

NDP-1: Verktøy til valg av prosjektpakker Når prosjektene er avhengige av hverandre

Olga Ivanova
Harald Minken

Denne publikasjonen er vernet etter Åndsverklovens bestemmelser, og Transportøkonomisk institutt (TØI) har eksklusiv rett til å råde over artikkelen/ rapporten, både i dens helhet og i form av kortere eller lengre utdrag.

Den enkelte leser eller forsker kan bruke artikkelen/rapporten til eget bruk med følgende begrensninger:

Innholdet i artikkelen/rapporten kan leses og brukes som kildemateriale.

Sitater fra artikkelen/rapporten forutsetter at sitatet begrenses til det som er saklig nødvendig for å belyse eget utsagn, samtidig som sitatet må være så langt at det beholder sitt opprinnelige meningsinnhold i forhold til den sammenheng det er tatt ut av. Det bør vises varsomhet med å forkorte tabeller og lignende. Er man i tvil om sitatet er rettmessig, bør TØI kontaktes. Det skal klart fremgå hvor sitatet er hentet fra og at TØI har opphavsretten til artikkelen/rapporten. Både TØI og eventuelt øvrige rettighetshavere og bidragsyttere skal navngis.

Artikkelen/rapporten må ikke kopieres, gjengis, eller spres utenfor det private område, verken i trykket utgave eller elektronisk utgave. Artikkelen/rapporten kan ikke gjøres tilgjengelig på eller via Internett, verken ved å legge den ut på nettet, intranettet, eller ved å opprette linker til andre nettstedene enn TØIs nettsider. Dersom det er ønskelig med bruk som nevnt i dette avsnittet, må bruken avtales på forhånd med TØI. Utnyttelse av materialet i strid med Åndsverkloven kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

Forord

Denne rapporten er sluttdokumentasjonen av prosjektet ”Prosjektvalg på strategisk nivå”, som ble finansiert av Samferdselsdepartementets program for overordnet transportforskning (POT-programmet). Hensikten med prosjektet har vært å lage et dataprogram som kan være til hjelp ved sammensetning av prosjektpakker i de tilfellene der prosjektene er gjensidig avhengige av hverandre. Forskningsleder Harald Minken har vært prosjektleder for prosjektet. Rapporten er skrevet av M Sc Olga Ivanova og Harald Minken. Kvalitetssikrer har vært avdelingsleder Kjell Werner Johansen, og Laila Aastorp Andersen har tilrettelagt rapporten for trykking.

Dataprogrammet som er laget i prosjektet, finns tilgjengelig ved henvendelse til TØI. Programmet er laget av Olga Ivanova. Brukerhåndbok til programmet er tatt med i rapporten som vedlegg. De to siste vedleggene er skrevet av Olga Ivanova. Et arbeidsdokument utarbeidet av Harald Minken, cand polit Hanne Samstad og Olga Ivanova om CES-modellen og aggregering i den, er tilgjengelig på forespørsel.

Oslo, juli 2003

Transportøkonomisk institutt

Sønneve Ølnes
konst.instituttstjef

Kjell Werner Johansen
avdelingsleder

Innhold

Sammen drag	I
Summary	i
1 Bakgrunn	1
2 Behovet for formelle planleggingsverktøy	2
2.1 En matematisk modell av planleggingsproblemet	3
2.2 Nytten av en matematisk modell av planleggingsproblemet	4
2.3 Tendenser i forskningen	6
3 Prosjektvalg blant avhengige prosjekter	8
3.1 Avhengighetsproblemetets historie i Norge	10
4 Nettverksdesignproblemet med brukerlikevekt	12
4.1 Teknisk beskrivelse av NDP med brukerlikevekt	14
4.2 Noen trekk ved det utviklede dataprogrammet	17
4.2.1 Etterspørselen	17
4.2.2 Test	19
5 Våre valg	20
6 Konklusjon	22
Litteraturliste	24
 Vedlegg	
Vedlegg 1 Brukerhåndbok	29
Vedlegg 2 Detailed mathematical derivation of the aggregation rule for nested Logit travel demand functions	67
Vedlegg 3 Implementation of the model for Oslo/Akershus case study	71

Sammendrag:

NDP-1: Verktøy til valg av prosjektpakker når prosjektene er avhengige av hverandre

Avhengighet mellom prosjekter betyr at den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av et prosjekt ikke er noen veldefinert størrelse før vi har presisert hvilke andre prosjekter som blir implementert sammen med det. Siden en da må vurdere kombinasjoner av prosjekter, er regnearbeidet for å finne beste prosjektpakke ofte svært stort.

