = (1/hdwy_i) / \sum_i (1/hdwy_i)$$

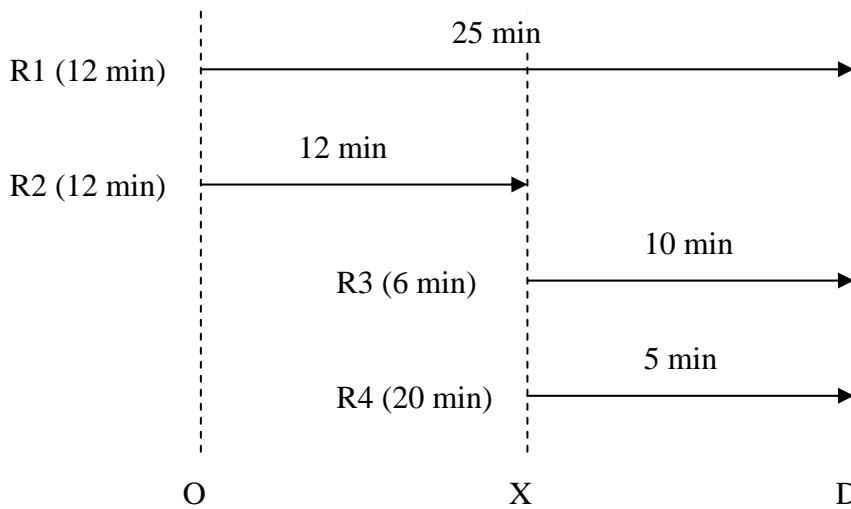
Denne formelen blir brukt når trafikkvolumene skal fordeles på rutene og til beregningen av den forventede reisetiden. Påstigningstiden er ikke den eksakte tid det tar å stige på kollektivmiddelet, men skal tilsvare den ulempen, omregnet til tid, som påstigning av transportmiddelet innebærer. Vi skal komme tilbake til tolkningen av denne parameteren senere.

Vektfaktorene i formelen for generalisert reisetid er atferdsparametre som må oppgis av brukeren av programpakken på samme måte som vektfaktorene for kjørekostnader og reisetid i veivalgsalgoritmene for biltrafikk. Vi vil dermed ha de samme problemer knyttet til gjennomsnittsverdier for disse parametrene når vi gjennomfører rutevalgsberegninger for kollektivtrafikanter.

Vi har nå definert de mest sentrale begrepene i rutevalgsalgoritmene for kollektivtransport og kan gå over til å illustrere de viktigste sammenhengene gjennom et enkelt eksempel. Figur 3.7 viser det kollektivtilbudet vi skal studere. En trafikant skal reise fra O til D og kan velge mellom en direkterute 1 som ikke stopper på holdeplass X, eller en rute 2 som går halve veien og som innebærer omstigning ved holdeplass X. Ved X er det to muligheter rute 3 eller rute 4. Kjøretidene og tiden mellom avgangene er vist i figur 3.7.

Hvis trafikanten insisterer på å kun ta i betraktning rute 1, som går direkte, vil reisetiden, under forutsetning av at trafikantens forventede ventetid er halve frekvensen, bli $(25 \text{ min} + 0.5 * 12 \text{ min}) = 31 \text{ min}$. Hvis trafikanten insisterer på å reise med rute 2 i kombinasjon med rute 3, vil forventet reisetid bli $(12 \text{ min} + 0.5 * 12 \text{ min}) = 18 \text{ min}$ for den første delen og $(10 \text{ min} + 0.5 * 6 \text{ min}) = 13 \text{ min}$, dvs totalt 31 minutter hvis vi ikke regner med ulempen knyttet til selve omstigningen. Den siste mulige kombinasjonen vil på samme måte gi 18 minutter for den første

delen (R2) og $(5 \text{ min} + 0,5 * 20 \text{ min}) = 15$ minutter for den andre (R4), totalt 33 minutters reisetid.



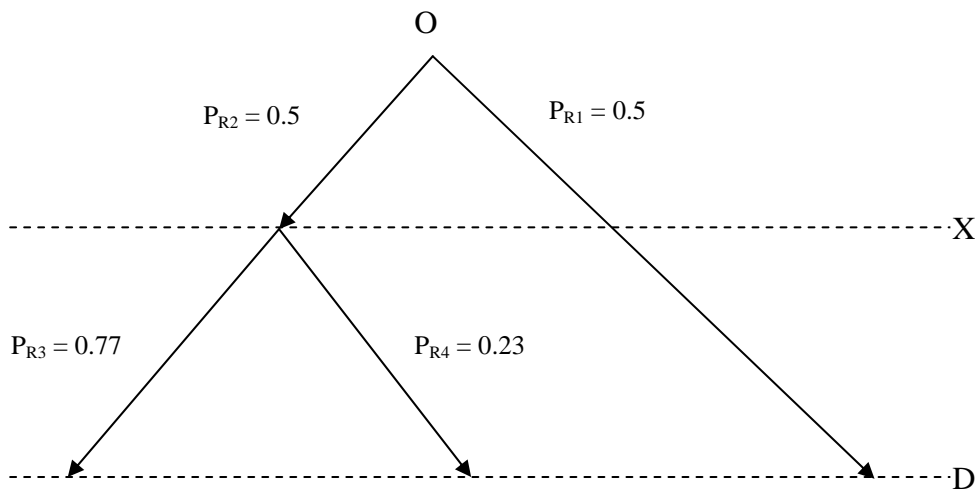
Figur 3.7: Illustrasjon av et forenklet kollektivsystem

Hvis trafikanten nå i stedet lar tilfeldighetene styre og til en hver tid tar den ruten som kommer først, kan dette illustreres ved figur 3.7. Fra O går det til sammen 10 ruter pr time (R1 5 avganger og R2 5 avganger). Sannsynligheten for at Rute 1 kommer først er dermed like stor som at rute 2 kommer først ($P_{R1}=P_{R2}=50\%$, jfr fig 3.8). Forventet ventetid ved O er også halvert fra 6 minutter til 3 minutter fordi trafikanten nå kan velge mellom flere avganger.

Det er nå altså 50 prosent sannsynlighet for at trafikanten reiser direkte til D med rute 1 (25 min reisetid) og 50 prosent sannsynlighet for at turen går via X. Turen til holdeplass X tar 12 minutter. Ved holdeplass X har rute 3 og rute 4 til sammen 13 avganger pr time, og det er 77 prosent sannsynlighet for at rute 3 kommer først og 23 prosent sannsynlighet for at rute 4 kommer først. Forventet ventetid ved X er 2,3 minutter. Følgende regnestykke kan derfor settes opp til beregning av forventet total reisetid fra O til D:

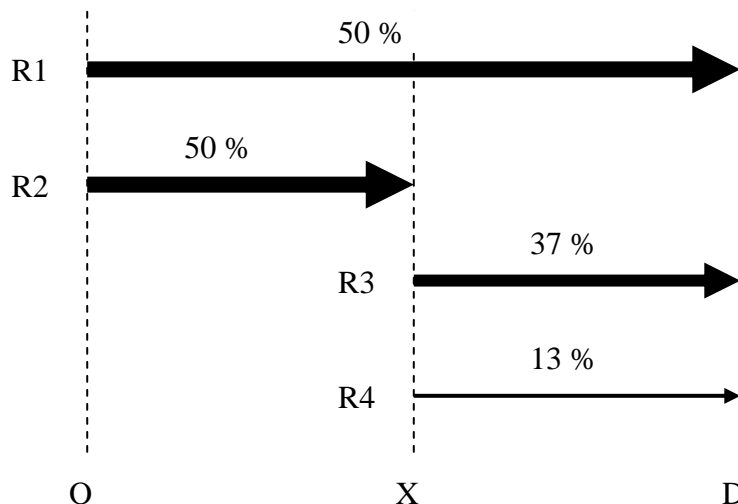
$$\begin{aligned}
 3.v \quad GT_{OD} &= V_O + P_{R1} * 25 \text{ min} + P_{R2} (12 \text{ min} + V_X + \{P_{R3} * 10 \text{ min} + P_{R4} * 5 \text{ min}\}) \\
 &= 3 \text{ min} + 0,5 * 25 \text{ min} + 0,5(12 \text{ min} + 2,3 + \{0,77 * 10 \text{ min} + 0,23 * 5 \text{ min}\}) \\
 &= 27,1 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Vi har her gjort systematisk bruk av formlene 3.iii og 3.iv samt den informasjonen som ligger i figurene 3.7 og 3.8.



Figur 3.8: Illustrasjon av rutesannsynlighetene i et forenklet kollektivsystem

Hvordan blir så trafikkfordelingen på de fire rutene? Som nevnt over, er det rutesannsynligheten ved hvert påstigningspunkt som bestemmer trafikkfordelingen. Trafikkfordelingen for det eksempelet vi har studert kan dermed vises i figur 3.9. Det sentrale er hvilke ruter som defineres som attraktive på ulike holdeplasser. Her benyttes informasjon om fremføringstider og ventetider. Når de attraktive rutene er bestemt, er det rutesannsynlighetene som bestemmer trafikkfordelingen. Da tas altså kun de kombinerte avgangsfrekvensene i betraktning.

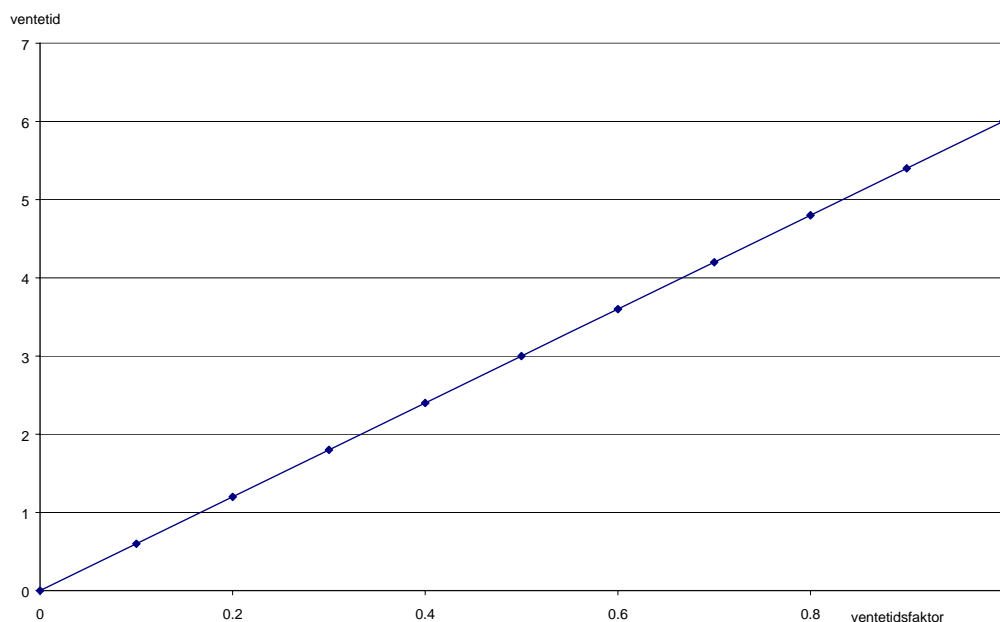


Figur 3.9: Illustrasjon av trafikkfordelingen i et forenklet kollektivsystem

Dette eksempelet illustrerer hovedpoengene i rutevalgslgoritmene for kollektivtransport. Det som ved første øyekast kan virke litt urealistisk er at den enkelte trafikant kun ser ut til å ha informasjon om hvor de ulike rutene går, hvor lang tid det tar og hvor man eventuelt må bytte transportmiddel, mens informasjon om

avgangstider ikke er kjent. Her skal vi imidlertid huske at vi først og fremst bruker denne type algoritme til å fordele en turmatrise på kollektivnettet. I en slik matrise betrakter vi vanligvis et totalt antall trafikanter som reiser i løpet av en viss tidsperiode. Det kan da være mer realistisk å anta at disse ankommer holdeplassene fordelt over denne perioden, egentlig fra forskjellige steder som vi har aggregert opp til ett punkt.

Ventetidsfaktoren ” v_{t_n} ” i formel 3.iv kan også benyttes til å justere forutsetningen om at ruter og trafikanter ankommer holdeplassene uniformt fordelt over den tidsperioden som studeres. Figur 3.10 viser ventetiden beregnet med formel 3.iii ved ulike verdier av ventetidsfaktoren i en situasjon hvor to ruter, hver med 12 minutters avgangsintervall, er definert som attraktive ved en gitt holdeplass (jfr holdeplass ”O” i eksempelet). Ventetidsfaktoren kan variere i intervallet $(0,1]$, hvor 0,5 tilsvarer faste avgangsintervaller med jevnt tidsintervall mellom avgangene og at trafikantene ankommer holdeplassene jevnt fordelt over tid. Verdier høyere enn 0,5 gir lengre ventetider enn halve avgangsintervallet og kan således benyttes i situasjoner hvor rutene ankommer holdeplassene mer eller mindre på samme tid. Verdier lavere enn 0,5 gir kortere ventetider enn halve avgangsintervallet og kan således benyttes i situasjoner hvor trafikantene må antas å ha kjennskap til rutetidene. Lave verdier kan for eksempel også benyttes hvis man skal simulere situasjoner hvor det er korrespondanse mellom to kollektiv-ruter, ved å spesifisere lav ventetidsfaktor på utvalgte omstigningspunkter.



Figur 3.10: Sammenheng mellom ventetid og ventetidsfaktor

Hvis vi i tenker oss at vi har observert trafikken på rutene i det lille transportnettet i eksemplet over og funnet at figur 3.10, som viser trafikkfordelingen, ikke gir et riktig bilde av trafikantenes atferd, kan dette henge sammen med at vi har lagt inn feil forutsetninger for beregningene. Vi kan for eksempel tenke oss at den informasjonen vi sitter på sier at alle trafikanter som reiser fra O til D velger rute 1 og at de andre ikke blir valgt. En slik situasjon kan skyldes at vi i eksempelet ikke har tatt hensyn til at trafikantene kan vurdere en omstigning underveis på en

reise som en ulempe. Vi husker at den forventede reisetiden ved kun å være villig til å benytte rute 1 i eksempelet over var 31 minutter, mens reisetiden ved den kombinerte strategien var 27.1 minutter.

Ved å studere denne beregningen på nytt kan man finne at ved å legge inn en omstigningsulempe (OU) minst tilsvarende 7,8 minutters ekstra reisetid, vil dette alternativet falle ut av den optimale strategi for reisen mellom O og D. Dette er vist i regnestykket under hvor vi kun har lagt til en omstigningsulempe tilsvarende 7,8 minutter, og som resultat fått tilsvarende reisetid som ved bruk av rute 1 alene. Ved en omstigningsulempe høyere enn 7,8 minutter, vil inkludering av rute 2 i kombinasjon med rute 3 og 4 ikke redusere total forventet reisetid, og da heller ikke lenger være en optimal strategi. Disse rutene vil dermed falle ut av det attraktive settet, og vi vil få den samme situasjon som vi har observert.

3.vi

$$\begin{aligned} GT_{OD}^* &= V_O + P_{R1} * 25 \text{ min} + P_{R2} (12 \text{ min} + V_X + \mathbf{OU} + \{P_{R3} * 10 \text{ min} + P_{R4} * 5 \text{ min}\}) \\ &= 3 \text{ min} + 0.5 * 25 \text{ min} + 0.5 (12 \text{ min} + 2.3 + \mathbf{7.8} + \{0.77 * 10 \text{ min} + 0.23 * 5 \text{ min}\}) \\ &= 31 \text{ min} \end{aligned}$$

Vi må altså være nøye med de atferdsmessige forutsetninger som legges til grunn for rutevalgsberegningene. I formel 3.ii ser vi også at ulike reisetidskomponenter (gangtid, ventetid og påstigningstid) kan tilordnes ulike vekt-faktorer. Disse vekt-faktorene angir hvorledes trafikantene forutsettes å vurdere reisetidskomponentene i forhold til kjøretid om bord på selve transportmiddelet. Det er selvsagt viktig at man også her legger tilnærmet ”korrekte” forutsetninger til grunn for beregningene. Helt riktig vil man imidlertid aldri klare å modellere rutevalget.

De ulike programpakkene EMMA, TRIPS og VIPS har litt differensierte rutiner i forhold til spesifisering av vektete reisetidskomponenter, ventetidsfaktorer og påstigningsulempe i algoritmene. Selve algoritmene er heller neppe helt like. Dette har sannsynligvis liten betydning for beregninger av realistiske rutevalg i forhold til den overordnede betydningen av nettverkskodingen og de atferds-messige forutsetninger kan hevdes å ha.

4 Etterspørselsmodeller

De første geografisk baserte etterspørselsmodellene for persontransport ble utviklet på slutten av 50-tallet. Forskningen på dette området innen samfunnsvitenskapen økte raskt i omfang. Det er mange grunner til dette. Økende urbanisering og biltilgjengelighet på 60- og 70-tallet medførte et behov for nye verktøy som kunne brukes i planlegging tilpasset den nye situasjonen. Fordelen med de metodene som ble utviklet var at det var relativt lett å benytte dem i ulike konkrete prosjekter, hvor de gav realistiske og nyttige resultater. BETA-modellen, som ble utviklet i forbindelse med *Transportplan for Oslo* i 1965, er en av de tidligste transportmodellene som ble tatt i bruk i et konkret område.

De første modellene var basert på gravitasjonsmetodikk. Noe forenklet kan man si at de ulike prinsippene innenfor denne ”klasse” modeller uttrykker at interaksjonen eller trafikken mellom to soner er proporsjonal med antall aktiviteter eller kjennetegn i de to sonene og omvendt proporsjonal med friksjonen mellom dem. I disse modellene betraktes altså transportsystemet og området som studeres fra en aggregert synsvinkel hvor det fokuseres på massenes bevegelser heller enn på hvert enkelt individs atferd. Den mest brukte og kanskje også den teorimessig mest overlegne metoden kalles i litteraturen for *entropimaksimeringsprinsippet*. I avsnitt 4.1 skal vi gi en kort oversikt over hovedprinsippene i denne metoden

På slutten av 70-tallet begynte en ny metodikk å få fotfeste innen transportmodellering. Metodikken bygger på en teori om individers diskrete valg mellom gjensidig utelukkende alternativer. Denne metoden kan hevdes å være konsistent med mikroøkonomisk nytteteori, men den står også svært godt på egne ben. Denne teorien er svært anvendbar og benyttes på en rekke fagområder, som markedsføring, sosiologi, psykologi med mer. I transportsammenheng forsøker man kort sagt å modellere individenes, eller husholdenes, ulike valg når det gjelder personlig transport. Metoden er altså individbasert i motsetning til gravitasjonsmodellene, som er systembasert. Denne metodikken skal vi gjøre rede for i avsnitt 4.2.

De to prinsipielt forskjellige metodene er begge beheftet med styrker og svakheter. Disse skal vi forsøke å synliggjøre underveis. I avsnitt 4.3 vil vi imidlertid forsøke å sammenlikne de to metoder og se litt på forskjeller og likheter mellom de aggregerte gravitasjonsmodellene og de disaggregerte valgmodellene. Samtidig vil vi i dette avsnittet ta opp noen praktiske problemstillinger knyttet til bruk av transportmodeller.

4.1 Gravitasjonsmetodikk

I gravitasjonsmetodikken er sonene i et område de sentrale enheter. Sonene inneholder en bestemt mengde elementer eller størrelser som skaper (genererer) og trekker til seg (attraherer) reiser. Sonene er knyttet sammen av infrastruktur

som også fungerer som friksjon eller reisemotstand mellom sonene. Denne friksjonen har tradisjonelt vært avstand mellom sonene, men ulike mål på generaliserte kostnader (en vektet sum av reisetid og reisekostnader) kan også benyttes. I sin enkleste form kan gravitasjonsmodellen skrives på følgende måte:

$$4.1.i) \quad T_{ij} = p X_i X_j f(c_{ij}) / \sum_j X_j f(c_{ij}),$$

Her er X_i og X_j antall "enheter" i sone "i" og sone "j" som genererer og attraherer turer, p er en parameter som transformerer disse enhetene til turer og $f(c_{ij})$ er en (avtagende) funksjon av friksjonen mellom sone "i" og "j". Uttrykket under brøkstreken representerer effekten av at alle andre soner i området også trekker til seg turer.

I gravitasjonsmetodikken er altså massenes bevegelse det sentrale og ikke hvert enkelt individ. Det kan imidlertid hevdes at massenes bevegelser på "makronivå" og de observasjoner vi kan gjøre av trafikkvolumer mellom soner, reflekterer individuell atferd og individuelle valg på "mikronivå". Slik sett trenger man ingen informasjon om hva som ligger bak de individuelle beslutninger som gir en observert tilstand på makronivå. Metodikken forutsetter faktisk at vi ikke har slik informasjon.

Metodikken forutsetter imidlertid at man har tilgang til en hel del informasjon på aggregert nivå. Denne informasjonen kan godt være utledet av data på individnivå. Det kanskje mest kritiske i denne sammenheng er å få kjennskap til hvor mange reiser som starter og ender i hver enkelt av de sonene studieområdet er delt inn i. I de fleste tilfeller vil det være en nærmest uoverkommelig oppgave å skaffe slik informasjon til veie gjennom direkte observasjoner på makronivå. Derfor er man vanligvis avhengig av å formulere modeller som kan predikere dette. Disse modellene kan estimeres på data fra ulike utvalgsundersøkelser og karakteristika for hver enkelt sone alene, eller i kombinasjon med data fra andre kilder (telling, veikantintervju, med mer). Det finnes her en rekke metoder for datainnsamling, korreksjon av data og beregning av populasjonstall basert på utvalgsundersøkelser.

Den vanligste undersøkelsesmetoden for dette formål er såkalte OD-undersøkelser hvor et utvalg individer eller hushold blir spurt om hvor de bor, hvor de arbeider og reisemiddel, startpunkt og endepunkt for ulike typer reiser over en viss periode. Hovedhensikten med slike utvalgsundersøkelser er at man på ulike måter kan etablere sammenhenger mellom totalt antall turer til og fra sonene og karakteristika eller kjennetegn i sonene. Slike tall vil for eksempel kunne indikere hvor mange turer som produseres/attraheres i et gjennomsnittlig hushold eller av bestemte husholdstyper, hvor mange turer som produseres/attraheres pr m^2 areal i ulike bransjer, hvor mange turer som produseres/attraheres pr arbeidsplass, osv. Når man kjenner disse sammenhengene og beholdningen av kjennetegn i hver enkelt sone, kan man gjøre anslag på total turproduksjon og total turattrahering i hver enkelt sone.

Metodikken forutsetter videre at man har en viss oversikt over reiseavstander for de turene som gjennomføres i studieområdet. I stedet for avstand kan man her som nevnt bruke reisetider, reisekostnader eller en kombinasjon av disse for et utvalg

av de turene som gjennomføres i området. Slik informasjon vil man også kunne skaffe til veie gjennom en OD-undersøkelse.

Entropimaksimeringsprinsippet gjør det mulig å skape en OD-matrise basert på den informasjonen som er omtalt over. Siden entropimaksimering av mange betraktes som den klassiske gravitasjonsmodellen, skal vi holde oss til denne i dette kapitlet. Det eksisterer imidlertid flere metoder innenfor gravitasjonsmodellering. "Mininfo"-metoden er her kanskje den mest kjente. Denne metoden forutsetter at man har tilgang på data for OD-mønster på forhånd og er derfor ofte benyttet i oppdatering av turmatriser når man får tilgang på nye data.

