

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.

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 programpakkenes 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 programpakkenes 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 **kollektivtrafikanternes 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 omstigningsuleppe 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 ulik 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.