Det rette verktøyet for å angripe slike problemer er nettverksdesignproblemet (NDP). Dette prosjektet har utviklet et modellverktøy som gjør det mulig å formulere og løse NDP-problemer av ulik grad av kompleksitet. Brukergrensesnittet krever ingen spesielle matematiske kunnskaper. Verktøyet er transportmiddelovergripende og beregner brukerlikevekt i veg- og kollektivmarkedene simultant. I tilknytning til programmet er det utviklet en systematisk metode for aggregering av soner, og en litt mindre systematisk måte for aggregering av nettverk.

Vi venter oss at verktøyet vil kunne fungere som en *idegenerator* i ulike faser av arbeidet med en strategisk transportplan for en by eller en transportkorridor.

Summary:

NDP-1: Tool for selecting best packages of mutually dependent projects

Interdependency between projects means that the net present value of a project is ill defined until the other projects that are implemented simultaneously have been specified. We are forced to consider combinations of projects, which may increase the work involved in selecting the projects enormously. This situation frequently occurs in urban transport planning.

The tool to address such problems is the Network Design Problem (NDP) with user equilibrium. A modelling tool to formulate and solve a multi-modal NDP with simultaneous user equilibrium in the car and public transport market has been developed. The user interface does not require mathematical skills. Since the representation of the transport system must be kept simple, a systematic method of aggregating the zonal system of a transport model has been incorporated, along with a somewhat less systematic method of simplifying the network.

We expect the tool to be used as a generator of ideas at various stages of the work with a strategic transport plan for a city or a transport corridor.

*NDP-1: Verktøy til valg av prosjektpakker når
prosjektene er avhengige av hverandre*

1 Bakgrunn

Etatens forslag til Nasjonal transportplan 2006-2015 er formulert på et mer strategisk nivå enn tidligere. Både veg- og jernbaneinvesteringene er til en viss grad konsentrert i og rundt de store byene, der vegvesenet bl.a. vil bygge ut de mest høytrafikkerte stamvegene til firefeltsveg. Det legges opp til sterkere statlig styring med brukerfinansieringen på stamvegnettet. Vegprising fremmes som et mulig virkemiddel i storbyregionene. Alle de store byene har i dag avtaler som bruker bompenger til å finansiere infrastrukturtiltak på vegene, og i stigende grad også kollektivtransportinfrastruktur. Byutredningen for Oslo og Akershus er et godt eksempel på at det nå planlegges å utvide slike avtaler til også å omfatte arealbruk, drift av kollektivtransport og ulike former for restriksjoner på bilbruk.

Dersom en slik innretning holder seg gjennom den politiske behandlingen, er det åpenbart at det både trengs planprosesser og planleggingsverktøy som kan foreta en første grov vurdering av de ulike vegprosjektene og kollektivprosjektene sett i sammenheng, foreta en riktig avveining mellom investering og drift og sette sammen en riktig finansieringsplan med brukeravgifter og statlige tilskudd. I den sammenhengen er det to problemer for planleggingen, nemlig dagens oppsplittede institusjonelle forhold på den ene sida og den store graden av gjensidig avhengighet mellom de påtenkte prosjektene og tiltakene på den andre sida.

Vårt prosjekt har hatt som mål å utvikle et planleggingsverktøy som kan bidra til å belyse omfanget av det sistnevnte problemet og gjøre det lettere å finne fram til den beste helhetlige planen. Eksisterende planleggingsverktøy er i stand til å analysere og evaluere et mindre antall foreslåtte pakker av tiltak, og eksisterende planprosesser innebærer deretter at den nærmere vurderingen av tiltakene foregår isolert tiltak for tiltak. Men nettopp ved avhengighet mellom prosjektene er det behov for å vurdere et stort antall mulige kombinasjoner, og lønnsomheten av det enkelte tiltak kan egentlig ikke bestemmes isolert.