4.1.1 Hovedtrekk ved entropimaksimering

Entropimaksimering bygger på statistisk teori, eller mer nøyaktig, på kombinatorikk. Et enkelt eksempel illustrerer hovedpoengene ved metoden. La oss anta at vi studerer et område som er inndelt i tre soner. Antall sonerelasjoner er da 9 i tallet. Anta videre at 27 turer skal fordele seg på de 9 sonerelasjonene i den perioden som studeres. Det vil være et stort antall mulige matriser som inneholder 27 turer. Hver matrise som inneholder 27 turer kaller vi en makrotilstand. Det er klart at disse matrisene kan settes sammen på et gitt antall måter. Hver måte å sette sammen en makrotilstand på kan kalles for en mikrotilstand. Hvis for eksempel to turer bytter plass i matrisen, endres mikrotilstanden, men ikke makrotilstanden. Hver makrotilstand vil altså være tilknyttet svært mange (og minst én) mikrotilstander.

Den mest sannsynlige fordelingen av de 27 reisene på de 9 cellene, *dersom ingen tilleggsinformasjon er gitt*, er 3 reiser i hver celle. Dette er den makrotilstanden som kan permuteres på flest måter (dvs er forbundet med flest mikrotilstander). Makrotilstanden 27,0,0,....., kan for eksempel bare settes sammen på én måte.

Ofte er det imidlertid mulig å skaffe til veie tilleggsinformasjon om reisemønsteret i et område. Denne informasjonen kan i mange tilfeller formuleres som betingelser på den OD-matrisen vi skal etablere. Gjennom for eksempel en utvalgsundersøkelse, eller betraktninger rundt bosatte og arbeidsplasser i sonene, kan vi skaffe oss rede på antall reiser som starter og ender i sonene i den perioden som studeres. Disse kolonne- og rekkesummene kan vi som nevnt kalle *marginalene* i matrisen. Slik informasjon kan redusere både makrorommet og mikrorommet og dermed øke sannsynligheten for at turene i matrisen stemmer overens med "observerte tall". De marginalene som er vist i tabell 4.1 under illustrerer dette poenget. Vi ser at alle "de mest ekstreme" makrotilstandene (27,0,0,..... , 26,1,0,..... , osv) ikke kan stemme overens med den nye informasjonen representert ved de marginaler som er skrevet inn med fet skrift.

fra/til	1	2	3	sum fra
1	3	3	3	9
2	3	3	3	9
3	3	3	3	9
sum til	9	9	9	27

Tabell 4.1a: "Mest sannsynlig" turmatrise

fra/til	1	2	3	sum fra
1	27	0	0	27
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
sum til	27	0	0	27

Tabell 4.1b: Lite sannsynlig turmatrise

Tabell 4.2a og 4.2b viser to mulige matriser som stemmer overens med de angitte marginalene. Hvis vi krever at matrisen skal treffe marginalene, blir antall mulige makrotilstander kraftig redusert. Antall mikrotilstander blir også redusert, men ikke tilsvarende. Dette skyldes at de mest ekstreme makrotilstandene bare er tilknyttet et begrenset antall mikrotilstander. Sannsynligheten for at "den riktige" makrotilstanden skal bli realisert økes dermed betraktelig.

fra/til	1	2	3	sum fra
1	5	2	1	8
2	6	2	4	12
3	4	2	1	7
sum til	15	6	6	27

Tabell 4.2a

fra/til	1	2	3	sum fra
1	4	2	2	8
2	7	3	2	12
3	4	1	2	7
sum til	15	6	6	27

Tabell. 4.2b

To matriser som stemmer overens med de samme kolonne- og rekkesummer

Jo mer informasjon man har om reisemønsteret i området, desto flere makrotilstander kan utelukkes fra det aktuelle makrorommet. Vet man for eksempel noe om reiseomfanget i området i form av kjørte km, reisetider o.l., kan dette formuleres som beskrankninger eller bibetingelser som den matrisen vi skal etablere skal oppfylle. Slik kan makrotilstander som for eksempel innebærer bare lange eller bare korte reisetider ekskluderes, og dermed reduseres antall makrotilstander ytterligere. Hvis vi for eksempel vet at det går 11 turer fra sone 2 og 3 til sone 1 i den perioden vi studerer, og 4 turer tilbake fra sone 1 til 2 og 3, ser vi i at matrisen i figur 4.2.a ikke oppfyller disse kravene, men at matrisen i figur 4.3.b gjør det.

4.1.2 Generering og attrahering av turer

Metoden som er skissert over forutsetter som nevnt at man har kjennskap til kolonne- og linjesummene, eller marginalene, i matrisene. Spørsmålet er altså å skaffe til veie anslag på hvor mange turer som starter (produseres) og ender (attraheres) i hver enkelt sone i studieområdet i den perioden som studeres. Hvis studieperioden er en gjennomsnittsdag eller en lengre gjennomsnittsperiode, er det grunn til å tro at marginalene i en turmatrise vil være tilnærmet like. Opereres det med kortere perioder, kan man imidlertid ikke forutsette at antallet reiser til en

sone skal være det samme som antallet reiser fra samme sonen. Marginalene henger selvsagt nøye sammen med hvor mange turer folk i gjennomsnitt foretar pr dag eller i den perioden som studeres. Det disse betraktningene imidlertid ofte skjuler er at antallet turer pr person ofte kan variere ganske mye avhengig av personens sosioøkonomiske tilhørighet, som kjønn, alder, inntekt og yrkesaktivitet.

I praksis starter man derfor ofte med å klassifisere turene, vanligvis etter reiseformål, person- eller husholdskategori og/eller etter reisetidspunkt. Det viser seg ofte at modellene kan bli vesentlig bedre hvis ulike reiser kategoriseres og modelleres separat. Det er for eksempel grunn til å anta at sysselsatte reiser oftere enn barn og pensjonister og gjennomfører andre typer reiser. Når det gjelder reiseformål, er de "faste formålene", til arbeid og utdanning mindre problematisk å modellere enn for eksempel handleturer og fritidsturer hvor det ikke, eller i hvert fall i mindre grad, er noe fast reisemål. Person-/husholdskategorisering benyttes som nevnt for å ta hensyn til at ulike reiseaktiviteter og frekvenser ofte er svært avhengig av sosioøkonomiske kjennetegn som sysselsetting, inntektsnivå, bilhold, husholdsstørrelse og husholdssammensetning. Man kan også tenke seg andre kategorier, som å skille på reisetidspunkt og/eller bostedsbaserte/ikke bostedsbaserte reiser. Hvilke turkategorier man ender opp med vil avhenge av datatilgang, lokale strukturer i persontransport i det området som studeres og ikke minst hvilke problemstillinger transportmodellen skal benyttes på.

Det finnes flere mulige tilnæringsmetoder i modellering av turgenerering. Metodene spenner fra svært enkle lineære regresjonsmodeller (innenfor hver kategori) til mer avanserte metoder for kryss-klassifiserte data. I estimering med regresjon kan man enten benytte data på husholds-/individnivå fra reisevaneundersøkelser, folke- og boligtellinger, arbeidsplassregister for arbeidsreiser eller sonedata hvor man benytter seg av forekomsten av forklaringsfaktorene (bosatte i kategorier, registrerte biler, arbeidsplasser med mer) i sonene til å estimere de antatte sammenhengene. I det siste tilfellet skal man merke seg at reiseaktiviteten blir avhengig av sonestørrelsen, med mindre man estimerer modeller for sonegjennomsnitt (for eksempel reiser pr hushold i de ulike kategorier). I regresjonsmodellene antas det ofte at det er lineære sammenhenger mellom forklaringsvariablene og antall reiser (til eller fra sonene). Dette er ikke alltid tilfelle. Det er imidlertid metoder som gjør at man kan ta hensyn til ikke-lineære sammenhenger (transformering av variable og bruk av dummy-variable). Analyse av kryss-klassifiserte data forutsetter at man har tilgang til en reisevaneundersøkelse. Metoden er basert på å estimere turfrekvenser for ulike husholdskategorier eller klasser som funksjoner av husholdskjennetegn. Antall husholdskategorier kan imidlertid ikke være altfor stort, fordi man trenger et visst minimum av observasjoner i hver kategori.

Første oppgave i gravitasjonsmetodikken består altså i å etablere sammenhenger mellom forekomsten av kvantiteter som gir opphav til og tiltrekker seg turer i hver sone og antall turer som faktisk blir generert og attrahert. Slike sammenhenger kan skrives på formen

$$4.1.ii) \quad O_i = \sum_m g_m G_{mi}$$

$$4.1.iii) \quad D_i = \sum_n a_n A_{ni}$$

hvor g_m er genereringsfaktor tilknyttet variabel "m", G_{mi} er størrelsen på variabel "m" i sone "i", og tilsvarende a_n er attraheringsfaktor for variabel "n" og A_{ni} er størrelsen på variabel "n" i sone "i".

Metoder basert på kryss-klassifiserte data kan, hvis vi holder oss til individnivå, formuleres som følger:

$$4.1.iv) \quad O_i = N_i \sum_k a_{ik} T_k$$

Her er " N_i " antall bosatte i sone "i", " a_{ik} " er andelen av de bosatte i sone "i" som tilhører kategori "k", og " T_k " gjennomsnittlig turfrekvens for kategori "k".

Hovedutfordringen med denne metoden er å etablere kategoriene på en slik måte at standardavviket i fordelingen på turfrekvens " T_k " innenfor en kategori blir minst mulig.

I genereringsmodellene er naturlig nok befolkningsstørrelsen en sentral variabel. Bilhold er en annen hyppig benyttet variabel i genereringsmodellene. Antall arbeidsplasser kan også defineres som variable i disse modellene. Arbeidsplasser fordelt på ulike næringer kan fungere som en slags indikatorvariabel som fanger opp generering av reiser som ikke starter hjemme. Her må man imidlertid holde styr på hvilket turbegrep som benyttes.

I attraheringsmodellene er antall arbeidsplasser den mest sentrale variabelen. Spesielt for reiser til arbeid vil tallet på arbeidsplasser kunne gi en god indikasjon på hvor mange reiser som ender opp i hver sone. For andre reiser, for eksempel handlereiser, vil forekomsten av arbeidsplasser i sonene også kunne fungere som et mål på attraktiviteten til en sone. Det er da vanlig å dele arbeidsplassene inn etter næring (antall arbeidsplasser i handel, service, industri, forvaltning med mer) eller i hvert fall etter publikumsattraktive og ikke publikumsattraktive arbeidsplasser. Det er klart at ulike næringstyper tiltrekker seg reiser i varierende grad og bør derfor også ha ulik attraheringsfaktor. Tallet på arbeidsplasser i ulike næringer er imidlertid sjelden tilstrekkelig til å fange opp alle typer reiser som ender i en sone. Spesielt vil dette gjelde ulike typer fritidsreiser som ender opp i områder med få eller ingen arbeidsplasser. Utfordringen ligger her i å formulere estimerbare mål på attraktiviteten til denne type soner.

Det er, kanskje med unntak for arbeidsreiser, vesentlig mer vanskelig å etablere gode attraheringsmodeller enn genereringsmodeller. Dette skyldes at man ved estimering av genereringsfaktorer i stor grad kan benytte husholdsbaserte reisevaneundersøkelser som inneholder gode data for de aktuelle forklaringsvariablene. Når det gjelder attraheringsmodellene, gir ikke reisevaneundersøkelsene like gode data, og man er i større grad avhengig av aggregerte data for sonene til å estimere disse sammenhengene.

Når man har fastsatt parametrene i sammenhengene 4.1.ii) og 4.1.iii), kan man ved å benytte de variable man har for sonene (befolkning i ulike kategorier, arbeidsplasser i ulike kategorier, og forekomsten av andre genererende og attraherende størrelser i soner) beregne det antall reiser som starter og ender i hver enkelt sone. Slik uavhengig estimering av turproduksjon og turattrahering vil imidlertid ofte resultere i modeller som totalt sett gir ulikt antall turer til sonene og fra sonene når de benyttes på sonedata. I slike tilfeller er man avhengig av å gå inn å justere på de estimerte parametrene, noe som selvfølgelig ikke er heldig.

Siden genereringsmodellene vanligvis er bedre enn attraheringsmodellene, er det da vanlig å korrigere attraheringen slik at sum *fra* blir lik med sum *til*.

Eventuelt kan man gi avkall på regresjonsanalyser og analyse av kryss-klassifiserte data som metode og heller benytte en metodikk hvor man spesifiserer en egen betingelse som uttrykker at summen av turer fra sonene skal være lik summen av turer til sonene. Denne betingelsen kan i tilfelle skrives

$$4.1.v) \quad \sum_i O_i = \sum_i D_i$$

I kapittel 5.1 har vi beskrevet denne fremgangsmåten litt mer i detalj.

4.1.3 Turfordeling

Når vi har bestemt antall reiser som starter (O_i) og ender (D_i) i alle sonene, er neste oppgave å plassere turene i de enkelte elementer eller celler i turmatrisen. Vi har altså nå oversikt over totalt antall turer som starter i hver enkelt sone og totalt antall turer som ender i hver enkelt sone og trenger en metode for å fordele disse ut på elementene i matrisen. Entropimaksimering er som nevnt kanskje den metoden som er mest benyttet i etablering av gravitasjonsmodeller. Nedenfor skal vi gi en kort gjennomgang av metoden.

La T_{ij} være det ukjente antall reiser mellom sone "i" og "j", og $N (= \sum_i O_i = \sum_j D_j)$ være totalt antall reiser i den perioden som studeres. Med den terminologien som er innført over, kan vi nå si at den matrisen vi vil finne, **T**-matrisen, beskriver én av et stort antall mulige makrotilstander. Antall mulige måter N reiser kan permuteres over et antall, "K", sonerelasjoner, slik at det er T_{ij} reiser på hver sonerelasjon, er da gitt ved funksjonen:

$$4.1.vi) \quad W(T_{ij}) = N! / \prod_{i,j} T_{ij} !$$

Under forutsetning av at N er kjent, angir altså W antall mikrotilstander som realiserer makrotilstanden beskrevet ved **T**. I litteraturen er dette uttrykket kjent som *entropien* til **T**.

Den mest sannsynlige **T**, dvs fordelingen av reiser på sonerelasjonene kan finnes ved å maksimere logaritmen til 4.1.vi). Dette problemet kan, etter noe omregning (som blant annet innebærer at problemet gjøres kontinuerlig), skrives:

$$4.1.vii) \quad \text{maksimer } E(\mathbf{T}) = - \sum_{i,j} T_{ij} \ln(T_{ij})$$

Vi vil kreve at turmatrisen som skal etableres stemmer overens med de tallene for generering og attrahering vi har estimert gjennom genererings- og attraheringsmodellene. Vi formulerer derfor følgende bibetingelser for hver enkelt sone i studieområdet:

$$4.1.viii) \quad O_i = \sum_j T_{ij} \quad \text{for alle soner}$$

$$4.1.ix) \quad D_j = \sum_i T_{ij} \quad \text{for alle soner}$$

Disse bibetingelsene setter som krav til den matrisen vi skal etablere at antall turer fra en bestemt sone til alle soner og antall turer fra alle soner til en bestemt sone skal stemme overens med tilsvarende antall turer til og fra den bestemte sone beregnet med genererings- og attraheringsmodellene.

Med den terminologien vi har innført over, kan vi nå si at vi har eliminert et stort antall mikro- og makrotilstander i den endelige turmatrisen. Relativt sett har vi eliminert flere makrotilstander enn mikrotilstander, fordi de mest ekstreme makrotilstandene bare kan settes sammen på et begrenset antall måter. Vi er imidlertid interessert i også å benytte informasjon på reiseavstander i det området som studeres. En OD-undersøkelse eller reisevaneundersøkelse for området kan gi informasjon om fordelingen av reiser på avstand og gjennomsnittlig reiselengde i det området som studeres. Denne informasjonen kan benyttes til å formulere et ytterligere krav til den endelige matrisen. Et slikt krav kan formuleres matematisk med uttrykket:

$$4.1.x) \quad \sum_{i,j} T_{ij} c_{ij} = C$$

Her representerer c_{ij} avstanden mellom sone "i" og sone "j" og C er total reiseavstand for alle reiser i den perioden som studeres. Man trenger som nevnt ikke nødvendigvis å benytte et avstandsmål i 4.1.x). Generaliserte kostnader, dvs en vektet sum av reisetider og reisekostnader mellom sonene er kanskje et mer relevant mål å benytte i denne sammenheng. Problemet her er at gravitasjonsmetodikken ikke kan benyttes til å fastsette hvordan reisetider, fortrinnsvis oppsplittet på ulike komponenter som gangtid, ventetid, kjøretid og omstigninger som vanligvis tillegges ulik vekt av trafikantene, skal vektet sammen med kostnader. Formel 4.1.x) uttrykker at totalavstanden i den endelige matrisen skal summere seg opp til et kjent totaltall.

Maksimeringsproblemet løses ved standard Lagranges metode for maksimering av funksjoner med bibetingelser på løsningen. Avhengig av hvilke bibetingelser som formuleres, vil løsningen av problemet, for OD-element T_{ij} , være på formen:

$$4.1.xi) \quad T_{ij} = \sigma_i O_i \mu_j D_j e^{(-\lambda c_{ij})},$$

hvor σ_i , μ_j er uttrykk som blant annet inneholder Lagrange-multiplikatorer for bibetingelsene (kolonne- og linjesummer, og totale kostnader), og λ er en parameter for avstandsfølsomhet. Tolkningen av denne løsningen er at vi finner en fordeling av reisene som stemmer overens med bibetingelsene som ligger i ligningssystemet 4.1.vii)-4.1.x).

Parameterne σ_i og μ_j kalles gjerne for balanseringsfaktorer og hver sonerelasjon blir tilordnet et eget sett bestående av to slike balanseringsfaktorer. Disse kan skrives

$$4.1.xii) \quad \sigma_i = 1 / \{ \sum_j \mu_j D_j e^{(-\lambda c_{ij})} \},$$

$$4.1.xiii) \quad \mu_j = 1 / \{ \sum_i \sigma_i O_i e^{(-\lambda c_{ij})} \},$$

Vi ser at balanseringsfaktorene er gjensidig avhengig, noe som innebærer at de må beregnes iterativt. Først settes $\sigma_i = 1$ og verdier for μ_j beregnes. Disse inngår så i beregningene av de første faktorene og prosessen gjentas til "likevekt" er oppnådd og verdier er funnet for balanseringsfaktorene.

Ligningssystemet 4.1.vii)-4.1.x) kalles *dobbelt betinget*, fordi vi har med betingelser både knyttet til generering (O_i -ene) og til attrahering (D_i -ene). I noen situasjoner kan antall reiser til sonene eller fra sonene være ukjent. I slike tilfeller vil optimeringsproblemet være enkelt betinget. Slike modeller kan være aktuelle å

benytte i analyser av bostedsetterspørsmål (O_i -ene ikke kjent), eller i analyser av lokalisering av for eksempel servicefunksjoner (D_i -ene ikke kjent).

4.1.4 Reisemiddelfordeling

Gjennom entropimaksimering kan man formulere modeller som fordeler trafikk på reisemidler, eller reisemåter, simultant med turfordelingen. Dette kan vises ved en enkel omformulering av entropimaksimeringsproblemet 4.1.vii)-4.1.x).

Problemet kan nå reformuleres ved å innføre en toppskrift "m" for reisemåte.

$$4.1.xiv) \quad \text{maksimer } E(\mathbf{T}) = - \sum_{i,j} T_{ij}^m \ln(T_{ij}^m) \quad \text{gitt at}$$

$$4.1.xv) \quad \sum_{j,m} T_{ij}^m = O_i \quad \text{for alle "i" og "m"}$$

$$4.1.xvi) \quad \sum_{i,m} T_{ij}^m = D_j \quad \text{for alle "i" og "m"}$$

$$4.1.xvii) \quad \sum_{i,j,m} T_{ij}^m c_{ij}^m = C$$

Løsningen for antall reiser mellom sone "i" og sone "j" med reisemåte "m" blir nå på formen:

$$4.1.xviii) \quad T_{ij}^m = \sigma_i O_i \mu_j D_j e^{(-\lambda c_{ij}^m)},$$

I denne modellen spiller parameteren for avstandsfølsomhet, "λ", en dobbel rolle. Den kontrollerer her både fordelingen av turer på reisemidler, og fordelingen av turer på avstand. Det viser seg imidlertid ofte at dette er for mye forlangt for en eneste parameter. I praksis er det derfor ofte vanlig å benytte ulike parametre for avstandsfølsomhet for ulike reisemåter (λ^m). Slike gravitasjonsmodeller begynner da å nærme seg valgmodellene i både utseende og funksjon. Dette kommer vi litt tilbake til i avsnitt 4.3.

4.1.5 Nærmere om avstandsfunksjoner

I 4.1.xi) er avstandsfunksjonen som vi ser en eksponensialfunksjon. Denne type avstandsfunksjon er avtagende i hele definisjonsområdet. Eksponensialfunksjonen følger av at bibetingelsen i maksimeringsproblemet gir den aritmetriske gjennomsnittsavstanden. Hvis vi i stedet benytter det geometriske gjennomsnitt blir bibetingelsen:

$$4.1.xix) \quad \sum_{i,j} T_{ij} \ln(c_{ij}) = C$$

Dette vil gi en annen type løsning på formen:

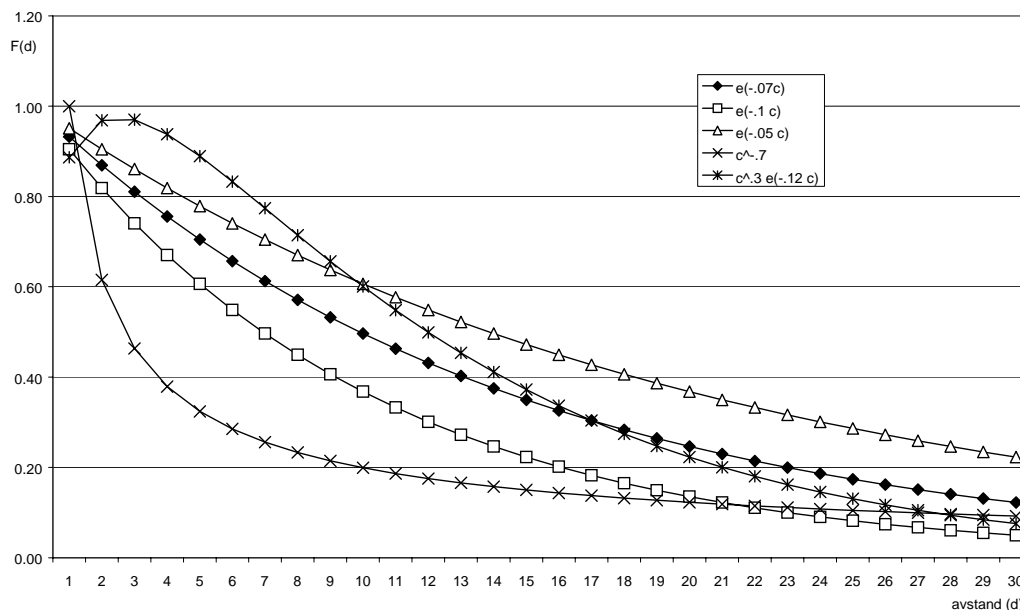
$$4.1.xx) \quad T_{ij} = \sigma_i O_i \mu_j D_j c_{ij}^{-\beta},$$

Avstandsfunksjonen her er altså en potensfunksjon. Vi kan godt også kombinere de to målene på gjennomsnitt og derav få løsninger på formen:

$$4.1.xxii) \quad T_{ij} = \sigma_i O_i \mu_j D_j c_{ij}^{-\beta} e^{(-\lambda c_{ij})}$$

Fordelen med denne type funksjon er at den ikke er avtagende i hele definisjonsområdet, men har et toppunkt som kan kalibreres inn ved å velge hensiktsmessige verdier for parameterne λ og β . Denne type funksjon har ofte vært benyttet for å fordele bilturmatriser fordi man ofte vil kunne observere at antallet helt korte bilturer er få. Figur 4.1 viser hvordan alternative avstandsfunksjoner kan gi ulik

avstandsfordeling i en turmatrise. Vi viser her intervallet 1-30 km, som kan være et aktuelt intervall i lokale modeller.