2 Behovet for formelle planleggingsverktøy

Arbeidet med å lage strategiske transportplaner er preget av mange og uklare målsetninger som delvis er i konflikt med hverandre, kompliserte institusjonelle rammer, spillsituasjoner, politiske føringer på virkemiddelbruken, forhandlinger, tau-trekking og motepregede oppfatninger. Det er ikke nødvendigvis vår oppgave som transportøkonomer, modellfolk og planleggere å forandre dette. Noen ganger kan de motepregede oppfatningene være riktige, de politiske motsetningene kan gjenspeile reelle interessekonflikter, og de institusjonelle begrensningene kan gjenspeile en fornuftig oppdeling av makt og myndighet. Vår oppgave er snarere å hjelpe aktørene til å få oversikt – over hvilket handlingsrom de har, over de sannsynlige konsekvensene av ulike strategier, og over det reelle grunnlaget for interessekonfliktene.

En formell planleggingsmodell behøver ikke brukes som et maktinstrument, men kan også brukes til å opplyse uten å undertrykke. Den behøver ikke komme med fasitsvarene til slutt, men kan tas fram for å belyse valgmuligheter på mange trinn i planleggingsprosessen. Hva blir konsekvensene for miljøet av å skjerpe målsetningen for ulykkesreduksjon? Hva kunne vært oppnådd ved å ta i bruk et nytt virkemiddel for dette formålet? Hvis vi forbedrer den ene vegstrekningen, vil køene bare flytte seg til den neste? Hvem taper og hvem vinner på den foreslåtte finansieringsmåten?

Det er mange forutsetninger for at en formell planleggingsmodell skal fungere slik, men to av dem er at modellen er enkel og rask, slik at den kan utforske mange muligheter på kort tid når det er behov for det, og at den er pålitelig. Disse to tingene står delvis i motsetning til hverandre, og denne motsetningen har vi forsøkt å gjøre minst mulig i prosjektet ”Prosjektvalg på strategisk nivå”. Slik sett er prosjektet del av en internasjonal trend i retning av ”skisseplanleggingsverktøy” som kan veilede ved strategiske beslutninger.

Et vanlig brukt formelt planleggingsverktøy består av to deler, en transportmodell og et nytteberegningsverktøy. Problemstillingen som et slikt verktøy skal besvare, er vanligvis ”Hvordan kan vi bruke virkemidlene (de enkelte foreslåtte infrastrukturforbedringene) til å gjøre den samfunnsøkonomiske lønnsomheten størst mulig?” Hva enten vi bare har to alternative måter å bruke virkemidlene på (gjennomfør/gjennomfør ikke) eller uendelig mange, så er dette et optimeringsproblem. Problemstillingen blir i prinsippet ikke annerledes om vi utvider antall virkemidler til også å omfatte prisvirkemidler og restriksjoner, eller om vi forsøker å ta hensyn til flere mål enn samfunnsøkonomisk lønnsomhet. Andre målsetninger kan vi for eksempel innarbeide som bibetingelser i optimeringsproblemet.

2.1 En matematisk modell av planleggingsproblemet

Anta at vi har n ulike virkemidler, nummerert fra 1 til n . La x_i betegne intensiteten i bruken av virkemiddel i . Hvis det dreier seg om et infrastrukturprosjekt, kan x_i være 1 hvis vi velger å realisere dette prosjektet, og 0 hvis vi dropper det. Hvis det dreier seg om et prisvirkemiddel, kan x_i være et hvilket som helst positivt tall, slik som 10 (kroner) eller 50 (kroner). Lista $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ uttrykker da en *strategi*: Vi vil bruke virkemiddel 1 med intensiteten x_1 , osv. Hvis det dreier seg bare om infrastrukturprosjekter, kaller vi strategien for en prosjektpakke eller en prosjektkombinasjon. Lista består da bare av nuller og ettall. Oslopakke 1 og 2 kan uttrykkes på denne måten.

La oss kalle mengden av alle mulige strategier som kan dannes med disse n virkemidlene for X . X vil være begrenset på ulike måter, for eksempel ved at noen av virkemidlene bare kan anta verdien 0 eller 1, og ved at vi setter en øvre grense for prisvirkemidlene. Likevel kan X inneholde svært mange strategier, ja ofte uendelig mange (dersom prisene kan være et hvilket som helst beløp). Dersom strategien er en rein prosjektpakke, vil det være 2^n ulike strategier i X . Hvis vi bare har to prosjekter, vil det være $2^2 = 4$ ulike strategier, nemlig realiser det første men ikke det andre, realiser det andre men ikke det første, realiser begge og realiser ingen. Hvis det er 10 prosjekter, er det $2^{10} = 1024$ ulike mulige prosjektkombinasjoner.