Figur 4.1: Eksempler på ulike avstandsfunksjoner i gravitasjonsmodeller

Som eksempler på typiske avstandsfunksjoner i gravitasjonsmodeller for korte reiser i byområder kan vi nevne:

- 4.1.xxii) $f(c_{ij}) = e^{(-0.07c_{ij})}$
- 4.1.xxiii) $f(c_{ij}) = e^{(-0.1c_{ij})}$
- 4.1.xxiv) $f(c_{ij}) = e^{(-0.05c_{ij})}$
- 4.1.xxv) $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-0.7}$
- 4.1.xxvi) $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-0.3} e^{(-0.07c_{ij})}$

Hvis man har data for hvordan avstandsfordelingen arter seg for turer i det området og den situasjonen man studerer vil det dermed la seg gjøre å kalibrere inn en avstandsfordeling ved å velge en dertil egnet avstandsfunksjon med tilhørende parametre.

4.2 Modeller for diskrete valg

Teorien for diskrete valg kan føres tilbake til studier knyttet til matematisk psykologi på slutten av 20-tallet. Denne teorien har etter hvert vist seg anvendbar på en rekke fagområder innen samfunnsvitenskapen. Økonomer begynte å interessere seg for teorien tidlig på 60-tallet, og da spesielt på områder knyttet til transport. I denne teorien er beslutningene til enkeltindividene eller til husholdene av interesse, i motsetning til det sentrale i de aggregerte gravitasjonsmodellene hvor massenes bevegelser var hovedfokus. Det sentrale i de transportmodeller som er etablert på denne teorien (valgmodellene) er hvorledes

beslutningsenhetene ser ut til å vektlegge forhold knyttet til de alternativer som kan velges i gitte situasjoner, som valget av reisemiddel, valget av destinasjon, valget av reisefrekvens, valget av bilhold, osv, og hvordan alternativenes ”kvaliteter” påvirker utfallet av disse valgene.

I persontransport er det bare unntaksvis at selve reisen kan betraktes som et gode i seg selv. I de fleste situasjoner kan reisen heller ses på som en aktivitet som er ”avledet” av at vi ønsker å gjennomføre en annen aktivitet på et annet sted. Slik sett kan reisen oppfattes som et ”betalingsmiddel” for å oppnå en ønsket aktivitet. Her brukes imidlertid begrepet ”betalingsmiddel” i svært vid forstand og må forstås i retning av en oppofrelse eller en egeninnsats i form av kostnader og tidsbruk. Det er nærliggende å hevde at aktiviteten på bestemmelsesstedet gir oss en viss nytte, og at reisen bare gjennomføres hvis denne nytten oppfattes som større enn oppofrelsen forbundet med reisen til bestemmelsesstedet. En person som vurderer å reise står i realiteten overfor en rekke valg som kan være svært situasjonsbestemt. Som utenforstående observatører kjenner vi ikke i hvert enkelt tilfelle til den beslutningsprosessen som gir en reise som resultat.

Gjennom en reisevaneundersøkelse, hvor et stort antall individer gjør rede for sine reiser over en viss periode ved å føre en nøyaktig turdagbok, kan vi imidlertid skaffe oss innblikk i hvilke faktorer som totalt sett ser ut til å være viktige i slike beslutningsprosesser. Vi er først og fremst interessert i hvordan individer eller befolkningskategorier generelt ser ut til å oppføre seg i gitte situasjoner. Dette kan vi altså skaffe oss til veie ved å samle inn opplysninger om hvordan et stort antall enkeltindivider faktisk reiser. En reisevaneundersøkelse er slik sett egentlig bare en oversikt over de reisene hver enkelt av respondentene har foretatt i en periode. Det ligger imidlertid informasjon om en rekke valg som respondentene har foretatt innbakt i en slik undersøkelse.

For det første må personen bestemme seg for om en reise skal gjennomføres eller ikke. Dette reflekteres i undersøkelsen gjennom antall reiser respondenter oppgir å ha gjennomført i løpet av den perioden som er angitt. For det andre må respondenter bestemme seg for hvor han vil reise og med hvilken reisemåte. Dette vil også være representert i undersøkelsen ved de adresser respondenter oppgir som målpunkt for de reiser som er rapportert og de reisemidler respondenter oppgir å ha benyttet. I tillegg vil undersøkelsen gi informasjon om kjennetegn ved respondenter.

En reisevaneundersøkelse kan altså indirekte gi oss en oversikt over de valg et utvalg av befolkningen i et område har foretatt over en viss tidsperiode. Spørsmålet blir da hva som er viktige beslutningsfaktorer i disse valgene og hvilke alternativer som er tilgjengelige. Dette kan man også skaffe seg en oversikt over gjennom undersøkelsen, ved direkte spørsmål om hvilke alternative destinasjoner og reisemidler som var tilgjengelig, hvilke kostnader og reisetider som er knyttet til disse alternativene, osv. Det er her imidlertid et spørsmål om det er hensiktsmessig å samle inn detaljert informasjon på denne måten.

Alternativmengden vil alltid være subjektivt avhengig av respondentens informasjonsbeholdning. Det er ikke sikkert at respondenter har kjennskap til alle alternativer som ikke faktisk er valgt. Det kan også være at noen av alternativene vurderes som så dårlige at respondenter ikke vil oppgi dem i sin alternativmengde. På den andre siden er det strengt tatt ikke sikkert at respondenter har

noen alternativer i gitte valgsituasjoner. Hvis man skal reise til arbeid eller besøke bestemor, har man vanligvis bare én mulig destinasjon. Vi er imidlertid i første rekke interessert i de alternativer som er tilgjengelig for et abstrakt gjennomsnitts-individ og må derfor bestemme alternativmengdene ut fra mer objektive kriterier.

Kjennetegn ved alternativene vil også være subjektive størrelser. Det er etter hvert blitt en kjent sak at vi generelt har tendenser til å undervurdere ulemper ved de alternativer vi velger og overvurdere ulemper ved ikke valgte alternativer. På denne måten kan det hevdes at vi forsøker å "rettferdiggjøre" de valgene vi foretar. Vi er imidlertid også avhengig av å skaffe til veie objektive mål på de kjennetegn som beskriver alternativene.

Det er derfor vanlig å supplere reisevaneundersøkelsene med objektive data om alternativmengder og kjennetegn tilknyttet alle alternativer. Det er vanlig å benytte nettverks- og rutevalgsmoeller til dette formålet. Dette har sine ulemper som først og fremst er knyttet til hvor detaljerte transportnettverk vi har og hvor realistisk vi klarer å beregne rutevalg og tilhørende reisetider. Som nevnt tidligere er soneinndelingen i nettverksmodellene et sentralt aspekt også her.

4.2.1 Hovedtrekk i teorien for diskrete valg

Teorien for diskrete valg tar utgangspunkt i et individ som skal velge mellom en avgrenset mengde gjensidig utelukkende valgalternativer i en bestemt situasjon. Hvert alternativ assosieres ved en rekke kjennetegn som har mer eller mindre positiv eller negativ betydning, avhengig av individets subjektive vurdering. Det forutsettes at individet velger det alternativet som etter en samlet vurdering oppfattes som det beste og at individet i denne vurderingen tar hensyn til hvor store tidsmessige og økonomiske ressurser som er til rådighet.

Som analytikere forsøker vi å kartlegge hvilke alternativer med tilhørende kjennetegn som vurderes som positivt eller negativt viktige for ulike typer individer. Vi forsøker da å etablere funksjonsmessige sammenhenger mellom kjennetegn ved individene, kjennetegnene ved alternativene og alternativenes "attraktivitet". Hvis individ "i" er karakterisert med "S" kjennetegn og alternativ "m" er assosiert med "K" kjennetegn kan en slik sammenheng skrives:

$$4.2.i) U_{im}(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{is}, k_{m1}, k_{m2}, \dots, k_{mK}), \quad m=1, \dots, M, \quad k=1, \dots, K$$

I litteraturen kalles ofte 4.2.i) for en nyttefunksjon, fordi nyttebegrepet ofte forbindes med individers preferanser. Her skal man imidlertid merke seg at dette ikke er en nyttefunksjon i tradisjonell forstand. Det er her snakk om individers preferanser over kjennetegn tilknyttet et bestemt alternativ og ikke preferanser over alle mulige alternativer. En kanskje mer passende betegnelse kan derfor være preferansefunksjon eller smaksfunksjon for et bestemt alternativ.

Som analytikere og observatører kan vi imidlertid ikke regne med at vi har kjennskap til alle mulige kjennetegn ved alle alternativer og alle individer. Man kan heller ikke regne med at forskjellige individer vurderer kjennetegnene likt. Preferansefunksjonen vil dermed ikke gjelde eksakt, og vi må innføre et feilledd i 4.2.i). Det er her grunn til å påpeke at det er vår egen uvitenhet som observatører som medfører at vi må innføre dette feilleddet. Teorien for diskrete valg forutsetter at dette feilleddet kan betraktes som stokastisk og at det har en kjent stokastisk fordeling som er uavhengig og identisk for alle alternativer:

$$4.2.ii) \quad U_{im} = V_{im} + X_{im}$$

I 4.2.ii) er preferansefunksjonen, som vi ser, splittet opp i en kjent del (V_m) og en ukjent del (X_{im}) som altså må betraktes som et stokastisk feilledd. For å illustrere denne teorien kan vi for enkelhets skyld ta utgangspunkt i en situasjon hvor vi ønsker å modellere reisemiddelvalg for arbeidsreiser i et område. Vi har gjennomført en utvalgsundersøkelse blant individer som har foretatt en arbeidsreise en bestemt dag og skaffet oss rede på hvilket reisemiddel de har valgt og hva som kjennetegner de ulike reisemidlene når det gjelder reisetider og kostnader.

La oss anta at individene har bare to valgalternativer, bil og kollektivtransport, og at det eneste som betyr noe for valgene er reisekostnad og reisetid. Vi kan da organisere data fra utvalgsundersøkelsen i en tabell tilsvarende tabell 4.3 som viser de 10 første observasjonene i datasettet. For hver observasjon er det en angivelse av hvilket alternativ som faktisk er valgt, og hvilke kjennetegn som er tilknyttet begge alternativ, også det alternativ som ikke ble valgt.

Tabell 4.3: Eksempel på datasett fra en RVU klargjort for estimering av modell for reisemiddelvalg

obs nr	bil (δ)	koll ($1-\delta$)	reisekostnad bil kr (c_b)	reisekostnad koll kr (c_k)	reisetid bil min (t_b)	reisetid koll min (t_k)
1	1	0	15	13	30	40
2	1	0	15	10	25	50
3	0	1	15	15	35	30
4	1	0	12	13	25	30
5	0	1	12	10	35	40
6	1	0	12	15	30	50
7	1	0	18	13	35	50
8	0	1	18	10	30	30
9	1	0	18	15	25	40
10	0	1	15	13	30	40
sum	6	4				

I tabellen ser vi at 6 av respondentene ($\Sigma\delta$) har valgt bil og 4 ($\Sigma(1-\delta)$) har valgt kollektivt. Det første vi må gjøre er å formulere preferansefunksjonene. Når vi skal estimere en modell basert på denne teorien, er formuleringen av preferansefunksjonene egentlig den store utfordringen. Dette er vanligvis en prosess som starter med svært enkle funksjoner, for etter hvert å benytte akkumulert statistisk informasjon fra estimeringen til å formulere modeller som stadig stemmer bedre overens med de data vi har samlet inn. I dette eksempelet kan vi la

$$4.2.iii) \quad V_b = a_{b1}c_b + a_{b2} t_b, \quad V_k = a_{k1}c_k + a_{k2} t_k$$

være den systematiske delen av preferansefunksjonene for henholdsvis bil og kollektivtransport. Vi ser at det her er to ukjente parametre (a_{m1} og a_{m2}) tilordnet henholdsvis reisetid og reisekostnad for hvert av de to alternativene. Vi har tidligere betegnet disse funksjonene som både nyttefunksjoner og preferansefunksjoner. Av 4.2.iii) ser vi at den mest dekkende betegnelsen kanskje kan hevdes å være generaliserte kostnadsfunksjoner, siden de to funksjonene simpelthen er en vektet sum av reisetid og reisekostnad. Formuleringen av disse funksjonene er imidlertid avhengig av problemstillingen og hvilken beslutningssituasjon som skal modelleres. Selv om det også i modeller for reisemiddelvalg er vanlig å inkludere flere elementer i disse funksjonene enn reisetid og reisekostnad, er det likevel nærliggende å betrakte dem som generaliserte kostnadsfunksjoner.

Vi ønsker nå å bestemme disse parametre på en slik måte at de valgene som respondentene har foretatt, indikert i tabell 4.4, blir gjenskapt. Dette kan vi finne ut når vi setter parametrene inn i preferansefunksjonene og regner ut V_m . Her skal vi huske på at hver respondent forutsettes å velge det alternativet som er best, dvs at hvis V_b er størst, så velges bil, i motsatt fall velges kollektivt. Siden vi har forutsatt at preferansefunksjonene har et stokastisk ledd, vil vi imidlertid ikke klare å gjenskape valgene eksakt, men estimeringen sørger for at parametrene blir slik at reisemiddelfordelingen totalt sett (60 - 40 prosent) blir gjenskapt av modellen.

Det beste vi kan håpe på er derfor å bestemme sannsynligheter for at det ene eller det andre alternativet skal bli valgt. La oss kalle disse valgsannsynlighetene for P_{mi} , hvor fotskriften "i" indikerer hvilket individ det er snakk om (jfr tabell 4.4). I tabellen vil det slik kunne tilordnes 20 sannsynligheter på en slik måte at sannsynligheten for å velge det ene eller det andre alternativet for hvert individ summerer seg til 1 ($P_{bi} + P_{ki} = 1$). Sannsynligheten for at respondent nr 1 i tabellen skal velge det alternativet som faktisk er valgt, kan skrives:

$$4.2.iv) \quad (P_{b1})^{\delta_1} (P_{k1})^{(1-\delta_1)}$$

Som vi ser, har respondent nr 1 i tabellen valgt bil, dvs $\delta_1=1$. Siden $(P_{k1})^0 = 1$, vil 4.2.iv) dermed være lik sannsynligheten for at bil blir valgt (P_{b1}). Fra individets synspunkt vil sannsynligheten for å velge bil være lik 1. Vi er imidlertid interessert i å etablere en modell som også tar hensyn til valgene til alle de andre individene i undersøkelsen. Hvis vi multipliserer sammen tilsvarende uttrykk for alle respondenter i tabellen, får vi

$$4.2.v) \quad L = (P_{b1})^{\delta_1} (P_{k1})^{(1-\delta_1)} (P_{b2})^{\delta_2} (P_{k2})^{(1-\delta_2)} \dots \dots \dots (P_{b10})^{\delta_{10}} (P_{k10})^{(1-\delta_{10})}$$

som simpelthen uttrykker sannsynligheten for at hver respondent i tabellen velger det alternativet som faktisk ble valgt på den aktuelle reisen. Vi er nå selvfølgelig

interessert i en modell som gjør denne sannsynligheten størst mulig. Ved å maksimere dette uttrykket, vil vi oppnå nettopp det. Derfor kalles også estimeringsmetoden for ”*maximum likelihood*”. Spørsmålet nå blir hvordan vi skal beregne disse sannsynlighetene.

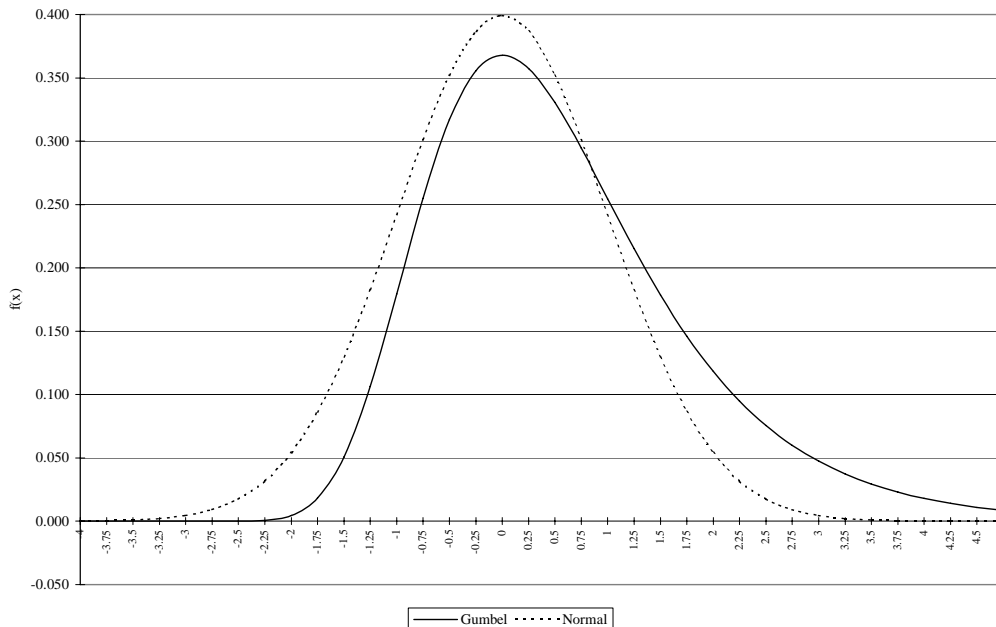
For å finne ut dette, må vi gå tilbake til de stokastiske preferansefunksjonene. Forutsetningsvis velger individene det alternativet som de subjektivt anser som det beste. Dette innebærer at respondent ”i” vil velge alternativ ”b” hvis og bare hvis U_{bi} er større enn U_{ki} . For vårt eksempel kan dette formuleres på følgende måte:

$$4.2.vi) \quad P_{bi} = \Pr[U_{bi} > U_{ki}] = \Pr[V_{bi} + V_{ki} > X_{bi} + X_{ki}]$$

Valgsannsynlighetene vil dermed avhenge av den stokastiske fordelingen til feil-leddene. Fordelingsfunksjoner er ofte kompliserte uttrykk. Valgsannsynlighetene kan dermed bli svært kompliserte uttrykk å regne på. Det er imidlertid en spesiell fordeling som gjør at valgsannsynlighetene blir relativt enkle uttrykk å arbeide med. Denne fordelingen kalles ”Gumbel-fordelingen” og den har fordelingsfunksjonen

$$4.2.vii) \quad F(x) = \exp(-e^{-b(x-a)})$$

hvor a og b er såkalte fordelingsparametre. Parameteren a i denne funksjonen angir plasseringen av fordelings ”toppunkt”, og parameteren b angir fordelings spredning. I figur 4.2 sammenliknes Gumbel-fordelingen, $G \sim (0,1)$, med Normalfordelingen $N \sim (0,1)$. Det fremgår tydelig fremgår at Gumbel-fordelingen er skjev med hale mot høyre, slik at forventningsverdien er plassert til høyre for den verdien som gir fordelings toppunkt.



Figur 4.2: Sannsynlighetstetthet for Gumbel- og Normalfordelingen

Gumbel-fordelingens spesielle egenskaper (se vedlegg 2) gjør den svært populær innenfor bruk av denne teorien i empiriske arbeider. Det er denne fordelingen som gir de såkalte logitmodellene, mens bruk av normalfordelingen gir såkalte probitmodeller, som er vesentlig vanskeligere både å estimere og å bruke i praksis. Andre statistiske fordelinger er også blitt benyttet, men ingen med så stor suksess som Gumbel-fordelingen. I vårt tilfelle med bare to valgalternativer kan logitmodellen skrives:

$$4.2.viii) \quad P_b = e^{V_b}/(e^{V_b}+e^{V_k}) \quad P_k = e^{V_k}/(e^{V_b}+e^{V_k}) = 1-P_b$$

hvor V_b og V_k er vist i 4.2.iii). Valgsannsynlighetene er altså funksjoner som inneholder parametre eller preferansefaktorer og kjennetegn knyttet til alle alternativer. I estimeringen fastsettes de verdier på parametrene i preferansefunksjonene som gir størst sannsynlighet for at valgene i datagrunnlaget gjenskapes, gitt de kjennetegnene som er inkludert som variable. Det finnes et stort antall programpakker som har de nødvendige algoritmer for å finne den løsningen som gir disse parameterverdiene. I disse programpakkenes kan man formulere vesentlig med kompliserte valgsituasjoner og preferansefunksjoner enn de vi har benyttet i dette eksempelet.

Det er grunn til å påpeke at den modellen vi har sett på i vårt eksempel bare gir sannsynligheter knyttet til valgalternativene ($P_{ij}^m = P(m)$), og ikke antall turer for hvert alternativ (T_{ij}^m), slik gravitasjonsmodellen gjør. En modell for valg av reisemiddel basert på denne metodikken kan dermed ikke benyttes som etterspørselsmodell alene, men forutsetter at vi enten har en turmatrise fra før, eller at vi også har modeller som gir en slik turmatrise. Slike modeller kan med fordel også estimeres på data fra en reisevaneundersøkelse.

4.2.2 Et mål på tilgjengelighet - Logsummen

Gumbel-fordelingens spesielle egenskaper gjør det mulig å formulere et mål på "forventet nytte", eller samlede generaliserte kostnader, av de alternativer som er tilgjengelige. Hvis vi viderefører vårt eksempel, kan dette målet noe forenklet skrives:

$$4.2.ix) \quad E(U^{\max}) = \ln(e^{V_b} + e^{V_k})$$

Dette uttrykket kalles i litteraturen for en *logsum*, av åpenbare årsaker. Hvis vi betrakter V_b og V_k som generaliserte kostnadsfunksjoner, har 4.2.ix) den egenskapen at den generaliserte kostnaden representert ved logsummen knyttet til de to valgalternativene er lavere enn den laveste av de to generaliserte kostnadene isolert. Bare det at individet har alternativer å velge mellom gjør situasjonen bedre enn hvis bare ett alternativ er tilgjengelig. Slik sett kan 4.2.ix) hevdes å være et samlet mål på tilgjengelighet i den situasjonen valget gjennomføres under, i vårt tilfelle valget mellom bil og kollektivtransport for en bestemt reise.

4.2.3 Modeller for valg av reisemiddel og destinasjon

I eksemplet etablerte vi relativt enkle preferansefunksjoner for beskrivelse av kjennetegn knyttet til bil- og kollektivalternativet. Vanligvis vil disse funksjonene inneholde vesentlig flere elementer enn bare reisetid og kostnad. I noen tilfeller

kan det også være aktuelt å inkludere kjennetegn tilknyttet individene i disse funksjonene. Dette kan være slik at ulike befolkningskategorier, eller segmenter, ser ut til å ha ulike sannsynligheter for å velge spesielle transportmidler. Det kan også være at ulike befolkningssegmenter har ulike preferanser for enkelte kjennetegn. Det kan da være aktuelt å estimere egne parametre for eksempel for reisetid for hvert segment. Typiske preferansefunksjoner for reisemiddelvalg kan blant annet inneholde elementer som:

Bil:	Kollektivtransport:
<ul style="list-style-type: none"> • avstandsavhengig kostnad • bompenger • parkeringskostnad • fergekostnad • kjøretid • ventetid på ferge 	<ul style="list-style-type: none"> • gangtid (tilbringetid) • ventetid • kjøretid • omstigning • reisekostnad

I tillegg kan man altså spesifisere variable som angir at ulike befolkningssegmenter vurderer ulike reisekomponenter forskjellig. Vi ser imidlertid at det er svært nærliggende å kalle preferansefunksjonene for funksjoner for generaliserte kostnader.