Hver strategi kan kodes i en transportmodell. Ut av transportmodellen kommer en fullstendig oversikt over virkningene av strategien på reisekostnadene, antall reiser mellom destinasjonene, trafikkstrømmene på lenkene, og alle andre opplysninger som trenges til nyttekostnadsanalysen av strategien (forutsatt at vi har et fullstendig modellsystem med moduler for ulykkesberegninger, miljøberegninger, beregninger av kostnadene for kollektivselskapene). Anta at vi tar disse opplysningene samt de gitte investeringskostnadene, gjennomfører nyttekostnadsanalysen og ender opp med et tall, netto nåverdi av strategien.

Dette kan vi i prinsippet gjøre med enhver strategi. Vårt planleggingssystem, bestående av transportmodellen og nytteberegningen, kan derfor sees som en matematisk funksjon som til enhver liste $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ tilordner et tall. La oss kalle denne funksjonen $W = W(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Vi antar at samfunnsøkonomi er vårt mål, altså at W er en *målfunksjon* som skal gjøres størst mulig.

Vi må imidlertid holde oss innafor budsjettet. La oss se bort fra vedlikehold, skatter og avgifter, og regne med at det offentlige bare har investeringsutgifter, I . Investeringsutgiftene I er også en funksjon av virkemiddelbruken, nemlig hvilke prosjekter vi tar med i strategien. Altså $I = I(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Investeringsutgiftene må være mindre enn de tilgjengelige midlene, som vi antar består av inntektene av de avgiftene som kreves inn i strategien, $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$, pluss en utenfra gitt sum R_0 (statens bevilgning til investeringsformål).

Hva enten vi bare beregner noen få alternativer eller har en strategi bestående av mange prosjekter samt ulike priser og avgifter og restriksjoner, kan vi nå uttrykke dette planleggingsproblemet slik: Finn den $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ som gjør W størst

mulig, gitt budsjettbetingelsen $I(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq R(x_1, x_2, \dots, x_n) + R_0$. Eller matematisk uttrykt¹

$$\text{Max}_{x \in X} W(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{gitt } I(x_1, x_2, \dots, x_n) - R(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq R_0$$

La oss ta et eksempel. Anta at vi har n *delelige* prosjekter. Med det mener vi at vi kan gjennomføre halvparten, tredjeparten eller for den saks skyld fjortendeparten av prosjektet hvis vi vil, og likevel oppnå halvparten (tredjeparten, fjortendeparten ...) av nytten til halvparten (tredjeparten, fjortendeparten ...) av anleggskostnadene. Dette kan virke spesielt, men blir mer realistisk hvis vi har en stor mengde prosjekter, hvorav en gruppe gir en viss nytte til en viss kostnad, en annen gruppe gir en annen nytte til en viss kostnad, osv. Vi kan da betrakte de prosjektene som tilhører samme gruppe som ett prosjekt, og velge å realisere hele eller deler av dette prosjektet. La x_i være andelen av prosjekt i som realiseres, og la b_i være netto nytte og c_i anleggskostnaden ved prosjekt nummer i . Betrakt problemet

$$\text{Max}_{x \in X} \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad \text{gitt } \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq R_0$$

Dette er et problem med en kjent løsning. Løsningen er å velge prosjekter etter nyttekostnadsbrøken b_i/c_i inntil budsjettet er oppbrukt.² Dette er faktisk den teoretiske begrunnelsen for å bruke nyttekostnadsbrøken som valgkriterium. I dette tilfellet er altså gevinsten ved å bruke en matematisk formulering av planleggingsproblemet at vi finner en teoretisk begrunnet allmenn handlingsregel. I andre tilfeller gjør vi ikke det, men må finne en effektiv framgangsmåte (en *algoritme*) for å løse det matematiske problemet fra gang til gang.