I vårt enkle eksempel er det bare to alternativer å velge mellom. I de fleste tilfeller vil imidlertid individene ha flere mulige valgbare alternativer. I slike situasjoner må vi over på den litt mer avanserte multinomiske logitmodellen. Det kan også være at ulike alternativer har ulike uobserverte forhold knyttet til seg. Hvis dette er tilfelle, kan man ikke forvente at det stokastiske restleddet i 4.2.ii) er identisk fordelt mellom alternativene.

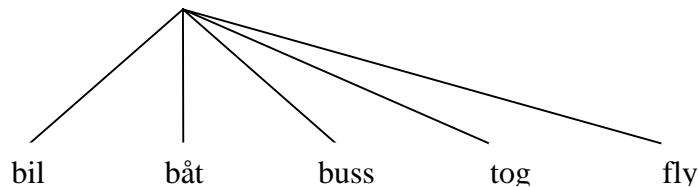
Dette kan illustreres med et par eksempler på problemstillinger knyttet til lange reiser. Her kan det for eksempel være slik at mange velger bil fordi bilen skal brukes på bestemmelsesstedet, eller at mange velger å reise med fly fordi man da slipper å overnatte og muligens også sparer penger til måltider underveis på reisen. Dette kan være forhold som vi ikke har observert eller spurt om i vår reisevaneundersøkelse. Vi kan undersøke om slike forhold ligger innbakt i våre data ved å teste ulike modellstrukturer for eksempel som illustrert i figur 4.3.

Figur 4.3.a viser en vanlig multinomisk modellstruktur. Figur 4.3.b viser en strukturert modellform hvor det tas hensyn til spesielle uobserverte forhold tilknyttet bilalternativet. Figur 4.3.c viser en strukturert modellform hvor det både tas hensyn til at det er uobserverte forhold tilknyttet bilalternativet og flyalternativet. Det er til syvende og sist valgene og data tilknyttet valgalternativene som ligger i reisevaneundersøkelsen som bestemmer hvilken modellstruktur man ender opp med.

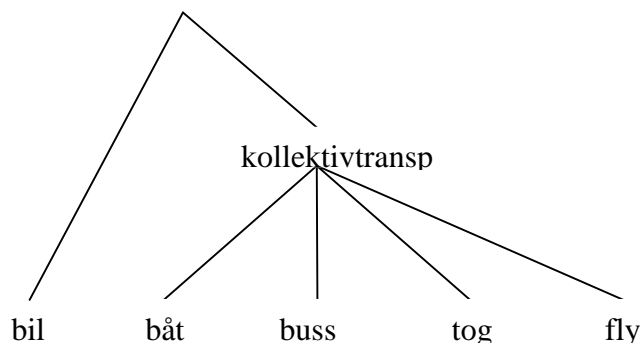
I andre situasjoner kan flere elementer i valgmengden i realiteten være ukjent enten fordi vi rett og slett ikke kjenner de sanne alternativer, eller fordi vi ikke har tilstrekkelig detaljerte data som beskriver dem. Når det for eksempel gjelder valg av destinasjon for handleriser, er det ikke sikkert at vi kjenner til om den sanne destinasjon var en butikk, et varehus eller en kombinasjon av flere forretninger. Det vi kjenner til i slike tilfeller er vanligvis forekomsten av salgsareal i målpunktsonen eller andre aggregerte størrelser som beskriver handlemulighetene i

sonen. Det finnes en metodikk for hvordan slik aggregert informasjon kan benyttes til å slå sammen flere alternativer opp til ett enkelt alternativ. Aggregerte variabler kan benyttes som såkalte *size*-variabler, hvor man tar logaritmen til forekomsten av den aktuelle størrelsen. Eventuelt kan det lages en lineær funksjon med flere slike aggregerte størrelser.

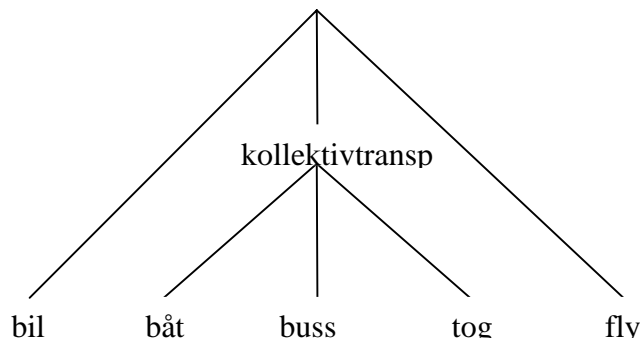
Figur 4.3.a Multinomisk logit



Figur 4.3.b Strukturert logit I



Figur 4.3.c Strukturert logit II



Hvis valgmengden er ekstremt stor, kan estimeringen av nyttefunksjonene bli problematisk. Det finnes imidlertid en metodikk som innebærer at man trekker et utvalg av alternativene og estimerer modeller på dette utvalget. Kort sagt kan dette gjennomføres ved å spesifisere et ekstra ledd i samtlige av de trukne alternativenes preferansefunksjoner. Dette additive leddet angir logaritmen til sannsynligheten for at alternativet ble trukket. Denne metodikken reduserer beregningene knyttet til estimeringen betraktelig samtidig som at estimatene likevel blir konsistente.

Estimering av modeller for valg av destinasjon byr på litt større problemer enn estimering av modeller for valg av reisemiddel. Nå man skal lage en transport-

modell basert på teorien for diskrete valg, bør reisemiddel og destinasjonsvalget estimeres simultant, noe som gir en mye bedre utnyttelse av reisevanedata enn en sekvensiell estimeringsprosedyre. Over ble det pekt på to forhold som gjør seg gjeldende spesielt for modellering av destinasjonsvalg. Det ene er aggregering av alternativer og det andre er estimering på et utvalg alternativer.

Aggregering er i denne sammenheng knyttet til å slå sammen alternative destinasjoner innenfor hver sone til en eller flere variable som beskriver sonens attraktivitet. En hensiktsmessig aggregering vil slik sett avhenge av formålet med reisen. Det vil også være et spørsmål om hvilke data som er tilgjengelig fra ulike kilder. Tabell 4.4 gir en oversikt over aktuelle aggregerte variable i modeller for valg av destinasjon, avhengig av formålet med reisene.

Slike aggregerte størrelser kan legges inn i preferansefunksjonene for hver aggregerte alternative destinasjon. Hvis vi har spesifisert "r" i slike aggregerte variable, kan en slik *size*-funksjon skrives:

$$4.2.x) \quad Z_j = \ln (S_{j1} + z_2 S_{j2} + \dots + z_r S_{jr})$$

hvor z-ene er ukjente parametre som estimeres sammen med de andre parametrene i preferansefunksjonene.

Tabell 4.4: Aktuelle aggregerte variable i modeller for valg av destinasjon etter reisemål

Fritidsreiser	Arbeidsreiser	Tjenestereiser	Innkjøpsreiser	Private reiser
km ² park-/utmarkareal	arbeidsplasser fordelt på næringer	antall hotellsenger	m ² salgsareal dagligvarer	m ² areal for servicefunksjoner
antall hytter/fritidsboliger	parkeringsplasser	arbeidsplasser fordelt på næringer	m ² salgsareal annen type handel	antall arbeidsplasser i servicenæringen
m ² areal restaurant/underholdningsbransjen	m ² næringsareal	m ² areal for utstilling/messe	m ² salgsareal kjøpesenter	
antall hotellsenger		m ² næringsareal	antall arbeidsplasser i handelsnæringen	

I praksis kan individene ha et uendelig antall alternative reisemål for en reise. Ved hjelp av den metodikken som er beskrevet over, kan vi aggregere disse opp til et mer håndterbart antall, tilsvarende det antallet soner vi har med i modellen. I de fleste tilfeller vil imidlertid også dette være et større antall alternativer det enn vi har muligheter til å spesifisere i en modell. Løsningen på dette problemet er for hver observasjon i datasettet å trekke, enten tilfeldig eller basert på en spesiell utvalgsstrategi, et begrenset antall destinasjoner og benytte disse som alternativer til den destinasjonen som faktisk er valgt. For hver observasjon kan man da for eksempel operere med mellom 10 og 20 alternative destinasjoner. Man må imidlertid da spesifisere et ekstra ledd i preferansefunksjonen, logaritmen til sannsynligheten for at destinasjonen blir trukket, som korrigerer for den skjevhet som innføres ved at modellen estimeres på et utvalg av alle alternativene som er tilgjengelig.

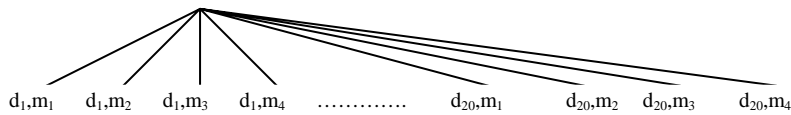
Det er vanlig å estimere modeller for reisemiddelvalg og destinasjonsvalg simultant. Dette gjøres for å hente mest mulig informasjon ut av de data vi har i reisevane-

undersøkelsen. Sett for eksempel at vi skal estimere en modell med fire alternative reisemåter og har trukket 20 alternative destinasjoner for hver observasjon. Sekvensiell estimering vil i dette tilfellet innebære at vi først estimerer en reise-middelvalgmodell med fire alternative reisemåter og så en destinasjonsvalgmodell med 20 alternative destinasjoner. Simultan estimering vil innebære at vi estimerer én modell med $4 \times 20 = 80$ alternative kombinasjoner av reisemidler og destinasjoner. Dette betyr at vi vil utnytte variasjonen i data bedre og i større grad ta hensyn til at spesielle reisemidler ofte kan være foretrukket til spesielle destinasjoner.

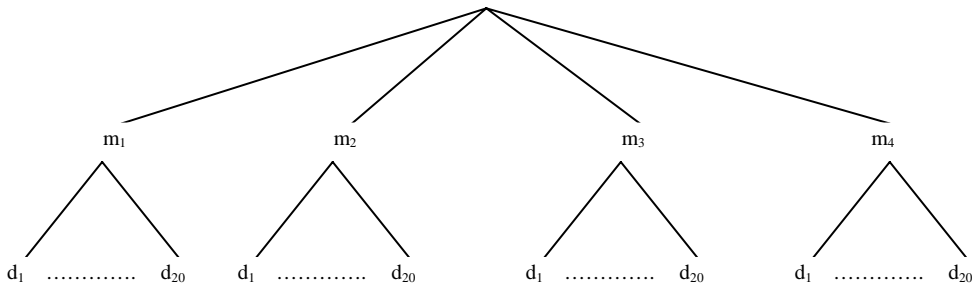
Uansett hvilken estimeringsmåte som velges, spiller logsummen (jfr avsnitt 4.2.2) en sentral rolle som en slags kobling mellom de to valgsituasjonene. Preferansene for kjennetegnene for eksempel knyttet til reisemiddelvalget skal også være med som forklaringsfaktorer i destinasjonsvalget. I tilfellet med sekvensiell estimering beregnes logsummen (tilgjengelighetsmålet) fra reisemiddelvalget for hver destinasjon og denne inkluderes som en variabel med en spesiell tilhørende logsumparameter i preferansefunksjonene for valg av destinasjon. I tilfellet med simultan estimering vil preferansefunksjonene både inneholde variabler som beskriver reisemidlene og variable som beskriver destinasjonen.

Når simultane modeller for valg av reisemiddel og destinasjon skal estimeres, vil det også være et spørsmål om modellstruktur. I figur 4.4 vises de tre alternative modellstrukturer som vanligvis kan vurderes for eksempel i vårt eksempel med 4 reisemidler og 20 destinasjoner.

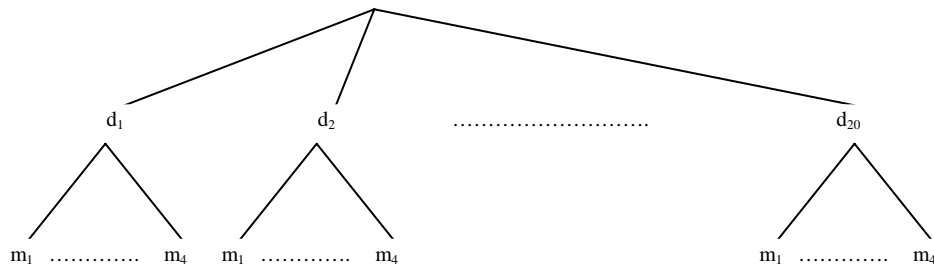
Figur 4.4.a Multinomisk simultan logit



Figur 4.4.b Strukturert simultan logit med reisemiddelvalget øverst



Figur 4.4.c Strukturert simultan logit med destinasjonsvalget øverst



I de to siste tilfellene vil de to nivåene være koblet sammen ved hjelp av logsummen som da vil være tilknyttet en spesiell parameter. Størrelsen på denne parameteren vil være avgjørende for valg av modellstruktur. Hvis logsumparameteren for eksempel for modellen 4.4.c ikke er signifikant forskjellig fra 1, velges modellstruktur 4.4.a, hvis den er signifikant større enn 1, velges modellstruktur 4.8.b, og hvis den er signifikant lavere enn 1, beholdes modellstruktur 4.4.c. En tommelfingerregel i denne sammenhengen er å starte med en modellstruktur hvor det valget man tror man kan forklare best, ut fra de data man har, legges på det laveste nivået. En av årsakene til dette er at eventuelle målefeil og feil som skyldes aggregering av data blir brakt med videre opp i modellstrukturen.

De modellstrukturene som er vist i figur 4.4 bygger på følgende antakelser om preferansefunksjonene:

$$4.2.xi) \quad U_{dm} = V_d + V_m + V_{dm} + X_{dm}$$

$$4.2.xii) \quad U_{dm} = V_d + V_m + V_{dm} + X_d + X_{dm}$$

$$4.2.xiii) \quad U_{dm} = V_m + V_d + V_{dm} + X_m + X_{dm}$$

I alle tilfellene er den systematiske delen av preferansefunksjonene inndelt i tre, en del som er felles for alle alternativer som benytter destinasjon "d", en del som er felles for alle alternativer som benytter reisemåte "m" og en rest som er spesifikk for kombinasjonen "d,m". Forskjellene mellom de tre preferansefunksjonene er antakelsen om den stokastiske delen av den. I det første tilfellet a) er det antatt at restleddet er uavhengig identisk fordelt over både reisemidler og destinasjoner. I de to andre tilfellene b) og c), er variansen forskjellig i reisemiddelvalget og i destinasjonsvalget. Disse to nivåene må derfor skilles, og logsumparameteren kan betraktes som en skalering av den delen av preferansefunksjonene som representerer det laveste nivået.

Modellene for valg av reisemiddel og destinasjon vil, uavhengig av hvilken estimeringsprosedyre som er benyttet, gi sannsynligheter for å velge ulike kombinasjoner av reisemidler og destinasjoner ($P(dm) = P(m) P(d|m)$). For å bestemme antallet reiser med ulike reisemidler til ulike destinasjoner, må vi videre vite hvor mange som faktisk velger å reise.

4.2.4 Modeller for valg av reisefrekvens

Variasjoner i reisefrekvens mellom individer er først og fremst knyttet til kjennetegn ved individene, men også til hvor tilgjengelig ulike reisemål fremstår eller oppfattes. I en reisevaneundersøkelse har vi vanligvis opplysninger for et antall ulike (ofte også like) reiser som respondentene har foretatt over en viss tidsperiode. Vi har altså opplysninger for hvor mange reiser respondentene har valgt å gjennomføre i løpet av en kjent periode. Det er her litt ulike fremgangsmåter som kan gjøre slike data brukbare til estimering av valgmodeller.

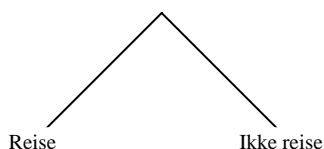
- En aggregert tilnæringsmåte hvor andeler benyttes som høyresidevariable i stedet for 0/1 variable (jfr tabell 4.1). Metoden forutsetter at man kan dele den kjente observasjonsperioden inn i sub-perioder. Sett for eksempel at vi har data for antall lange reiser som er gjennomført i løpet av en måned. For hver observasjon kan vi da finne gjennomsnittlig antall turer som respondenten har

valgt å foreta pr dag ved (antall reiser/30). Alternativet blir i en slik situasjon $(1 - (\text{antall reiser}/30))$.

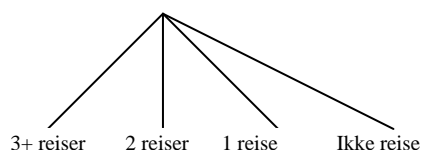
- En disaggregert tilnæringsmåte hvor datamaterialet vektet med det antall dager respondentene har reist/ikke reist. Respondenter som ikke har reist får da verdien 0 som høyresidevariabel, og denne observasjonen vektet med det antall sub-perioder perioden er delt inn i. Respondenter som har reist får verdien 1 som høyresidevariabel vektet med antall reiser som er gjennomført for alternativet ”å reise” og 0 som høyresidevariabel vektet med antall reiser minus antall sub-perioder for alternativet ”ikke reise”.
- En disaggregert tilnæringsmåte hvor hver enkelt reise regnes som en observasjon. Datamaterialet organiseres da ved å sette opp én observasjon for hver reise respondenten har gjennomført, samt én observasjon for alternativet ”ikke reise”. Respondenter som ikke har reist settes opp som én observasjon med alternativet ”ikke reist”.

De to første fremgangsmåtene benyttes vanligvis ved infrekvente reiser, mens den siste ofte benyttes i frekvensmodeller for mer frekvente reiser. Hvilken av disse som er hensiktsmessig å benytte vil avhenge av tidshorisonten på den perioden som skal modelleres. Den valgsituasjonen som fremgangsmåtene 1), 2) og 3) bygger på kan illustreres ved figur 4.5.a. Disse vil gi binomiske modeller som angir sannsynligheten for at et individ velger å foreta en reise i den perioden som modelleres. Andre fremgangsmåter kan gi en multinomisk modellstruktur som angir sannsynligheten for å foreta en eller flere reiser i perioden som illustrert i figur 4.5.b.

Figur 4.5.a Binomisk modellstruktur for frekvensmodeller



Figur 4.5.b Multinomisk modellstruktur for frekvensmodeller



Preferansefunksjonene i denne type modeller vil vanligvis være formulert med sosioøkonomiske kjennetegn tilknyttet individene eller husholdene. I tillegg har man med egne logsumvariable som på dette nivået sier noe om individets tilgjengelighet til ulike destinasjoner, og hvor attraktive mulige destinasjoner fremstår. I disse variablene inngår også logsummen fra reisemiddelvalgmodellene. Det kan også spesifiseres aggregerte variable som karakteriserer respondentens bostedssone. Av aktuelle variable i preferansefunksjonene i tillegg til logsummen kan nevnes:

Personlige kjennetegn:

- kjønn
- aldersgruppe
- inntektsnivå
- yrkesdeltakelse
- husholdskaraktetika:
- størrelse og struktur
- bilhold

Sonekarakteristika:

- befolkningstetthet
- arbeidsplassstetthet
- indikatorer for urbanisering og sentralitet

4.2.5 Aggregering og implementering av disaggregerte modeller

Gravitasjonsmodellene gir antall turer mellom sonene, eventuelt fordelt på reisemidler, direkte. Valgmodellene er estimert på individ eller husholdsdata og gjelder strengt tatt for et abstrakt individ som eventuelt representerer en gitt befolkningsgruppe. På samme måte som gravitasjonsmodellenes inndeling på ulike befolkningskategorier kan imidlertid valgmodellene estimeres forskjellig for ulike befolkningssegmenter som ikke kan antas å vurdere de kjennetegnene som er tilknyttet alternativene tilstrekkelig likt. Valgmodellene gir som nevnt sannsynligheter knyttet til valgalternativer og ikke antall turer direkte. I stedet for T_{ij}^m , vil vi med valgmodellene få et resultat for reiser mellom sone "i" og "j" med reisemåte "m" på formen:

$$4.2.xiv) \quad P(rdm) = P(r|dm)P(d|m)P(m)$$

Dette uttrykket angir sannsynligheten for å gjennomføre en reise "r" til en bestemt destinasjon "d" med et bestemt reisemiddel "m". Første ledd representerer sannsynligheten for å reise betinget av at et bestemt målpunkt og et bestemt reisemiddel blir valgt. Andre ledd representerer sannsynligheten for å reise til et bestemt målpunkt betinget av at et bestemt reisemiddel blir valgt, mens det siste leddet er sannsynligheten for å reise med et bestemt reisemiddel.

La oss for eksempel anta sannsynligheter for de tre leddene i 4.2.xiv) på henholdsvis 0,5, 0,1 og 0,4. Sannsynligheten for å gjennomføre en reise er altså 50 prosent, sannsynligheten for å reise til én bestemt destinasjon er 10 prosent, og sannsynligheten for å reise med et bestemt reisemiddel er 40 prosent. Hele uttrykket blir dermed 0,02 dvs 2 prosent. Hvis modellen 4.4.i) er representativ for 1000 mennesker, betyr dette at 500 av dem predikeres å reise, av disse reiser 50 til destinasjon "d" og av disse igjen 20 med reisemiddel "m". Dette betyr at $T_{ij}^m = 20$ reiser. Valgmodellene estimeres altså på et utvalg av befolkningen, men når vi skal benytte dem, må vi legge hele populasjonen til grunn. Dette innebærer at valgmodellene i siste instans benyttes på aggregerte data for og mellom sonene, på samme måte som gravitasjonsmodellene.

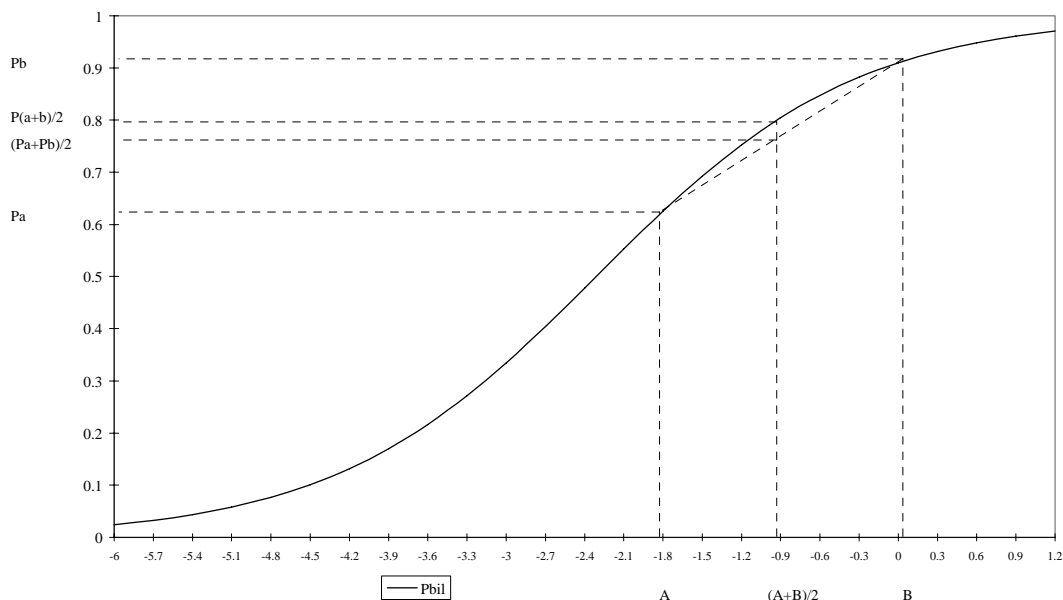
Aggregeringen fra individnivå til sonestørrelser er imidlertid ikke problemfri. Forskjellige personer som står overfor de samme alternative reisemiddelvalg vil i praksis generelt ha forskjellig nytte av de ulike alternativene. Dette skyldes at karakteristika knyttet til hvert alternativ (gangtid, kostnader med mer) varierer over personer og at karakteristika knyttet til hver person varierer (kjønn, alder, inntekt mm). Det er ikke alltid at vi makter å fange opp denne variasjonen når vi

estimerer denne type modeller. I estimeringen er det for eksempel vanlig å koble transportkvalitetsdata fra nettverksmodeller til individbaserte RVU-data. Alle individer som reiser på en bestemt sonerelasjon blir da koblet til identiske transportkvalitetsdata, selv om det i virkeligheten kan være store variasjoner i disse, avhengig av for eksempel hvor individenes bopel og arbeidsplass er lokalisert i start- og målsone.

I modellsammenheng er vi som oftest interessert i gjennomsnittlige sannsynligheter og effekter, heller enn hvordan hver enkelt person reagerer på ulike tiltak. Den mest korrekte måten å gjennomføre dette på er å summere sannsynlighetene, vektet med utvalgsbrøken, for hver enkelt person. Et enkelt eksempel illustrerer dette.

Sett at vi har to personer A og B som kan velge mellom bil, kollektivt og Park & Ride som reisemiddel på sin arbeidsreise. Begge bor og arbeider i samme sone. Person A har middels inntekt, lav alder og bor i nærheten av et kollektivknutepunkt som betjenes av en kollektivrute som har stoppested rett ved hennes arbeidsplass. Person B har høy inntekt, er middelaldrende, og han er lokalisert relativt perifert i forhold til kollektivbetjening både ved bopel og arbeidsplass. Resultatet av dette er at A og B har forskjellig nytte og dermed forskjellig sannsynlighet for å velge bilalternativet på sin arbeidsreise.

Figur 4.6 viser personenes nytte og tilhørende valgsannsynlighet for bilalternativet. Vi ser at beregnede sannsynligheter for valg av bil for de to personene A og B er henholdsvis 63 prosent og 91 prosent. Vi ser videre at sannsynligheten for valg av bil ved den gjennomsnittlige nytten er ca 80 prosent, mens den gjennomsnittlige sannsynligheten er $(63/2 + 91/2) = 77$ prosent. I dette tilfellet gir altså beregninger på et gjennomsnittlig individ høyere sannsynlighet for at bilalternativet blir valgt.



Figur 4.6: Gjennomsnittlig sannsynlighet og sannsynlighet ved gjennomsnittet

Når det gjelder effekter av forandringer i nytte (for eksempel ved ulike transporttiltak), ser vi at stigningen for kurven i diagrammet er avtakende i hele det aktuelle intervallet. En gjennomsnittlig betraktning vil i dette eksemplet ikke medføre store feil på responsen, fordi stigningstallet ved gjennomsnittet er tilnærmet lik det gjennomsnittlige stigningstallet. Hadde imidlertid nytten for person A vært lavere, for eksempel ved en nyttescore på -4,8, slik at den gjennomsnittlige nytten hadde vært om lag -2,4, ser vi at responsen (stigningstallet) ved gjennomsnittet hadde vært langt større enn den gjennomsnittlige responsen. I dette tilfellet ville modellen gitt for stor respons.

Det er ikke uvanlig at man estimerer for eksempel en logitmodell for reisemiddelvalg på individdata og deretter benytter modellen på aggregerte data. Da må man som oftest kalibrere modellen (dvs justere modellens alternativspesifikke konstanter) for å treffe observerte markedsandeler i en utgangssituasjon. Det vil fremdeles være slik at modellen anvendt på aggregerte data kan over- eller underpredikere effektene av et tiltak. Dette kan, som eksemplet over viser, bare unngås hvis man segmenterer datamaterialet og heller benytter gjennomsnittlige sannsynligheter enn sannsynligheter for gjennomsnittet.

4.2.6 Preferansefunksjoner eller avstandsfunksjoner

Selv om de aggregerte og de disaggregerte modellene etableres med til dels svært forskjellig utgangspunkt, viser det seg ved nærmere granskning at de under visse forutsetninger er svært like i funksjon. Studerer vi for eksempel resultatet fra den aggregerte modellen for fordeling av trafikk på sonerelasjoner og reisemidler (4.1.xviii over), vil vi se at vi kan utlede et uttrykk for andelen reiser mellom sone "i" og sone "j" for eksempel med reisemåte "m1":

$$4.2.xv) \quad P_{ij}^{m1} = T_{ij}^{m1} / \sum_m T_{ij}^m = e^{(-\lambda c_{ij}^{m1})} / \sum_m e^{(-\lambda c_{ij}^m)}$$

hvor vi har utnyttet at $T_{ij} = \sum_m T_{ij}^m$. Dette uttrykket, har som vi ser, interessante likhetstrekk med tilsvarende uttrykk i disaggregerte valgmodeller (se for eksempel 4.2.viii over). Hvis vi setter $-\lambda c_{ij}^m = V_m$, gir faktisk gravitasjonsmodellen og logitmodellen identiske andeler.

I estimeringen av preferansefunksjoner i en logitmodell vil vi imidlertid sjelden oppleve at preferansefunksjonene for de ulike reisemåtene blir identiske. Dette skyldes at det vanligvis er store forskjeller i egenskaper ved de ulike reisemåtene, spesielt privatbil og kollektivtransport. Her ligger også en av fordelene ved de disaggregerte modellene i forhold til de aggregerte modellene. Denne tilnæringsmåten tillater en mye mer nyansert og realistisk behandling av forskjeller mellom reisemåter. Med denne type modeller vil vi gjennom estimeringen kunne fange opp trafikantenes preferanser på en mer realistisk måte. Dette kommer til uttrykk gjennom det faktum at en preferansefunksjon V_m vil være en funksjon av ulike variable som er tilknyttet estimerbare parametre, mens gravitasjonsmodellen i dette tilfellet vil basere fordelingen på reiseavstand og på reisemåter på en eneste parameter "λ". Derfor har man i dag stort sett også gått bort fra bruk av gravitasjonsmodeller for reisemiddelvalg.

4.3 Noen praktiske sider ved metoder og modeller

Mange av de sterke og svake sidene ved de aggregerte og de disaggregerte modellene er allerede diskutert i kapitlene 2.4, 4.1 og 4.2. Begge de to metodene handler egentlig i første instans om å beregne sannsynlige OD-matriser for det området vi studerer for ulike reisemåter (og eventuelt også ulike tidsperioder), og i neste omgang å beregne tilsvarende OD-matriser for en situasjon etter at et samferdselstiltak er gjennomført. Vårt ønske er selvsagt at den modellen vi benytter skal gi realistiske resultater for begge disse to oppgavene.

4.3.1 Sterke og svake sider ved aggregert og disaggregert modellkonsept

I gravitasjonsmetodikken etablerer vi modeller basert på aggregerte observasjoner, enten for ulike trafikantkategorier, eller gjennomsnittsbetraktninger på sonenivå. Metodikken kan hevdes å være deskriptiv, ”trafikken mellom to soner er proporsjonal med de to soners innhold og omvendt proporsjonal med friksjonen mellom dem”, og det gjøres ingen forsøk på å finne årsakssammenhenger. Vi maksimerer en entropifunksjon under bibetingelser og finner den mest sannsynlige OD-matrisen som oppfyller betingelsene. Man søker ikke å forklare hvilke sammenhenger som gjelder på mikronivå og som fører til at den mest sannsynlige matrisen etableres. Dette strider mot tankegangen bak metoden. Slike sammenhenger ville gjort det mulig å formulere hypoteser som kunne vært utnyttet i modellformuleringen.

I metodikken for diskrete valg etablere vi modeller basert på observasjoner av enkeltindivider. Metodikken kan hevdes å være kausal, fordi man søker å forklare individuell atferd. Hovedfokus er hvilke faktorer som påvirker individers beslutninger i transportsystemet, og på hvilke måter. Synliggjøring av denne årsaks-virkningssammenhengen er ofte fremhevet som en stor fordel med denne type modeller. Selv om disse modellene ofte implementeres og benyttes på aggregerte data, vil denne type sammenhenger fortsatt være til stede.

4.3.2 Estimering og kalibrering

I litteraturen benyttes begrepene kalibrering og estimering litt om hverandre. Det kan innledningsvis i dette avsnittet derfor være på sin plass å klargjøre hva som ligger i de to begrepene. Med estimering menes strengt tatt å benytte en statistisk metode (for eksempel minste kvadraters metode eller maksimum likelihood) til å anslå ukjente parametre. Det vil dermed være en statistisk usikkerhet knyttet til disse parametre som avspeiles i forventningsverdiens standardavvik og varians. Begrepet estimering benyttes imidlertid ofte på en rekke andre numeriske beregningsmetoder (jfr estimering av OD-matriser, estimering av balanseringsfaktorer), selv om resultatene fra disse metodene ikke kan tilknyttes statistiske mål på standardavvik og varians. Kalibrering er en mer heuristisk metode for å justere parametre slik at modellene stemmer overens med observerte tilstander (jfr kalibrering av parametre i avstandsfunksjoner med mer).

Slik sett kan vi nå hevde at modellene for turgenerering og turattrahering som inngår i gravitasjonsmodellene vanligvis estimeres. Turfordelingen skjer imidlertid som et numerisk optimeringsproblem. Hvis vi benytter en vid

definisjon av begrepet estimering kan, vi hevde at balanseringsfaktorene (A_i og B_i) estimeres, men disse er egentlig Lagrange-multiplikatorer tilknyttet bibetingelsene for kolonne- og rekkesummene som OD-matrisen skal oppfylle. Parameteren for avstandsfølsomhet (λ) kalibreres slik at avstandsfordelingen i turmatrisen stemmer overens med en kjent avstandsfordeling i det området som studeres.

Teorien for diskrete valg er basert på ”*maximum likelihood*”-metoden til estimering av modellene på alle nivåer i transportmodellen. Dette betyr at alle forklaringsvariable i modellene vil være tilknyttet parametre med tilhørende statistiske egenskaper. Man vil også ha statistiske mål som sier noe om hvor godt de ulike modeller ser ut til å forklare de sammenhenger som ligger i dataene. Dette betyr at denne metoden også er godt egnet som et verktøy den prosessen hvor man spesifiserer, formulerer og tester ut ulike modeller for forskjellige situasjoner.

Det ser ikke ut som noen modell uten en viss kalibrering treffer "godt nok" med de ulike turmatriser i forhold til observert trafikk (telling, registreringer med mer). Dette betyr at man som regel må gjennom en kalibreringsrunde som innebærer en justering av en del parametre slik at modellen i utgangspunktet "treffer" på viktige kontrollpunkter (tellesnitt, billettsalg med mer). Det er mange årsaker til at dette som oftest er nødvendig. Mange av disse ligger innbakt i det datagrunnlaget som er benyttet til å etablere modellene. Behandlingen av turkjeder kan være en årsak til avvik mellom modell og observert trafikk (jfr avsnitt 2.4) Det kan også være skjevheter i den reisevaneundersøkelse modellen er etablert på. Det er ikke alltid så lett å overskue og dermed å kunne korrigere for alle skjevheter i en utvalgsundersøkelse.

De disaggregerte modellene er nok mest følsomme for slike skjevheter. Her ”tynes” det mest ut av datagrunnlaget både når det gjelder geografisk informasjon om start- og målpunkter for ulike typer reiser, og informasjon om hvilke reisemidler som benyttes til ulike destinasjoner. Hvis det er skjevheter her, kan konsekvensene være at modellene gir avvik i forhold til andre observasjoner. En av fordelene ved estimering av de disaggregerte modellene er at hvert valg en respondent har foretatt inngår som en egen observasjon (i de aggregerte modellene kan en observasjon til sammenlikning være gjennomsnittet av mange (over 100) individobservasjoner). Denne fordel kan altså i tilfeller hvor det er store skjevheter i datagrunnlaget vise seg å være en ulempe.

Når man skal vurdere om en matrise er god nok i forhold til kontrollpunktene, vil man generelt sett ha et problem med både med kollektivtrafikk og biltrafikk fordi datagrunnlaget i form av telling/registreringer har vært forholdsvis dårlig. Det er liten grunn til å tvinge en matrise til å stemme overens med unøyaktige trafikk-telling.

4.3.3 Etterspørselseffekter, prognoser og fremskrivninger

En ting er hvor godt de modellene vi bruker stemmer overens med en kjent situasjon. Et annet viktig aspekt er knyttet til hvilke effekter modellene gir knyttet til endringer i de eksogene variable. Det er her (minst) to sentrale stikkord; hvilke

eksogene variable som er med i modellen, og hvilken tidshorisont vi har for analysen.

Generelt sett kan det hevdes at de disaggregerte modellene vil gi mer realistiske etterspørselseffekter enn de aggregerte modellene. Dette skyldes at den første typen vanligvis har med flere variable som beskriver alternativene enn gravitasjonsmodellene. De tre øverste nivåene i disse modellene er også koblet sammen gjennom den tidligere omtalte logsummen, slik at effektene av tilbuds- endringer i transportnettverket også vil påvirke reisefrekvensene. I noen av firetrinns-modellene som er i bruk i dag behandles reisemiddelvalget med logitmodeller, mens gravitasjonsmetodikken benyttes til å etablere en total OD-matrise. I slike modeller kan logsummen fra reisemiddelvalgmodellen benyttes som avstandsfunksjon. En slik tilnærming vil kunne gi mer realistiske fordelings- effekter i turfordelingen enn det man oppnår ved bruk av avstand eller gjennom- snittlige generaliserte kostnader. Generering og attrahering vil imidlertid bli uforandret.

De kortsiktige tilpasningsendringene i et transportsystem i forandring er vanligvis de største. Det er nærliggende å tro at de etterspørselseffektene av et samferdsels- prosjekt som skyldes endringer i rutevalg vil være aller størst. I de fleste tilfeller, i hvert fall i byområder, vil de som allerede reiser med et bestemt transportmiddel være den største trafikantgruppen som berøres av et tiltak i det området hvor tiltaket er lokalisert, og disse vil også vanligvis ha de største gevinster ved å tilpasse seg forbedringer for dette transportmiddelet. Etter noe tid vil man også kunne observere endringer i valg av reisemiddel. Denne trafikantgruppen vil vanligvis være betydelig mindre fordi mange av disse av ulike årsaker ikke kan endre reisemiddel av praktiske grunner, og fordi de kanskje vurderer sitt opprinnelige transportmiddel som mye bedre, selv etter at tiltaket er gjennomført.

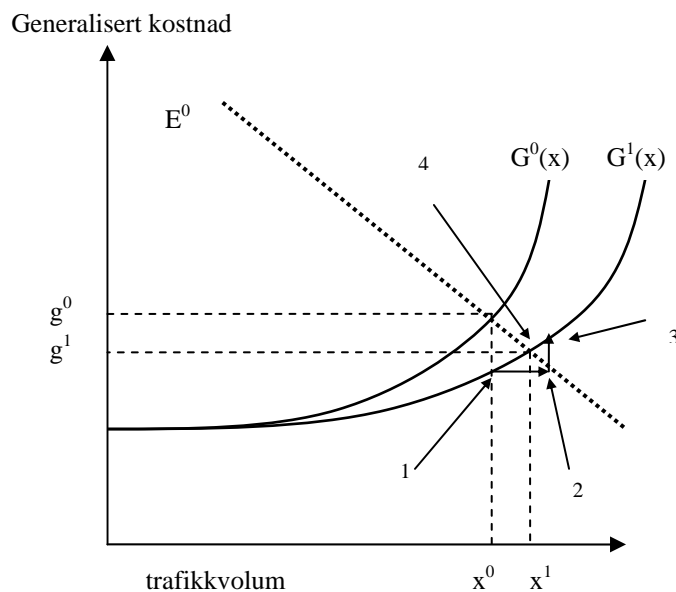
I mange prosjektanalyser vil man komme langt med modeller som behandler de to beslutningene som er nevnt over, vei- og rutevalg og reisemiddelvalg. I andre situasjoner er man imidlertid avhengig av å også behandle destinasjonsvalget og reisefrekvenser. Dette vil for eksempel være nødvendig hvis tiltaket gir store kvalitetsforbedringer eller det er snakk om endret transportpolitikk når det gjelder priser og avgifter. Det samme vil være tilfellet hvis problemstillingen krever langsiktige prognoser. I slike tilfeller bør modellene ha med eksogene variable for befolkningsutvikling, inntekt, bilhold og sysselsetting som kanskje er de mest sentrale forhold som påvirker transportomfanget over tid i tillegg til forbedret transporttilbud. Man skal merke seg at man her er avhengig av prognoser for disse variablene, noe som tilfører etterspørselsberegningene en ekstra dimensjon med usikkerhet.

4.3.4 Kobling mellom tilbud og etterspørsel

I forbindelse med bruk av transportmodeller er det ytterligere et moment som er viktig å ta hensyn til, spesielt i modeller for byområder hvor det er kjøproblemer på veinettet. I slike situasjoner vil det være slik at etterspørselen påvirker transporttilbudet. Dette poenget er illustrert i figur 4.7. La oss tenke oss at vi studerer en bestemt sonerelasjon, dvs et bestemt delmarked, i en transportmodell. Hvis vi ser spesielt på etterspørselen etter bilreiser på dette delmarkedet, kan vi etablere en sammenheng mellom denne etterspørselen og generaliserte kostnader

knyttet til bilalternativet som antydnet i figuren, ved kurven E^0 . Vi ser at etterspørselen etter bilreiser øker når de generaliserte kostnader synker. De generaliserte kostnader er, som vi ser, også avhengig av etterspørselen etter bilreiser. Jo flere biler, desto høyere generaliserte kostnader. Kurven $G^0(x)$ representerer transporttilbudet på veien i basissituasjonen.

Med de forutsetninger som ligger til grunn i figuren, vil det etableres en likevektsløsning hvor x^0 trafikanter velger å kjøre bil mellom de to soner, og disse opplever en generalisert kostnad tilsvarende g^0 . Resterende trafikanter kan antas å velge andre reisemidler, andre reisemål eller rett og slett la være å reise.



Figur 4.7: Sammenhengen mellom etterspørsel og transporttilbud

La oss nå si at vi planlegger et veiprojekt som øker kapasiteten på veien mellom de to sonene. Kurven $G^0(x)$ representerer det nye transporttilbudet. Spørsmålet er nå hvordan etterspørselen vil endre seg som følge av dette prosjektet. Umiddelbart etter prosjektet innføres vil det fremdeles være x^0 trafikanter som kjører bil, men kostnadene nå vil være lavere. Den loddrette avstanden mellom de to tilbudskurvene over trafikkvolumet x^0 vil representere den kostnadsbesparelsen disse bilistene vil oppleve. I dette punktet, som er markert med "1" i figuren, vil forbedringene av prosjektet overpredikeres og trafikken underpredikeres. Til denne kostnaden vil flere trafikanter velge bil som reisemåte mellom de to sonene. Dette er markert med den vannrette pila i figuren. Man vil således i neste omgang få et høyere trafikkvolum. I dette punktet markert med "2" i figuren, vil man overpredikere både forbedringene og trafikkvolumet. Ved dette trafikkvolum vil imidlertid kostnadene øke, slik at man nesten er tilbake til den kostnaden man hadde før prosjektet ble introdusert. Dette er markert med den loddrette pila i figuren. Vi er nå ved punkt "3" i figuren hvor vi har for liten forbedring som følge av prosjektet og for mye trafikk. Dette vil igjen medføre lavere trafikkvolum, slik at kostnadene reduseres på nytt. I hver slik omgang vil endringen i trafikkvolum

og kostnader bli stadig mindre, og til sist vil en ny likevektsløsning etableres ved x^1 til en kostnad g^1 i punkt "4".

I mange av dagens modeller, og i analyser gjennomført med disse modellene, ignoreres denne mekanismen. Man legger veiprojektet inn i nettverksdatabasen og kjører kun én runde med etterspørselsmodellen (dvs beregner etterspørsel ut fra punkt "1" i figuren). Dette vil innebære at man vil overdrive etterspørsels-effektene, dvs få trafikkvolumer som er høyere enn x^1 (dvs punkt "2" i figuren). Man vil dermed også undervurdere kostnadsbesparelsene for bilistene, dvs få generaliserte kostnader som er høyere enn g^1 (dvs punkt "3" i figuren). Et annet forhold som kan påpekes er at hvis man benytter konstant trafikk (for eksempel x^0) i en analyse, vil man vanligvis overvurdere nytten av vegprosjekter når man har et system med køproblemer. Årsaken til dette er at man ikke tar hensyn til at når det kommer flere bilister til som "spiser opp" fremkommelighetsgevinstene av prosjektet. De nye bilistene vil selvfølgelig oppleve en nytte ved å gjennomføre de ekstra reisene, men dette vil som regel ikke være tilstrekkelig for å oppveie for den ekstra ulempen de påfører de bilister som allerede kjører i veinettet.

Tilsvarende resonnementer kan også benyttes for kollektivtiltak i byområder hvor det er trengsel på veinettet. Hvis et kollektivtiltak påvirker reisemiddefordelingen, slik at tidligere bilister velger å reise kollektivt, vil dette i neste omgang gjøre fremkommeligheten på veinettet bedre. Men det at kostnadene ved bilbruk reduseres kan så gi tilbakeføringer av trafikkvolumer til veien. Dette kan være potensielle bilister som tidligere lot være å reise og det kan være bilister eller andre trafikantgrupper som tidligere reiste til andre destinasjoner. Hvis vi bare kjører modellen én runde, vil vi dermed overvurdere gevinsten knyttet til bedre fremkommelighet på veisiden som følger av kollektivprosjektet. Vi vil også kunne risikere å overvurdere billettinntektene for kollektivselskapene.

Det er grunn til å understreke at disse etterspørselseffektene bare vil opptre i områder hvor det er kø på veiene. *I slike situasjoner kan man imidlertid komme ganske galt av sted hvis man ikke tar hensyn til denne mekanismen.*

4.3.5 Lenkebaserte eller matrisebaserte beregninger av totale tidsbesparelser ("ingeniørsyndromet")

I politisk sammenheng er det stor interesse for overført trafikk, spesielt fra bil til kollektivtrafikk, og det er trolig meget viktig å få forklart på en "forståelig" måte hvordan dette håndteres i en nytte-kostnadsanalyse. I den samme forbindelse er det også viktig å unngå det som med en litt spøkefull betegnelse kan kalles "ingeniørsyndromet" (© Odd I Larsen 1997).