2.2 Nytten av en matematisk modell av planleggingsproblemet

En matematisk formulering av planleggingsproblemet er særlig nyttig i to tilfeller. For det første dersom det kan avledes en allmenn handlingsregel av den matematiske analysen av problemet. For det meste gjelder det dersom virkemidlene er kontinuerlige, altså ikke enten 0 eller 1. Å sette pris lik grensekostnad kan være en slik handlingsregel. Og for det andre dersom antall mulige strategier er stort. I det tilfellet vil litteraturen om slike problemer kunne gi oss algoritmer som gjør det mulig å løse problemet på rimelig tid.

¹ $x \in X$ betyr at vi skal søke over alle mulige strategier (dvs. alle strategier som er elementer i X).

² Det er bare det siste prosjektet som blir oppdelt, slik at det passer innenfor budsjetttrammen. Dette med deleligheten var altså ikke så fryktelig farlig likevel.

På den andre sida må en tenke over hva som skal til for at den matematiske formuleringen skal være en god gjengivelse av det virkelige problemet. Den matematiske formuleringa krever blant annet:

- at virkningsområdet er godt avgrenset. Transportmodellen må omfatte hele det området og alle de transportmåtene der en kan vente virkninger, og det må bare være ubetydelige virkninger som ikke fanges opp i modellen. Venter man for eksempel arealbruksvirkninger, må man ha en arealbruksmodell, ellers blir man nødt til å ta resultatene av en formell matematisk behandling med en stor klype salt.
- at det finnes en beslutningstaker (eller et demokratisk organ) med makt og myndighet til å løse akkurat det problemet som er matematisk formulert. I motsatt fall blir det hele bare en øvelse som kan vise hva som kunne vært oppnådd dersom de institusjonelle rammene hadde vært annerledes.
- at beslutningstakeren har klare mål, og at det er nettopp disse målene som kommer til uttrykk i målfunksjonen W eller i form av ekstra bibetingelser til problemet. I motsatt fall vil resultatet ikke bli brukt.
- at den underliggende transportmodellen, som blir brukt som grunnlag for å beregne W for hver enkelt strategi, er pålitelig og forståelig. I motsatt fall er hele øvelsen bortkastet.

Hva kan så være alternativet til en matematisk problemformulering? Det må være å holde seg til empirisk baserte handlingsregler (som den nederlandske ABC-strategien) eller å bygge på teoretisk baserte handlingsregler avledet i andre sammenhenger. Ofte er det *det* man gjør i praksis, men i noen tilfeller er det systemet vi studerer så komplisert at det er vanskelig å si om teoretisk baserte regler vil gjelde, og så spesielt at det er vanskelig å si om empirisk baserte regler lar seg overføre fra der hvor de er utledet.

Derfor er det viktig med matematisk baserte analyser både for å analysere enkelttilfeller og for å sjekke, modifisere, videreutvikle og finne gyldighetsområdet til generelle handlingsregler.

La oss ta noen eksempler igjen. I EU-prosjektet SPECTRUM, der TØI deltar, er oppgava å finne ut hvordan ulike virkemidler samvirker eller motarbeider hverandre når det gjelder å nå ulike mål, som samfunnsøkonomi og fordelingsmål. Hvordan kan for eksempel vegprising, restriksjoner og infrastrukturforbedringer brukes sammen for å oppnå samfunnsøkonomi uten store negative virkninger for svake grupper? Det viser seg at lite er kjent om dette. Noen teoretiske regler kan gis, men om de kan anvendes uten videre i mer realistiske sammenhenger er uklart. Empirisk avledede regler finns ikke. I prosjektet vil vi løse matematiske planleggingsproblemer av samme slag som ovenfor for å komme fram til handlingsregler, men om vi lykkes gjenstår å se.

I den nettbaserte databasen KonSULT, som TØI har vært med på å bygge opp, er empirisk og modellbasert kunnskap om en lang rekke virkemidler i bytransport samlet. Råd om hvordan hvert virkemiddel virker i forhold til seks ulike mål blir gitt, og vink om hvordan virkemidlene kan kombineres blir også gitt. Mye av denne kunnskapen er basert på ekspertskjønn, som tar opp i seg både modellberegninger og empiriske erfaringer. Overraskende mange steder anføres det at vi

veit for lite. Uansett vil vi ha bedre grunnlag for å forme ut en strategi mer nøyaktig hvis vi gjennomfører modellberegninger og nytteberegninger i det enkelte tilfellet, og sammenlikner resultatet med det som er kjent fra før.