Hvis vi har et sett med enhetspriser på tid og kjenner trafikantenes reiseutgifter og reisetid både med bil og kollektivtrafikk på en reiserelasjon, så kan vi regne ut den generaliserte reisekostnad (summen av reiseutgift og tidskostnad) på denne relasjonen med de respektive reisemåter. Det vil ikke være uvanlig om man da finner at generalisert (vektet) reisekostnad kan være opptil 50 prosent høyere med kollektivtrafikk enn med bil. Samtidig vil man for eksempel kunne registrere at 25 prosent av de reisende på en relasjon som kunne benyttet bil faktisk reiser kollektivt. En slik "oppsiktsvekkende" situasjon vil en transportmodell meget vel kunne gjenskape. Dette betyr ikke annet enn at vi som "observatører" ikke er i

stand til å forutsi enkeltpersoners atferd i detalj på grunnlag av de forhold som vi kan måle/observere, mens en modell vil kunne gi ganske presise estimater på en slik reisemiddelfordeling. Hvis man i denne situasjonen forbedrer kollektivsystemet slik at generalisert reisekostnad for en kollektivreise reduseres med 5 prosent, vil for eksempel en logit-modell for reisemiddelvalg kunne predikere at en viss andel av bilistene overføres til kollektivtrafikk.

Målt med generalisert reisekostnad før og etter vil imidlertid disse overførte trafikantene ha fått en forverring og i verste fall kan total generalisert reisekostnad (sum biltrafikk og kollektivtrafikk) øke som en følge av overføringen! En slik regnemåte - "ingeniørtsyndromet" - hvor man behandler generalisert reisekostnad på lik linje med fysiske kvanta gir imidlertid et feilaktige resultat. Det man skal gjøre ifølge teorien, er å beregne gevinsten for eksisterende kollektivtrafikanter og til dette addere nettoytten av "nyskapt" kollektivtrafikk. De som frivillig har skiftet reisemåte på grunn av et forbedret kollektivtilbud må jo ha gjort det fordi det gir en velferdsforbedring!⁴

Eventuelt kan man direkte beregne totalendringen i trafikantoverskudd. I EFFEKT5-metodikken går det imidlertid bra fordi man vanligvis opererer med konstant antall bilturer. Da kan man ta differensen mellom trafikantkostnader før og etter uten at det oppstår noe metodisk problem. Eksemplet under illustrerer poenget:

Trafikantgruppe	Før	Etter
	(reiser · generalisert reisekostnad)	(reiser · generalisert reisekostnad)
Bilister	$100 \cdot 40 = 4000$	$90 \cdot 40 = 3600$ $(90 \cdot 38 = 3420)$
Kollektivtrafikanter	$30 \cdot 70 = 2100$	$40 \cdot 60 = 2400$
Sum	6100	6000 (5820)

Figur 4.8: Illustrasjon av "ingeniørtsyndromet"

I figuren er det forutsatt et tiltak som reduserer generalisert reisekostnad for kollektivtrafikanter fra 70 til 60 kroner, og dette overfører 10 reiser fra bil til kollektivtrafikk. Totale generaliserte reisekostnader går her ned med 100 kr. "Korrekt" beregning av nytteeffekten med en trapesformel gir imidlertid:

$$(70 - 60) \cdot (30 + 40) / 2 = 350 \text{ kroner.}$$

I et købelastet system kan det også tenkes at overføringen gir en bedring for bilistene slik at generalisert reisekostnad for eksempel reduseres fra kr 40 til 38. I

⁴ Det er her grunn til å påpeke at et kollektivprosjekt som er en klar forbedring for noen trafikanter kan medføre ulemper for andre. Der man har en forbedring, vil man kunne forvente at trafikken øker, og der man har en ulempe, kan man regne med at trafikken reduseres. I det siste tilfellet vil det være snakk om endringer i tilbudet for de eksisterende trafikanter. Dette gir grunnlag for å snakke om "fjernet" trafikk som motstykket til "nyskapt" trafikk. For den fjernede trafikken vil prosjektet medføre en velferdsreduksjon.

tabellen vil da summen for ettersituasjonen bli 5820, dvs en reduksjon fra førsituasjonen på kr 280.

Det "korrekte" er imidlertid å addere $(40-38) \cdot (100+90)/2 = \text{kr } 190$ til de kr 350 slik at totalen blir kr 540. Enda større blir forskjellen på de to regnemåtene hvis det i tillegg kommer noen ekstra trafikanter i systemet og det ikke bare er tale om overføring mellom bil og kollektivtrafikk.

Nygenerert trafikk på reiserelasjoner hvor et kollektivtilbud eventuelt forbedres kan anslås med bruk av modeller. Uansett er det ikke noe problem å beregne endringen i trafikanntytte for kollektivtrafikanter. Spørsmålet er om det spiller noen rolle hvor disse nye kollektivreiser kommer fra og om dette eventuelt gir opphav til mer kompliserte beregninger.

Dette er i første rekke et spørsmål om hvorvidt andre trafikanter betaler sine samfunnsmessige marginalkostnader.

4.3.6 Valg av 0-alternativ i prosjektanalyser

I forbindelse med veiprojekter er det vanlig at dagens veinett definerer 0-alternativet. For kollektivtrafikk har man et lite problem som skyldes at byområdenes kollektivtilbud i utgangspunktet synes å være noe underdimensjonert ut fra en nytte-kostnadstankegang. Den "beste" måte å justere dette på er vanligvis å utnytte eksisterende system bedre (flere bussruter, høyere frekvens og lenger betjeningstid på eksisterende ruter). Denne type forbedringer krever imidlertid økte driftstilskudd, noe som må konkurrere med andre anvendelser av fylkeskommunale og kommunale midler. Investeringer har man imidlertid et håp om å få kunne dekket - helt eller delvis - gjennom statlige bidrag, og dette stimulerer selvsagt lokale myndigheter til å foreslå investeringsprosjekter.

Med et underdimensjonert kollektivtilbud i utgangspunktet (= 0-alternativet) vil investeringsprosjekter lett kunne komme gunstig ut, men lønnsomheten kan ofte være enda bedre for en opprusting av det eksisterende tilbudet. Det siste kan imidlertid være nesten umulig å få til i praksis, fordi finansieringen i så fall må komme fra fylkeskommunen. Det er ikke godt å si hva man skal gjøre med dette problemet som skyldes de institusjonelle rammene rundt finansiering av samferdselstiltak. En måte å påvirke situasjonen på kan være at man i forbindelse med analyse av infrastrukturprosjekter pålegges å utrede et alternativ som innebærer opprusting av det eksisterende tilbud. Om ikke annet så vil dette kunne *synliggjøre* at man har et problem med investeringsmidler kontra driftstilskudd når det gjelder kollektivtrafikk.

5 Ad hoc-modeller

Selv om firetrinns-modellene kan benyttes på et stort antall problemstillinger av ulik art, vil man ofte kunne interessere seg for en del problemstillinger disse modellene ikke er spesielt egnet til å belyse. Det er heller ikke alle områder som har tilgang til slike mer eller mindre omfattende modellsystemer, som ofte kan være ressurskrevende både å utvikle og å drifte. I slike situasjoner kan man komme langt hvis man har tilgang til et visst minimumsnivå av data og også tilgang til en av de kommersielt tilgjengelige programpakkene for behandling av transportnettverk.

I dette kapitlet skal vi se litt nærmere på hvordan man med relativt små ressurser kan etablere det vi med en samlebetegnelse kan kalle ad hoc-modeller. Med dette mener vi "små" modellsystemer som kan ha ett eller flere trinn til felles med typiske firetrinns-modeller. Langs enkelte dimensjoner kan disse modellene imidlertid være betydelig mer detaljert enn de mer "stivbente" modellsystemene som etablerte firetrinns-modeller kanskje kan hevdes å være. Slik sett kan ad hoc-modellene ofte være skreddersydd i forhold til spesielle problemstillinger, men de kan også etableres og benyttes på mer "vanlige" transportproblemstillinger som prosjektanalyser av infrastruktur og ruteopplegg.

I programpakker som TRIPS, EMMA og VIPS er det, i tillegg til rutiner og database funksjoner for behandling av nettverk og vei- og rutevalgsgaloritmene, også rutiner og algoritmer for etablering og behandling av turmatriser. Det er her snakk om kraftige verktøy hvor ulike typer gravitasjonsmodeller er implementert. Det er derfor en stor fordel om man har tilgang til og kan benytte seg av slike programpakker. I tillegg trenger man som nevnt en viss datatilgang. Minimumskravet er at man kan kode inn de relevante nettverk og har en viss oversikt over hva som finnes i de sonene som er etablert i nettverket. De mest sentrale data for soneinnhold vil være antall bosatte og antall arbeidsplasser. Det er en fordel om man kan dele disse dataene videre inn i et begrenset antall befolkningssegmenter (for eksempel sysselsatte og andre) og næringskategorier (for eksempel publikumsattraktive og andre). Har man i tillegg tilgang til en eller annen reisevaneundersøkelse for studieområdet, har man kommet langt på vei. Hvis ikke, kan man benytte seg av data fra nasjonale reisevaneundersøkelser eller lokale undersøkelser for andre, men liknende områder. Av andre relevante data kan vi spesielt trekke frem trafikktegninger som spesielt nyttige.

5.1 Etablering av turmatriser

Med disse dataene kan man skaffe til veie en totalmatrise for antall turer i det området, og for den perioden, man skal studere. Dette kan gjøres ved hjelp av de to øverste trinnene i firetrinns-metodikken for gravitasjonsmodeller. På dette området kan gravitasjonsmetodikken hevdes å ha sin styrke. Med en relativt

begrenset tilgang på aggregerte data kan man etablere OD-matriser som stemmer med de data som er tilgjengelige. De gravitasjonsmodeller som er implementert i for eksempel EMMA er relativt enkle å bruke, og fremgangsmåtene er godt beskrevet i brukermanualene. Trafikktellingene kan benyttes til kontroll av matrisene, men også i selve matriseetablingen. Det beste er om man har tellinger for "tette" snitt, dvs for all trafikk på alle transportårer som passerer et snitt som avgrensner to geografiske delområder (for eksempel langs en kommunegrense, over en elv, eller for andre naturlige grenser med et begrenset antall transportårer). I nettverksprogrammene er det også vanligvis rutiner som gjør at man kan kalibrere OD-matriser mot slike tellinger, slik at det eventuelt blir bedre overensstemmelse mellom trafikkstrømmene i OD-matrisen og de observerte trafikkstrømmene.

Når OD-matrisen er på plass, kan metodikken for logitmodeller benyttes til å etablere valgmodeller. Det vil her i første rekke være snakk om modeller for reisemiddelvalg. Hvis man har en reisevaneundersøkelse basert på turdagbøker, kan preferansefunksjonene estimeres, basert på de valgene som ligger innbakt i reisevaneundersøkelsen. Hvis man ikke har en slik reisevaneundersøkelse tilgjengelig, kan man eventuelt "stjale" koeffisienter for sentrale variable fra andre modeller som er estimert for tilsvarende situasjoner for andre områder.

I de neste to avsnittene skal vi kort beskrive to slike ad hoc-modeller som er utviklet ved TØI. Først skal vi imidlertid gå litt mer i detalj på hvordan matrisene er estimert.

Vi har forutsatt at turene genereres og attraheres i soner avhengig av hvor mange som bor i dem og hvor mange som arbeider (og eventuelt går på skole) i dem. Man kan da for eksempel tenke seg følgende enkle sammenheng mellom reiseaktivitet og genererings-/attraheringsfaktorer i en modell for arbeidsreiser.

$$5.1.i) \quad O_i = a B_i + b A_i \quad \text{for alle "i"}$$

$$5.1.ii) \quad D_i = c B_i + d A_i \quad \text{for alle "i"}$$

hvor B_i er tallet på bosatte i sone "i" og A_i er antall arbeidsplasser (eventuelt også skoleplasser i ungdomsskole, videregående skole og universitet/høyskole). O_i er antall genererte, D_i er antall attraherte turer i sone "i", og a , b , c , og d er estimerbare parametre. Disse parametrene vil si noe om produksjonsevnen og attraheringsevnen til de spesifiserte forklaringsvariablene. I tillegg vil vi kreve at totalt antall turer som starter i alle soner skal være lik totalt antall turer som ender i alle sonene. Dette kan skrives:

$$5.1.iii) \quad \sum_i O_i = \sum_i D_i$$

I estimeringen av de fire parametrene har vi benyttet en reisevaneundersøkelse for Oslo-området. Denne gir oss opplysninger om hvor (i hvilken sone) et utvalg av befolkningen i Oslo og Akershus bor og arbeider eller går på skole, og samtidig start- og målpunkt for alle reiser hver enkelt respondent har gjennomført i perioden. Problemet kan da løses ved å minimere funksjonen:

$$5.1.iv) \quad F(a,b,c,d) = \left(\sum_i O_i - a \sum_i B_i - b \sum_i A_i \right)^2 + \left(\sum_i D_i - c \sum_i B_i - d \sum_i A_i \right)^2 + \left(\sum_i O_i - \sum_i D_i \right)^2$$

med hensyn til parametrene a, b, c og d. Funksjonen har ingen meningsfull tolkning, men problemet består i å minimere kvadratet av avvikene mellom de observerte verdiene og de verdiene som blir realisert av modellen 5.1.i) og 5.1.ii). Denne metoden blir ofte benyttet til ulike formål, for eksempel i rutevalgs-algoritmer og i hvor selvfølgelig målfunksjonen og innholdet i denne er annerledes. Løsningen finnes ved å derivere F med hensyn til de fire parametrene. Dette vil gi fire likninger til løsning av de fire ukjente verdiene.

På denne måten har vi etablert modeller for turgenerering og turattrahering for fire perioder som representerer fire typiske trafikksituasjoner i Oslo-området. De estimerte parameterne er vist i tabell 5.1. I tabellen ser vi at antall bosatte betyr mye for turgenerering om morgenen, men lite for attrahering. Om ettermiddagen er det, som vi ser, motsatt, mens bosatte har en jevnere effekt på generering og attrahering midt på dagen og i lavtrafikkperioder.

Tabell 5.1: Parametre i enkle modeller for generering og attrahering av turer i Oslo-området

Periode	Parameter	Parameter "a", Generering bosatte	Parameter "b" Generering arbeidsplasser	Parameter "c" Attrahering bosatte	Parameter "d" Attrahering arbeidsplasser
Morgenrush (0600-0900)		0.445	0.023	0.006	0.628
Dagtrafikk (0900-1500)		0.211	0.290	0.204	0.300
Ettermiddagsrush (1500-1600)		0.093	0.594	0.425	0.137
Lavtrafikk kveld/helg		0.452	0.480	0.552	0.343

Når vi benytter modellene 5.1.i) og 5.1.ii) på det faktiske antall bosatte og arbeidsplasser (inklusive elevplasser) i sonene, får vi estimater på kolonne- og rekkesommene i de ulike matrisene. Vi kan dermed nå formulere bibetingelser for kolonne- og rekkesummer som vi krever at de endelige matrisene skal oppfylle:

$$5.1.v) \quad \sum_j T_{ij} = O_i \quad \text{for alle soner}$$

$$5.1.vi) \quad \sum_i T_{ij} = D_j \quad \text{for alle soner}$$

Fra reisevaneundersøkelsen kjenner vi i tillegg gjennomsnittlig reiseavstand i de ulike periodene (c_{ij} beregnes med veivalgsmodellen). Vi kan dermed også formulere en bibetingelse som også setter krav til reiselengdene i de endelige matrisene:

$$5.1.vii) \quad \sum_{i,j} T_{ij} c_{ij} = C$$

I Oslo-området gjennomføres det løpende og periodiske trafikktegninger ulike steder. Bygrensetellingene omfatter all trafikk (bil og alle kollektivmidler). Denne informasjonen har vi benyttet til å formulere ytterligere seks bibetingelser som de endelige matrisene skal oppfylle. Vi har tall for antall trafikanter som passerer bygrensen i tre transportkorridorer (vest, nordøst, og sør) i begge retninger. Vi vet også hvilke sonerelasjoner i OD-matrisene som innebærer kryssing av bygrensen:

$$5.1.viii) \quad \sum_{i,j} T_{ij} k_{ij} = K \quad \text{for alle tre korridorer i begge retninger}$$

I betingelsen 5.1.viii) er k_{ij} en indikator som er 1 hvis relasjonen innebærer kryssing av bygrensen i en bestemt korridor, og K er trafikken som er tallet i

perioden. Betingelsen sier dermed at antall turer i den endelige OD-matrisen som passerer dette snittet skal stemme overens med den som er observert.

TØI har utviklet egne rutiner som benytter gravitasjonsmetodikken til å estimere matriser basert på de betingelser og de data som er beskrevet over. Tilsvarende rutiner finnes imidlertid i noen av programpakken for behandling av matriser og transportnettverk. Metodikken er svært fleksibel, noe som gjør at man kan etablere matriser for ulike reisemidler og ulike perioder dersom man har tilgang til data som tilsvarer disse reisemidlene og periodene.

5.2 En modell som behandler kombinerte reisemåter

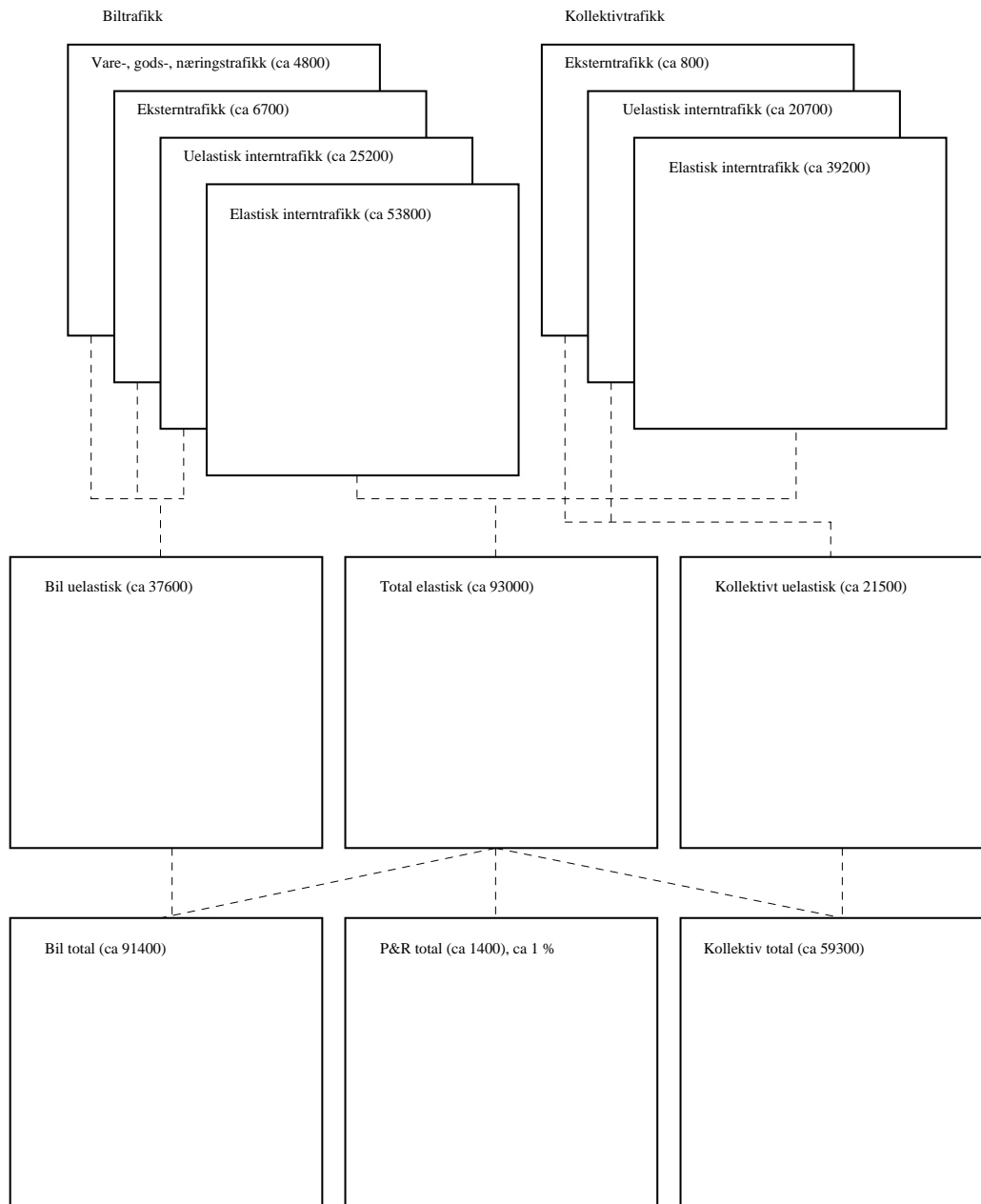
Park & Ride-Modellen, PARIMO, er en kombinert modell for valg av reise-middel, veivalg og rutevalg for trafikksituasjonene i morgenrushet for Oslo og Akershus. Dette innebærer at modellen tar de to første stegene i en tradisjonell firetrinns-modell, turgenereringen og turfordelingen, som er eksogent gitt i form av på forhånd estimerte timesmatriser for morgenrushet for Oslo og Akershus. PARIMO er derfor et kortsiktig modellsystem som kun ivaretar endringer i trafikantenes kortsiktige tilpasning til transporttiltak og prisendringer. Langsiktige tilpasningsendringer som innebærer endringer i lokaliseringsmønster, transport-omfang og destinasjonsvalg fanges ikke opp av modellsystemet. Drivkraften i tilpasningsendringene i modellsystemet er endringer i generaliserte transport-kostnader.

Det nye ved dette modellsystemet, i forhold til de andre modellene som finnes i Oslo-området, er at innfartsparkering med bil, Park & Ride (P&R) er modellert som et eget reisemiddel og ikke betraktet som ren kollektivtrafikk, slik de fleste andre modellsystemer behandler disse reisene. Om lag 1 prosent av reisene i en typisk maksimaltrafikktid om morgenen gjennomføres med kombinasjonen bil og kollektivt reisemiddel i Oslo-området. Vi har derfor sett det som lite hensiktsmessig å gjennomføre en omfattende modellestimering når omfanget av Park & Ride-reiser er såpass beskjedent. Modellstrukturen og parameterne i systemet er altså ikke fremkommet gjennom estimering, men dels valgt på bakgrunn av estimeringsresultater for tilsvarende modeller i Oslo-området og dels kalibrert inn mot observerte data.

PARI-modellen opererer altså med tre reisemåter og tre prinsipielt forskjellige etterspørselssegmenter. For valgalternativene bil og kollektivt skiller vi, som figur 5.1 antyder, mellom etterspørsel som er uelastisk eller "bundet" til det konkrete alternativ og etterspørsel som er elastisk. Den elastiske etterspørselen kan påvirkes av endringer i priser og reisetider som inngår i trafikantenes generaliserte kostnader.

Uelastiske kollektivtrafikanter er trafikanter som ikke har førerkort eller tilgang til bil i husholdningen. Uelastiske bilturer er turer som foretas med tunge biler (vare-, gods-, næringstrafikk) og turer foretatt av bilførere som bruker bil i arbeid. De uelastiske bilturene spiller for så vidt en rolle i reisemiddelvalget, fordi disse bilene belaster kapasiteten i veisystemet og er således med på å bestemme reisetidene i området. Den gjenværende etterspørselen betegnes som elastisk idet disse trafikantene i prinsippet har mulighet til å velge mellom de tre alternativene.

Andelene i hver av disse tre etterspørselssegmentene er hentet fra reisevaneundersøkelsene gjennomført for Oslo og Akershus i 1989/1990.



Figur 5.1: Etterspørselssegmenter i PARI-modellen

Som teorien forutsetter, antar vi at trafikantene kan tilordne en nytte til hvert alternative reisemiddel m ($m = \text{bil, koll og P\&R}$). Denne nytten kan for hvert sonepar (OD) skrives på formen:

$$5.2.i) \quad V_{ODm} = \sigma_{ODm} + TK_{ODm} \cdot$$

Den systematiske delen av nytten, V_{ODm} , er altså sammensatt av σ_{ODm} , som er en alternativspesifikk konstant (normalisert til 0 for bilalternativet), og et ledd TK_{ODm} som beskriver transportkvaliteten knyttet til reisemiddelet. I tråd med

teorien kan logitmodellen (her: sannsynligheten for at bil blir valgt på et gitt sonepar OD) dermed skrives:

$$5.2.ii) \quad P_b = \frac{e^{V_b}}{\sum_m e^{V_m}} = \frac{1}{1 + e^{(-V_b)} (e^{(V_k)} + e^{(V_{p\&r})})} = \frac{1}{1 + e^{(V_k - V_b)} + e^{(V_{p\&r} - V_b)}}$$

Antall elastiske bilreiser på et gitt sonepar får man ved å multiplisere sannsynligheten med totalt antall elastiske reiser på sonerelasjonen:

$$5.2.iii) \quad X_{Eb} = P_b X_{ET} = \frac{X_{ET}}{1 + e^{(-V_b)} (e^{(V_k)} + e^{(V_{p\&r})})}$$

Tilsvarende funksjoner kan utledes for de to andre reisemåtene.

Den systematiske nyttekomponenten defineres som en lineær funksjon av ulike transportkvalitetsvariable. I kalibreringsprosessen er ulike funksjonsformer for hvert reisemiddel testet. I denne prosessen har vi også testet ulike verdier på parametrene i nyttefunksjonene. Nedenfor vises de funksjonsformene og parameterverdiene som har gitt best modellresultat målt mot tellinger og reisevanedata. Parametrene for ren tid i minutter og monetær kostnad i kroner er satt til henholdsvis -0,03 og -0,05. Disse parameterverdiene gir en implisitt tidsverdi i modellsystemet på 0,60 kr/min eller 36 kr/t. Denne tidsverdien er felles for den elastiske trafikken. Den inverse tidsverdien blir dermed 1,67 min/kr.

5.2.1 Nyttefunksjon for bilalternativet

$$5.2.iv) \quad V_{bil} = -0.03 \text{ (kjøretid OD)} - 0.05 \text{ (kjørekost OD)} \\ - 0.05 \text{ (bompenger OD)} - 0.05 \text{ (pkostOD)}$$

Kjøretid og kjørekostnad for bil beregnes samtidig ved en såkalt kapasitetsbetinget generalisert rutevalgfordeling i EMMA. Kjørekostnaden, som omfatter drivstofforbruk og driftskostnader, er satt til 1 kr/km og tas hensyn til i rutevalget. Rutevalgsberegningene i EMMA gir en matrise for generalisert kjøretid hvor kjørekostnaden er omregnet til tid ved hjelp av den inverse tidsverdien. Gjennomsnittsprisen for en passering av bomringen i Oslo er (i 1995) ca 8 kroner, når det tas hensyn til rabatterte passeringer. Det er grunn til å anta at rabattandelen for reisene som gjennomføres av de uelastiske biltrafikanter er høyere enn tilsvarende andel for reisene som gjennomføres av de elastiske bilistene. I modellen er derfor kostnaden for en passering av bomringen satt til 10 kroner som fordeles likt på tur/retur. Siden modellen bare behandler den delen av tur/retur reisen som foretas i makstimen om morgenen, er bomkostnaden altså kr 5. Parkeringskostnaden er gjennomsnittskostnad pr time for langtidsparkering. Vi antar at den delen av parkeringstiden som belastes reisen om morgenen er 4 timer.

5.2.2 Nyttefunksjon for kollektivalternativet

$$5.2.v) V_{koll} = \rho_{OD} - 0.03 \text{ (ombordtid OD)} - 0.06 \text{ (ventetid OD)} \\ - 0.054 \text{ (gangtid OD)} - 0.3 \text{ (antall påstigninger OD)} \\ - 0.05 \text{ (kollektivtakst OD)}$$

Parameteren ρ_{OD} er en relasjon- og alternativspesifikk konstant som er kalibreres for kollektivalternativet⁵. Om bord-tiden er forventet total reisetid om bord på det kollektive transportmiddelet. Gangtiden er beregnet på bakgrunn av en ganghastighet på 5 km/t og gangavstand mellom holdepassene og start- og målpunkt, samt eventuell gangavstand ved bytte av reisemiddel. Antall påstigninger på kollektivreisen er forventet antall bytter samt den første påstigningen. Kollektivtakstene er beregnet på bakgrunn av billettsalgsstatistikk og tilsvarer 1995-prisnivå. Parameterverdiene for de ulike reisetidskomponentene er fremkommet ved produktet av parameteren for ren reisetid og de vektene som er lagt til grunn for rutevalget (ventetidsvekt = 2, gangtidsvekt = 1,8 og påstigningsulempe = 10 minutter).

5.2.3 Nyttefunksjon for Park & Ride-alternativet

$$5.1.vi) V_{p\&r} = \sigma_{OD} - 0.051 \text{ (kjøretid Ok)} - 0.085 \text{ (kjørekost Ok)} \\ - 0.05 \text{ (bompenger Ok)} - 0.05 \text{ (parkeringskost k)} \\ - 0.03 \text{ (ombordtid kD)} - 0.06 \text{ (ventetid kD)} \\ - 0.054 \text{ (gangtid kD)} - 0.3 \text{ (antall påstigninger kD)} \\ - 0.05 \text{ (kollektivtakst kD)}$$

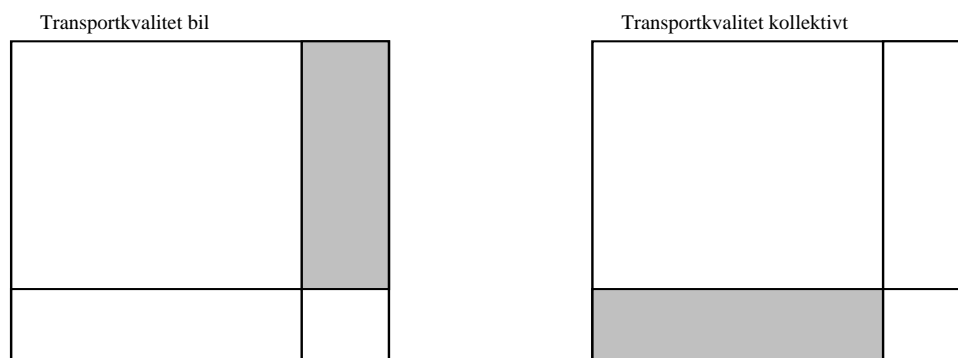
I denne nyttefunksjonen er den innfartsparkeringsplassen som minimerer beregnet total forventet reisekostnad mellom O og D betegnet med k. Parameteren σ_{OD} er en relasjon- og alternativspesifikk konstant som er kalibrert for P&R-alternativet. De variablene som inngår i nyttefunksjonene for bil- og kollektivalternativet benyttes også i nyttefunksjonen for Park & Ride-alternativet med unntak av parkeringskostnader. I Park & Ride-alternativet er eventuell parkeringskostnad på innfartsparkeringsplassene⁶ tatt med som forklaringsvariabel. Variablene for generaliserte kostnader for bildelen av Park & Ride-reisen (understreket i nyttefunksjonen) er vektet med 1,7 i forhold til reisetid om bord på kollektivmiddelet på grunnlag av en kalibrering av avstandsfordeling for bildelen av Park & Ride-turen.

Alle variablene er gitt i form av OD-matriser og destinasjonsvektorer og verdiene av nyttefunksjonene kan dermed beregnes med matrisekalkulatoren i EMMA. For P&R-alternativet må det gjennomføres spesielle beregninger for å kombinere datamatrixene for bildelen og kollektivdelen av P&R reisen. Disse beregningene, som er illustrert i figur 5.2, bruker generaliserte kostnader for bil fra alle

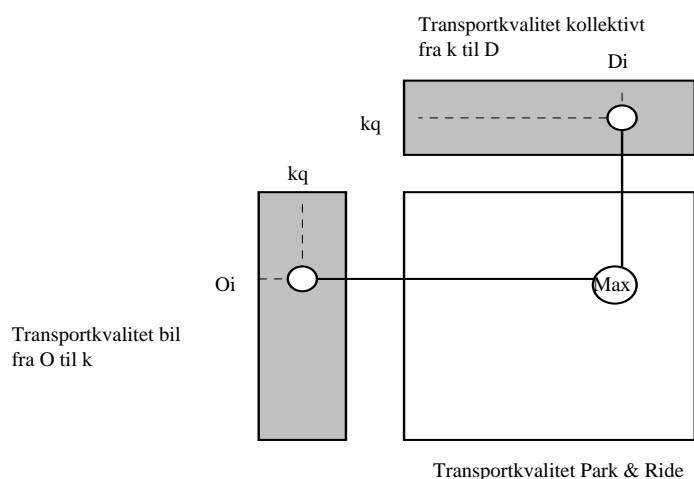
⁵ Med kalibrering menes som nevnt gjentatte justeringer i små steg med det siktemål å få reisemiddelfordelingen til å stemme overens med observert reisemiddelfordeling.

⁶ Døgnpris dividert med 2

startsoner til de hjelpesonene som representerer innfartsparkeringsplassene og generaliserte kostnader for kollektiv fra disse hjelpesonene til alle målsoner.



Matrise konvolusjon i EMMA



Figur 5.2: Illustrasjon av "matrise-konvolusjon"

De generaliserte kostnadene for det kombinerte alternativet kan så beregnes under forutsetning av at den parkeringsplass-sonen blir valgt som i kombinasjon gir de laveste generaliserte kostnadene. Matematisk kan dette problemet formuleres som

$$5.2.vii) \quad G_{ODp\&r} = \min_k (\theta_{au/tr} G_{Ok(au)} + G_{kD(tr)})$$

hvor $\theta_{au/tr}$ ($= 1.7$) er en parameter som representerer den relative vektleggingen av de to generaliserte kostnadskomponentene som inngår i uttrykket.

5.2.4 Kalibrering av alternativspesifikke konstanter

Når transportkvaliteten for hvert reisemiddel er gitt, kalibreres de alternativspesifikke konstantene, ρ_{OD} og σ_{OD} , for henholdsvis kollektivalternativet og Park & Ride-alternativet, slik at modellen gjenspeiler en kjent reisemiddelfordeling. Konstantene skal tolkes relativt til bilalternativet, hvor de er normalisert til 0. I PARI-modellen varierer den alternativspesifikke konstanten også over storsonerelasjoner. Vi har delt modellområdet inn i seks storsoner for startpunkt og fire

storsoner for målpunkt for reisene. Disse konstantene fanger opp forhold som er med på å bestemme reisemiddelfordelingen på disse 24 storsonerelasjonene, men som den spesifiserte nyttefunksjonen ikke forklarer. I vårt tilfelle kan dette være forhold som går på inntekt, bilhold, kjønn, alder og andre variabler som ikke er spesifisert i vårt kortsiktige modellsystem. Trafikantenes holdninger til ulike transportmidler og andre forhold som ikke lar seg spesifisere i numeriske variabler kan også gi utslag på denne parameteren.

Siden parametrene i nyttefunksjonene er negative og variablene (reisetidens ulike komponenter og reisekostnad) er positive, er verdien av nyttefunksjonene negative. Variablene inngår altså i nyttefunksjonene som en ulempe. Når den alternativspesifikke konstanten er positiv, bidrar dette til å redusere ulempen knyttet til alternativet. Sett for eksempel at en kollektivreise fra Bærum til Oslo øst innebærer en 35 min reisetid om bord i transportmiddelet, en total ventetid på 16 min, gangtid på 18 min, at reisen medfører to påstigninger og koster 20 kroner. Ulempen ved denne reisen blir etter multiplikasjon med parameterne og summering over variablene -3,68. På denne storsonerelasjonen er $\rho_{OD} = 1,53$, slik at verdien av nyttefunksjonen blir -2,15.

$$\begin{aligned}
 5.2.viii) \quad V_{\text{koll}} &= \rho_{OD} \cdot (-0,03 (35 \text{ min}) - 0,06 (16 \text{ min}) - 0,054 (18 \text{ min})) \\
 &\quad - 0,3 (2 \text{ stk}) - 0,05 (20 \text{ kr}) \\
 &= \rho_{OD} \cdot -3,68 \\
 &= -2,15
 \end{aligned}$$

Sett videre at reisetiden med bil på tilsvarende relasjon er 30 min, at avstanden er 10 km, og parkeringskostnaden pr time for langtidsparkering er kr 2,44. Verdien av nyttefunksjonen for bilalternativet blir etter dette -2,14.

$$\begin{aligned}
 5.2.ix) \quad V_{\text{bil}} &= -0,03 (30 \text{ min}) - 0,05 (10 \text{ kr}) \\
 &\quad - 0,05 (5 \text{ kr}) - 0,05 (9,76 \text{ kr}) \\
 &= -2,14
 \end{aligned}$$

En logitmodell vil i dette tilfellet gi en reisemiddelfordeling mellom bil og kollektivt på rundt 50/50 prosent. Uten den spesifikke konstanten for kollektivalternativet ville den modellberegnete fordelingen blitt 85/15 prosent.

De fleste kalibrerte område-/alternativspesifikke konstantene for kollektivalternativet er positive. Disse bidrar altså til å redusere reiseulempen knyttet til dette alternativet i forhold til ulempen knyttet de andre alternativene.

De fleste kalibrerte område-/alternativspesifikke konstantene for Park & Ride-alternativet er negative. Dette kan i første rekke skyldes at nivået på antall elastiske turer, som er eksogent gitt i modellen, er relativt høyt. De elastiske turene gjennomføres pr definisjon av de trafikantene som har mulighet til å velge mellom bil og kollektivtransport på sin reise. Det er imidlertid ikke sikkert at alle disse har mulighet til å velge både bil og kollektivtransport på en og samme reise. Det kan her være forhold knyttet til bruken av bilen i husholdene som vi ikke har med i modellen. Konstantene er lavest for relasjoner med startpunkt i Oslo. Her spiller lavere bilhold og parkeringskapasitet ved de få innfartsparkeringsplassene også en rolle. Uobserverbare forhold som trygghet for den parkerte bilen o.l. kan også spille inn. Et annet forhold er at logitmodellene vil gi en positiv sannsynlig-

het for alle alternativer som er tilgjengelig på en relasjon, også for alternativer som er svært mye dårligere enn de andre. Siden trafikkvolumene i Oslo er store og antall sonerelasjoner er stort, vil Park & Ride-alternativet generere noe trafikk på hver sonerelasjon (i sum over 35 000 sonerelasjoner internt i Oslo). Siden omfanget av disse reisene, internt i Oslo, ifølge våre observasjoner er relativt beskjedent, må vi altså korrigere reisemiddelfordelingen med konstanter som er negative og relativt høye i tallverdi.

Ved hjelp av logitmodellene med de alternativspesifikke konstantene beregnes OD-matriser for de tre reisemidlene med utgangspunkt i matrisen for elastisk trafikk. Den beregnede OD matrisen for P&R splittes i to delmatriser, en Ok matrise (startzone - innfartsparkeringsplass) og en kD matrise (innfartsparkeringsplass - målsone). Disse kan legges ut på vei- og kollektivnettet på vanlig måte.

Generalisert reisetid med bil fra startzone til innfartsparkeringsplass er definert som reisetids- og kilometer-avhengige kostnader omregnet til tid etter følgende formel:

$$5.2.x) \quad G_{Ok(au)} = \text{kjøretid } Ok + 1,67 * \text{kjøreavstand } Ok$$

Faktoren 1,67 er den inverse tidsverdien i modellsystemet og betegnes med min/kr. I modellen styres reiselengden for bildelen av Park & Ride-reisen i stor grad av parameteren $\theta_{au/tr}$ som representerer den relative vektleggingen av generalisert reisetid med bil i forhold til den generaliserte reisetiden med kollektivtransport. Høy verdi på denne parameteren presser reiseavstanden, og dermed generalisert reisetid, for bildelen av Park & Ride-reisen ned.

I kalibreringen har vi forsøkt med ulike verdier på denne parameteren i intervallet fra 1 til 2. I modellen er parameterverdien satt til 1,7. Denne verdien er noe høy, fordi modellen produserer en matrise som gir en litt for lav gjennomsnittlig generalisert biltid. I kalibreringen har det imidlertid vist seg å være et motsetningsforhold mellom å oppnå "korrekt" fordeling på generalisert biltid og å oppnå "korrekt" fordeling av trafikk på innfartsparkeringsplassene. Lave verdier på parameteren $\theta_{au/tr}$ kan gi bedre samsvar når det gjelder fordeling på biltid, men for mye trafikk på innfartsparkeringsplasser nær sentrum (trafikanter kjører for langt inn før de parkerer bilen).

I en undersøkelse for Park & Ride-reiser gjennomført i 1995 (P&R-95), svarte om lag 80 prosent av respondentene at de kjørte direkte fra bopel til innfartsparkeringsplassen. De resterende 20 prosent hadde et eller annet ærend på reisen underveis til parkeringsplassen. Dermed blir bildet noe mer komplisert, fordi valget av innfartsparkeringsplass for disse reisene ikke nødvendigvis styres av generaliserte kostnader, men av lokaliseringen av det ærendet (barnehage o.l.) som skal utføres. Dette er det ikke mulig å ivareta i modellsystemet, hvor valget av innfartsparkeringsplass bestemmes deterministisk gjennom minimering av de generaliserte kostnadene. Dette taler for at den modellen bør produsere en matrise for Park & Ride-reiser som har litt lavere generalisert reisetid med bil enn det vi finner i reisevaneundersøkelsen.

5.2.5 Oppsummering om PARI-modellen

Sett under ett gir dette modellsystemet resultater som kan karakteriseres som tilfredsstillende gitt nøyaktigheten av de kodede transportnett og andre inputdata og målt mot tilgjengelige "observerte" kontrolldata. Akershus-delen av transportnettet er relativt grovt og skjematisk representert i EMMA. Detaljeringsgraden på nettverkssiden har avgjørende betydning for kvaliteten på de beregningene som kan gjennomføres med et transportberegningsverktøy av denne typen. Siden hovedtyngden av Park & Ride-reisene, som er fokusert i dette arbeidet, starter i Akershus, er det derfor ingen overraskelse at modellberegningene på noen punkter avviker fra de observasjonene som er innhentet i forbindelse med dette prosjektet. Hovedinntrykket fra avsnittet over er imidlertid at PARI-modellen gir et rimelig godt bilde av de kombinerte reisene som foretas i maksimaltrafikk-timen i morgenrushet. Det er grunn til å forvente at dette bildet kan fokuseres ytterligere gjennom en mer detaljert koding av transportnettet i områder hvor kodingen i dag er grov.

Det kan likevel være grunn til å kritisere modellspesifikasjonen på noen punkter som ikke går på generell kvalitet på inputdata, men er av en mer generell karakter. **Transportkvalitet på returreisen** kan spille en rolle, både for genereringen av P&R-reiser og rene kollektivreiser, men også for valg av innfartsparkeringsplass. Da dette utviklingsprosjektet ble gjennomført, var det ikke kodet kollektivtilbud for lavtrafikkperioder som er av samme detaljeringsgrad (og årstall!) som det som ble benyttet for morgenrushet. Det ble gjennomført forsøk med å benytte en variabel for det kodede motstrømstilbudet i morgenrushet som en tilnærming til lavtrafikktilbudet. Forsøket gav imidlertid ikke resultater som forventet. Det må her bemerkes at forsøket ble gjennomført på et tidlig stadium i modellutviklingen hvor modellstrukturen var en del grovere enn den som er presentert i dette dokumentet.

Innfartsparkeringsplassenes lokalisering i forhold til muligheter til andre ærend kan også spille en rolle for valget av innfartsparkeringsplass. Introduksjon av en dummyvariabel for attraksjon på innfartsparkeringsplasser med et slikt tilbud i umiddelbar nærhet kunne ha tilført modellen forklaringskraft. I forbindelse med gjennomføringen av postkortundersøkelsen og tellingene på innfartsparkeringsplassene ble det også vurdert å gjennomføre en registrering av hvilke handels- og servicetilbud som er lokalisert i gangavstand fra innfartsparkeringsplassene. Av hensyn til å skaffe frivillige mannskaper til den praktiske gjennomføringen av utdelingen av postkort og tellingene, ble den ekstra registreringen nedprioritert.

Introduksjon av **en variabel for bilhold** ville etter all sannsynlighet ha redusert betydningen av de kalibrerte alternativspesifikke konstantene noe. Dette ville imidlertid ha marginal innvirkning på modellens kvalitet.

PARI-modellen kjøres ved hjelp av en beregningsprosedyre i EMMA. Dette betyr at alle de eksogene inngangsdata til modellsystemet må være lagret i EMMA-databanken før modellberegningene settes igang. Beregningene gjøres i et scenario hvor hjelpesoner som representerer innfartsparkeringsplasser er kodet.

Beregningsprosedyren starter med rutevalgskjøring for kollektivtransport og privatbiltransport. I disse kjøringene blir generaliserte reisetider for de to reisemidlene beregnet. Disse inngår i beregning av nytteverdier for kollektiv og Park & Ride-alternativet. Som vi ser av logitmodellene under, er disse verdiene variabler for beregning av valgsannsynligheter for bilalternativet (P_b).

Neste trinn i beregningene er en rutevalgskjøring for bil med variabel etterspørsel. Gjennom denne kjøringen beregnes den elastiske etterspørselen for bilalternativet, rutevalget og generaliserte reisetider for bilalternativet simultant. Reisetidene herfra blir benyttet til å oppdatere reisetidene for bildelen av Park & Ride-alternativet. Ved hjelp av nyttefunksjonene med de alternativspesifikke konstantene innsatt i logitmodellene, beregnes OD-matriser for de tre reisemidlene med utgangspunkt i matrisen for elastisk trafikk. Logit-uttrykkene for de tre reisemidlene kan skrives:

$$5.2.xi) \quad P_b = \frac{e^{V_b}}{\sum_m e^{V_m}} = \frac{1}{1 + e^{(-V_b)} (e^{(V_k)} + e^{(V_{p\&r})})}$$

$$5.2.xii) \quad P_k = \frac{e^{V_k}}{\sum_m e^{V_m}} = \frac{1}{1 + e^{(-V_k)} (e^{(V_b)} + e^{(V_{p\&r})})}$$

$$5.2.xiii) \quad P_{p\&r} = \frac{e^{V_{p\&r}}}{\sum_m e^{V_m}} = \frac{1}{1 + e^{(-V_{p\&r})} (e^{(V_k)} + e^{(V_b)})}$$

OD-matrisen for elastisk biltrafikk summeres med den uelastiske matrisen og danner totaltrafikk for bilalternativet. Tilsvarende gjøres for kollektivmatrisene. Den beregnede OD-matrisen for P&R splittes i to delmatriser, en Ok-matrise (startzone - innfartsparkeringsplass) og en kD-matrise (innfartsparkeringsplass - målzone). Disse kan legges ut på vei- og kollektivnettet på vanlig måte.

Beregningsprosedyren gjennomføres først på et basis- eller referansescenario. Deretter kan den kjøres på scenarier som inneholder endrede inputdata. Dette kan være nye innfartsparkeringsplasser, vei- og/eller kollektivprosjekter, bom- og/eller kollektivtakster og parkeringskostnader. Effektene av tiltakene kan så analyseres ved sammenlikning med referansescenariet.