Mye av det samme kan sies om trafikksikkerhåndboka og miljøhåndboka. Det er svært nyttige redskaper i planleggingen, men den beste måten å gjøre dem enda bedre på, er å gjennomføre egne analyser og etterstudier.

2.3 Tendenser i forskningen

Det finns mange ulike tendenser når det gjelder anvendelsen av denne typen matematiske optimeringsproblemer på transport.

I den ene opererer vi med en hvilken som helst transportmodell, som vi kjører gjentatte ganger etter en oppskrift (en algoritme) som sier hvordan vi skal endre strategien fra kjøring til kjøring. Etter et visst antall kjøring (vanligvis mellom 30 og 100) når vi fram til en strategi som vi ikke klarer å forbedre. Denne metoden er beskrevet i PROSPECTS' metodehåndbok (Minken et al 2003) og er utviklet rundt 1992 ved universitetet i Leeds (se metodehåndboka for referanser). Den kan gi en optimal sammensetning av en håndfull virkemidler, men egner seg mindre godt til å vurdere prosjektpakker (0-1 virkemidler). Derfor vil den oftest bli anvendt med bare ett eller to infrastrukturprosjekt og noen få prisvirkemidler. Å utvide antall virkemidler fører lett til for lang kjøretid, spesielt med modeller som tar flere timer å kjøre en gang.

En annen tendens retter seg spesielt inn på å finne den beste sammensetningen av infrastrukturprosjekter. Dette kalles nettverksdesignproblemet (NDP). Det bygges gjerne en egen modell for hver anvendelse. Det finns mange varianter: Infrastrukturforbedringene kan være gradvise (utvidelse av vegbredde og liknende) eller 0-1 (helt nye vegstrekninger). Etterspørselen kan være gitt eller variabel. Men det viktigste skille går mellom varianter som tar hensyn til kø og varianter som ikke gjør det. Hvis man skal ta hensyn til kø, må man finne *brukerlikevekt* i nettverket for hver ny strategi man vurderer. Det vil si at hver bruker skal finne den eller de rutene som gir minst kostnad, gitt at de andre har funnet sine ruter. Denne likevekts-situasjonen tar det tid å finne. Den mest hensiktsmessige måten å gjøre det på, er å inkludere vilkårene for brukerlikevekt som nye bibetingelser i optimeringsproblemet. Vi har altså et totrinns optimeringsproblem, nemlig å finne optimal prosjektkombinasjon, gitt at brukerne skal finne optimale ruter.

Nettverksdesignproblemet formuleres alltid for en bestemt transportmåte. Prosjektvalget tar altså ikke hensyn til at det finnes prosjekter både i vegsystemet og i kollektivsystemet. Vårt prosjekt, "Prosjektvalg på strategisk nivå", er faktisk det første som tar hensyn til dette, så langt vi kjenner til. Videre er det bare de aller siste årene at problemet er løst for en kombinasjon av infrastrukturprosjekter og brukeravgifter. Vårt prosjekt gjør det, men på en litt forenklet måte. Den alvorligste begrensningen ved metoden er at problemet (i 0-1 varianten) er NP-hardt. Med det menes at kjøretida som en funksjon av antall detaljer i nettverket (noder

og lenker) vokser raskere enn en hvilken som helst polynomisk funksjon.³ Den underliggende transportmodellen må altså være enkel. Det vil være en balansegang mellom realisme i nettverket og grundighet i letingen etter den beste prosjektkombinasjonen.

Andre viktige tendenser består i å lage spesialmodeller for å studere en type virkemidler, for eksempel prisvirkemidler.

TØIs strategiske instituttprogram "Strategiske analyser av helhetlig virkemiddelbruk" dreier seg i stor grad om å utvikle modeller som egner seg til å gjøre effektberegninger og evaluere virkemiddelpakker som omfatter flere transportmidler. Både prosjektet "Prosjektvalg på strategisk nivå" og EU-prosjektene PROSPECTS, MC-Icam og SPECTRUM er sentrale i en slik sammenheng.

En kan stille spørsmålet om hva som oppnås ved å anvende optimeringsmetoder av disse typene i forhold til en mer skjønnsmessig utplukking av de mest aktuelle strategiene. Et mulig svar er at det veit vi ikke før vi har prøvd. I det neste kapitlet skal vi se nærmere på hvorfor det er grunn til å tro at det faktisk er mye å vinne.