5.3 En modell som behandler valg av reisetidspunkt

Modellsystemet OLUF er utarbeidet i forbindelse med prosjektet *Køprising i et miljøperspektiv* (1996). Modellsystemet ble videreutviklet og benyttet i prosjektet *Køknostnader og kjøprising i bytrafikk* (1997) og skal utvikles videre og benyttes på nytt i prosjektet *Effektiv transportpolitikk i byområder* (1998/99). Modellsystemet OLUF består av fire delmodeller. Delmodellene representerer fire typiske trafikkperioder i Oslo og Akershus. To av disse modellene beskriver trafikksituasjonen i rushperiodene om morgenen og om ettermiddagen. Rushperiodene er delt inn i timesintervall for de tre timene med mest trafikk. De to andre modellene beskriver trafikksituasjonen i lavtrafikkperioder. Vi har en modell for trafikken i en gjennomsnittstime på dagtid, mellom rushperiodene, og en modell for trafikken i en gjennomsnittstime på kvelden og i helgene.

OLUF er også et kortsiktig modellsystem. OD-mønstrene i de ulike periodene er eksogene størrelser i modellen. OD-matrisene er estimert ved hjelp av den gravitasjonsmetodikken som er omtalt i avsnitt 5.1. Modellene beskriver trafikantenes valg av reisetidspunkt, reisemiddel og reiserute. De generaliserte kostnadene er avgjørende for trafikantenes valg. For biltrafikken er de generali-

serte kostnadene avhengige av kapasitetsutnyttelsen i veinettet. I hver delmodell beregnes det en likevektssituasjon som er karakterisert ved at ingen av trafikantene ønsker å endre sine valg av reisemiddel og reiserute. Det er ingen koblinger mellom delmodellene. Trafikanter som reiser i en rushperiode kan altså ikke velge å reise i en lavtrafikkperiode.

I OLUF-modellene har vi antatt at den systematiske delen av nytten for bilalternativet kan skrives

$$5.3.i) \quad V_{bil}^t = -k_{bil}^t \\ - 0.03 \text{ (reisetid)}^t \\ - 0.05 \text{ (avstand)}^t \\ - 0.05 \text{ (bompenger)}^t \\ - 0.05 \text{ (park.kost)}^t$$

hvor k_{bil}^t er en alternativspesifikk konstant som fanger opp alle uspesifiserte komponenter i den målbare nytten. Vi ser at nytten, eller mer korrekt, ulempen forbundet med valgalternativene i vårt tilfelle er en funksjon av de generaliserte kostnadene for alternativene pluss den alternativspesifikke konstanten. Toppskriften "t" er kun benyttet i rushmodellene, hvor trafikantene kan velge mellom tre timesintervaller for gjennomføring av sin bilreise. Rushmodellene er altså kombinerte modeller for valg av reisetidspunkt, reisemiddel og reiserute.

Den systematiske delen av nytten for kollektivalternativet kan skrives:

$$5.3.ii) \quad V_{koll}^t = -k_{koll}^t \\ - 0.03 \text{ (kjøretid)}^t \\ - 0.05 \text{ (takst)}^t \\ - 0.06 \text{ (ventetid)}^t \\ - 0.06 \text{ (gangtid)}^t \\ - 0.15 \text{ (antall bytter)}^t$$

I de to første versjonene av modellene var toppskriften for timesintervall utelatt fordi det var forutsatt et konstant kollektivtilbud i rushperiodene. I den versjonen som er under utvikling er målsetningen å kunne gjøre vurderinger knyttet til kostnadene ved ekstra tilbud i rushtiden og hvorledes disse bør slå ut i endrede takster. I denne versjonen er også kollektivtransportnettverket utvidet, slik at vi også fanger opp variasjoner i transporttilbudet innenfor ulike perioder i rushtiden. Nyttens forbundet med kollektivalternativet er, som vi ser, også en funksjon av de generaliserte kostnadene. I den nye versjonen har vi også med gang- og sykkeltrafikk med følgende nyttefunksjon:

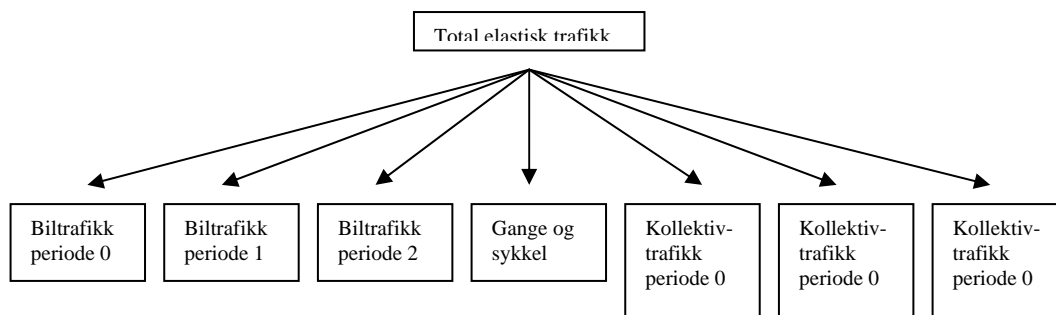
$$5.3.iii) \quad V_{gs} = k_{gs} + g \text{ (avstand)}$$

hvor k_{gs} er en alternativspesifikk og g er en parameter for avtandsfølsomhet for denne trafikken.

Vi kan nå formulere en logitmodell som angir valgsannsynligheten for hver av de sju alternative kombinasjonene av reisetidspunkt og reisemåter. Valgfunksjonene vil være av samme form som funksjonene i PARI-modellen. I realiteten vil disse sannsynlighetene være funksjoner av forskjellene i generaliserte kostnader for eksempel for bil i periode t og de seks andre spesifiserte alternativene i rushet. En slik funksjon kan spesifiseres for hvert av de sju alternativene.

Den totale etterspørselen innenfor hver periode (3 timer i rushmodellene og 1 gjennomsnittstime i modellene for de to lavtrafikkperiodene) er eksogent gitt i modellsystemet i form av OD-matriser. En del av den totale etterspørselen lar vi variere mellom de sju alternativene. For alle valgalternativ skiller vi, på samme måte som i PARI-modellen, mellom etterspørsel som uelastisk eller "bundet" til det konkrete alternativ og etterspørsel som er elastisk, som kan påvirkes av endringer i generaliserte kostnader. Uelastiske kollektivtrafikanter er trafikanter som ikke har førerkort eller tilgang til bil i husholdningen. Uelastiske bilturer er turer som foretas med tunge biler og turer foretatt av bilførere som bruker bil i arbeid. Uelastiske bilturer betraktes som en "bakgrunnstrafikk" som bare belaster kapasiteten i veisystemet. Den gjenværende etterspørsel velger mellom alternativene.

Figur 5.3 under illustrerer de valgene den elastiske trafikken i de to rushmodellene står overfor i den siste versjonen av modellsystemet. Transportstandarden knyttet til de ulike alternativene er avgjørende for fordelingen av trafikken mellom dem. I tillegg er det med en preferansekonstant som fanger opp trafikantenes prefererte fordeling over de mulige periodene



Figur 5.3 Modellstruktur i rushmodellene i OLUF

Beregningene gjennomføres i sin helhet innenfor EMME/2-systemet, hvor den kombinerte algoritmen for beregning av elastisk etterspørsel og rutevalg basert på generaliserte kostnader er mest benyttet. I de to delmodellene for lavtrafikk kan denne algoritmen benyttes direkte. Modellformuleringen gir her en likevekts-situasjon for reisemiddelvalg og rutevalg. I rushmodellene beregnes sublikevekter for hver timesintervall. Likevekten i hele 3 timersperioden er avhengig av de generaliserte reisetidene i alle timesintervall. Det er derfor nødvendig med en iterativ beregningsprosedyre som beregner disse sublikevektene sekvensielt og

hvor man hele tiden tar hensyn til at endrede biltrafikkvolum endrer reisetidene og dermed også etterspørselen. Disse endringene avtar imidlertid mellom iterasjonene, og til slutt blir endringene så små at de kan ignoreres. Denne iterasjonsprosedyren gir en total likevektstilstand for valg av reisetidspunkt, reisemiddel og reiserute.

Litteratur

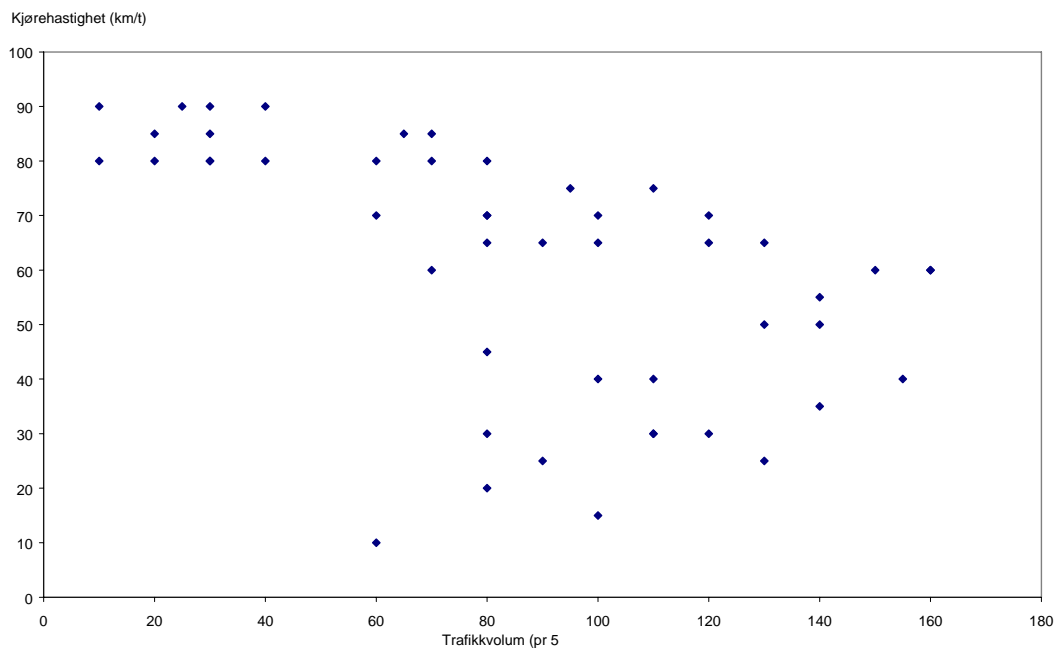
- Anas, A. 1983
Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models. *Transportation Research, Vol 17B, No 1, pp 13-23*, Pergamon Press Ltd.
- Ben-Akiva, M og Lerman, S R. 1985
Discrete choice analyses. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- de la Barra, T. 1989
Integrated land use and transportation planning. Decision chains and hierarchies. Cambridge University Press, Cambridge
- Inro. 1996
EMME/2 User's Manual, Software Release 8.0
- Johansen, K W. 1995
TP10-modellene, konsistens og følsomhet. En sammenlikning av reisemiddelvalgmodellene benyttet i TP10-byene. Oslo, Transportøkonomisk institutt. Arbeidsdokument TP/0905/95
- Johansen, K W. 1992
Konsekvensberegninger av kollektivtiltak, modeller og datagrunnlag i Oslo og Akershus. Oslo, Transportøkonomisk institutt. Arbeidsdokument TP/0352/92
- Johansen, K W. 1991
Estimering av reisematriser. Oslo, Transportøkonomisk institutt. TØI notat 0988/1991
- Larsen, O I og Rekdal, J. 1997
Transportmodeller og nytte/kostnadsmetodikk. Oslo, Transportøkonomisk institutt. TØI notat 1058/1997
- Larsen, O I og Rekdal, J. 1996
Køprising i et miljøperspektiv – En simulering av differensierte bompenger i Oslo. Oslo, Transportøkonomisk institutt. TØI rapport 324/1996
- Ortuzar, J de D og Willumsen, L G. 1990
Modelling transport. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, England
- Rand, L. 1997
Retro, En integrert persontransportmodell for Oslo og Akershus. Oslo, Transportøkonomisk institutt. TØI notat 1084/1997
- Rand, L. 1994
Sammenligning av reisegenereringsmodeller for reiser over 10 mil. Oslo, Transportøkonomisk institutt. Arbeidsdokument TØ/0633/94

- Rekdal, J. 1996
PARIMO, EMMA-basert resemiddelvalgmodell for Oslo og Akershus, med Park & Ride modellert som eget resemiddel. Oslo, Transportøkonomisk institutt. Arbeidsdokument TRU/0612/1996
- Rekdal, J. 1996
Veileder for koding av kollektivruter i EMMA. Oslo, Transportøkonomisk institutt. Arbeidsdokument TRU/0583/1996
- Rekdal, J. 1996
Etablering av OD-matriser for Oslo og Akershus. Oslo, Transportøkonomisk institutt. Arbeidsdokument TRU/0568/96
- Sheffi, Y. 1985
Urban transportation networks, equilibrium analysis with mathematical programming methods. Prentice-Hall, New Jersey
- Snickars, F og Weibull, J W. 1977
A minimum information principle. Theory and practice. *Regional Science and Urban Economics* 7, pp 137-168
- Spiess, H og Florian, M. 1989
Optimal strategies. A new assignment model for transit networks. *Transportation Research B Vol 23B 1989, pp 83-102*
- Train, K. 1986
Qualitative choice analyses pp 15-54. MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Widlert, S. 1993
Estimering av modeller på Oslo-data. Stockholm, Transek
- Widlert, S og Algers, S. 1992
Hushållsbaserade trafikmodeller för konsekvensanalyser i flera dimensioner. Stockholm, Bygghörsningsrådet. R36:1992

Vedlegg 1:

Nærmere om vd-funksjoner

Man kan gjerne foreta en registrering av hastigheten til alle biler som passerer et bestemt punkt på en vei fra tidlig om morgenen til utpå formiddagen. Hvis man teller opp alle biler som passerer innenfor fem minutters perioder og regner ut gjennomsnittshastigheten for hvert intervall, kan man godt få en punktsverm som antyder en sammenheng mellom gjennomsnittlig hastighet og trafikkvolum som vist i figur V1.1. Her ser vi tydelig at hastigheten ved registreringspunktet synker når trafikkvolumet øker. Vi ser også at antallet biler som passerer ser ut til å synke når hastigheten er lav. Figur V1.1 gir imidlertid et inntrykk av at det er mulig å estimere en kurve som representerer den viste punktsvermen, selv om figuren antyder stor variasjon i trafikkvolumene spesielt ved lave hastigheter.



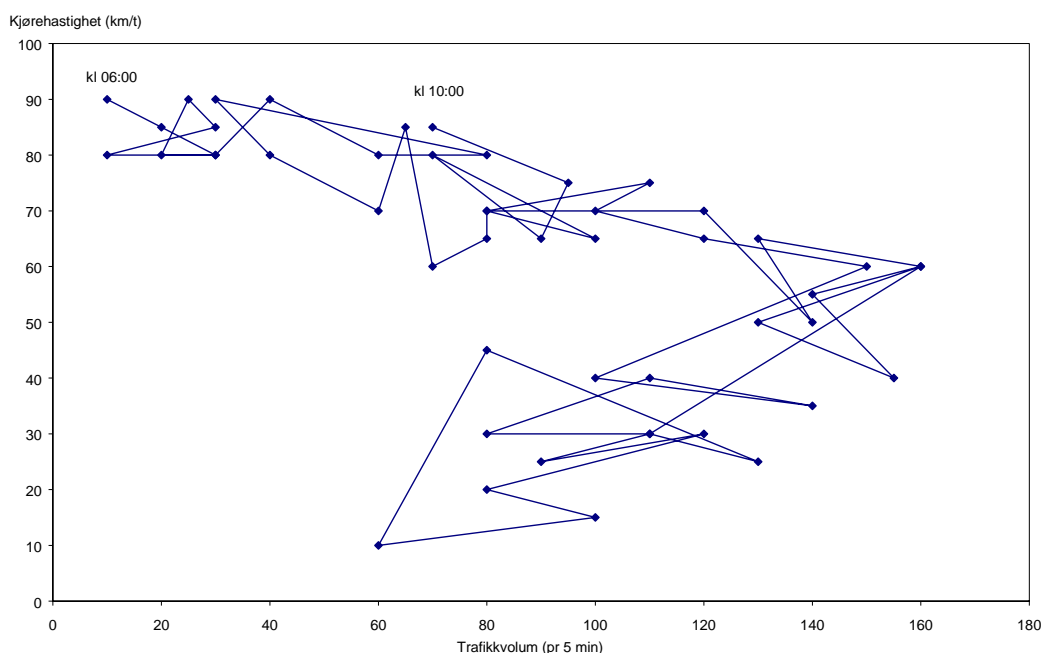
Figur V1.1: Observert sammenheng mellom gjennomsnittlig kjørehastighet og trafikkvolum ved et gitt punkt i veinettet (I).

Hvis vi trekker en linje mellom punktene i figur V1.1 etter det tidsintervall observasjonene representerer, får vi et litt annet bilde av fremkommeligheten ved registreringspunktet. Dette er illustrert i figur V1.2. Linjen starter øverst til venstre med observasjonen som representerer tidsperioden mellom kl 0600 og 0605, og ender som indikert i det punktet som representerer tidsperioden mellom kl 0955 og 1000. Denne figuren gir ikke inntrykk av at trafikkvolumene på registreringspunktet ligger pent langs en hastighets-volum-kurve. Her ser vi mer

tydelig at trafikkvolumene synker ved lave hastigheter. Dette henger sammen med at følgende sammenheng vil gjelde pr definisjon:

$$\text{Kjøretøy/tidsenhet} = \text{kjøretøy/km} * \text{hastighet}$$

Det vil i praksis være en fysisk grense knyttet til hvor mange kjøretøyer det er plass til pr kilometer vei. Når bilene beveger seg og holder en viss avstand, blir biltettheten på veien enda mindre enn den fysiske grensen. Dette gir opphav til at antallet biler pr tidsenhet synker når hastigheten reduseres, som figur 3.4 indikerer. Av hensyn til de algoritmer som benyttes i veivalgsberegninger kreves imidlertid en entydig sammenheng mellom trafikkvolumer og hastigheter på lenkene i et veinettverk. Den type sammenheng som er vist i figur V1.2 kan derfor ikke representeres.



Figur V1.2: Observert sammenheng mellom gjennomsnittlig kjørehastighet og trafikkvolum ved et gitt punkt i veinettet (II)

Det vi i beste fall kan oppnå med registreringer og målinger av denne type er derfor å få indikasjoner om hvordan kjørehastighetene er ved fri trafikkflyt, og hvordan hastighetene påvirkes av trafikkvolumer opp imot kapasitetsgrensen. I figur V1.2 ser vi at fri flyt-hastigheten ved dette registreringspunktet ser ut til å ligge rundt 80-90 km/t, og at maksimal kapasitet ser ut til å ligge rundt 150-160 biler pr 5 minutter.

Når man skal etablere vd-funksjoner til bruk i nettverksmodellene for veitrafikk, må man bare erkjenne at man egentlig ikke har noen god teori som kan representeres ved en slik funksjon. Man bør derfor gi avkall på en korrekt beskrivelse av sammenhengene mellom trafikkvolum og reisetider på hver enkelt veilenke, og heller tilstrebe et sett med vd-funksjoner som totalt sett gir realistiske kjøretider mellom sonene i et købelastet veinett. Disse funksjonene blir dermed noe vi kan kalle pseudo-vd-funksjoner.

Vedlegg 2: Nærmere om Gumbel-fordelingens egenskaper

Teorien for logitmodeller forutsetter at det stokastiske leddet, X_i , i nyttefunksjonen er fordelt etter en bestemt funksjon som kalles Gumbel-funksjonen.⁷ Fordelingen for denne funksjonen med fordelingsparametre (a,b) er gitt ved

$$V2.1) \quad \Pr\{X \leq x\} = F(x) = \exp(-e^{-b(x-a)})$$

Sannsynlighetstettheten til denne funksjonen er gitt ved

$$V2.2) \quad f(x) = dF(x)/dx = be^{-b(x-a)} F(x)$$

Parameteren a i disse funksjonene angir plasseringen av fordelings "toppunkt" (tilsvarer forventningsverdien i Normalfordelingen, som i motsetning til Gumbel-fordelingen er symmetrisk). Parameteren b angir fordelings spredning (tilsvarer variansen eller standardavviket i Normalfordelingen). Forventningsverdien for Gumbel-fordelte variable er gitt ved:

$$V2.3) \quad EX = a + 0.577/b,$$

hvor 0.577 er Eulers konstant. Standardavviket til fordelingen er gitt ved

$$V2.4) \quad \sigma^X = \pi / (b \sqrt{6}) \approx 1.28 / b$$

Vi ser at variansen $(= (\sigma^X)^2)$ er stor når spredningsparameteren b er liten og vice versa. Av formlene for Gumbel-fordelingens forventning og standardavvik finner vi at $G(0,1)$ gir $\sigma^X \approx 1.28$ og $EX = 0.577$. Gumbel-fordelingen er skjev med hale mot høyre, slik at forventningsverdien er plassert til høyre for den verdien som gir fordelings toppunkt. Gumbel-fordelingen har tre viktige egenskaper som muliggjør utledningen av de relativt enkle logitmodellformuleringene⁸:

Egenskap 1

Hvis $X_1 \sim G(a,b)$ (dvs Gumbel-fordelt med fordelingsparametre a og b), så er

$$V2.5) \quad X_2 = X_1 + m, \sim G(a+m,b).$$

Denne egenskapen innebærer at dersom en konstant tillegges en Gumbel-fordelt stokastisk variabel, så flyttes Gumbel-fordelingen tilsvarende langs x-aksen.

⁷ På samme måte som skrivemåten for Normalfordelingen med forventning 0 og varians 1 ofte forkortes med $N(0,1)$, forkortes Gumbel-fordelingen med fordelingsparametre a og b med skrivemåten $G(a,b)$.

⁸ Utledning av bevisene for disse egenskapene finnes bl.a i Ben-Akiva og Lerman (1985)

Egenskap 2

Hvis $X_1, X_2, \dots, X_n \sim G(a_1, b), G(a_2, b), \dots, G(a_n, b)$ og statistisk uavhengige, så er

$$V2.6) \quad X^{\max} = \max(X_1, X_2, \dots, X_n), \sim G(a^{\max}, b), \text{ hvor}$$

$$V2.7) \quad a^{\max} = \ln[\exp(ba_1) + \exp(ba_2) + \dots + \exp(ba_n)]/b$$

Denne egenskapen innebærer at maksimalverdien av Gumbel-fordelte stokastiske variabler også er Gumbel-fordelt med fordelingsparametre som kan utledes fra parametrene til variablene. Logaritmeuttrykket i a^{\max} er den såkalte logsummen. Vi merker oss at X-ene forutsettes å ha identisk varians.

Egenskap 3

Hvis $X_1, X_2, \dots, X_n \sim G(a_1, b), (a_2, b), \dots, (a_n, b)$ og statistisk uavhengige, så er

$$V2.8) \quad \Pr\{X_i \geq X_j \text{ for alle } j \neq i\} = \exp(ba_i) / (\exp(ba_1) + \exp(ba_2) + \dots + \exp(ba_n))$$

Denne egenskapen kan utledes fra de to foregående egenskapene og sammenhengen mellom $F(x)$ og $f(x)$. Når disse egenskapene benyttes på formelen for nytte (U_i) finner vi for $X_i \sim G(0, b)$ at

$$V2.9) \quad P_i = \Pr\{U_i > U_j \text{ for alle } j \neq i\} \\ = \exp(bV_i) / (\exp(bV_1) + \exp(bV_2) + \dots + \exp(bV_n))$$

som er det velkjente logit-uttrykket. Formelen angir sannsynligheten for at personen velger alternativ i som en funksjon av den systematiske delen av nytten for hvert alternativ.