³ En polynomisk funksjon er på formen $f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$.

3 Prosjektvalg blant avhengige prosjekter

Opgava vi står overfor er å velge ut prosjekter fra en portefølje av kandidatprosjekter på en slik måte at netto nåverdi (NNV) blir størst mulig. Noen av prosjektene er imidlertid avhengig av hverandre. Dette forekommer ved sammenstilling av en prosjektpakke i bystrøk, ved etappevise tiltak på en veg eller jernbanelinje, og i mange andre sammenhenger.

Ett prosjekt kan være avhengig av et annet på tre måter:

- Det ene kan bare gjennomføres hvis det andre er gjennomført,
- det ene kan aldri gjennomføres hvis det andre er gjennomført,
- netto nytte av det ene avhenger av om det andre er gjennomført eller ikke (eventuelt om de gjennomføres samtidig eller ikke).

Det finns en systematisk framgangsmåte for å håndtere de to første typene av avhengighet. Metoden gir oversikt over hva vi behøver å beregne og hva vi kan slippe å beregne, men dessverre ikke noe mer. Framgangsmåten er:

Dann grupper av prosjekter slik at hver gruppe består av de prosjektene som er avhengige av hverandre på en eller annen måte, og bare dem. Dette kalles *alternativgrupper*. Innafor en alternativgruppe, dann alle *mulige* kombinasjoner av prosjektene. Det er pr. konstruksjon bare mulig å velge ett alternativ (en kombinasjon) fra hver gruppe. Finn beste mulige kombinasjon bestående av høyst ett alternativ fra hver alternativgruppe, gitt budsjettbetingelsen.

Eksempel: Netto nytte av prosjektet a avhenger av om b er gjennomført, og omvendt. Prosjektet c kan gjennomføres uavhengig av alle andre, uten at netto nytte påvirkes. Prosjektet d kan ikke gjennomføres uten at e også gjennomføres.

Tabell 3.1. Alternativgrupper

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Ab	c	de
A	0	e
B		0
0		

TØI rapport 665/2203

Det er her 24 valgmuligheter i alt. Dersom vi ikke hadde utnyttet det vi veit om at d ikke kan gjennomføres aleine, ville det vært 32 valgmuligheter. Legg merke til at selv dette enkle eksemplet gir et omfattende regnearbeid, og at det ikke reduserer arbeidet at vi veit at a og b påvirker nytta til hverandre. Tvert imot, denne

trede forma for avhengighet medfører at ingen kombinasjoner i alternativgruppe 1 kan utelukkes.

For å ta hensyn til avhengigheten, må vi altså i prinsipp beregne alle teknisk mulige kombinasjoner av de prosjektene som er avhengige. Spesielt har vi for alternativgruppa 1 (den tredje typen av avhengighet) at hvis det er n prosjekter der realisering av det ene påvirker nytte eller kostnader for noen av de andre, finns det 2^n mulige kombinasjoner å beregne.

Anta at vi har beregnet alle kombinasjonene i hver av alternativgruppene. La oss nå se på det neste steget i prosessen, der vi velger høyst en kandidat fra hver alternativgruppe og setter sammen til kombinasjoner. Finns det der noen triks slik at vi slipper å beregne de dårligste kandidatene? Kan vi for eksempel gløkke a, b og 0 hvis ab har høyest nåverdi i gruppe 1? Eller kan vi kanskje bruke nyttekostnadsbrøken (NNB) til å velge fra gruppene? Tabell 2 vil vise at det ikke finns noen triks eller enkle valgeregler for hvilke slike kombinasjoner som er best.

Tabell 3.2. Avhengighet mellom prosjekter: et eksempel

Alternativ- gruppe	Prosjekt	Kost (1)	Nytte (2)	NNV (3) = (2) - (1)	NNB (4) = (3)/(1)
1	A	4	8	4	1
	B	12	18	6	0.5
	C	18	25	7	0.39
2	D	12	16	4	0.33
3	E	10	14	4	0.4

TØI rapport 665/2003

Det er 16 mulige kombinasjoner. Det er to valg som må gjøres: (1) Velg et prosjekt fra alternativgruppe 1 (eventuelt ingen av dem). (2) Velg en kombinasjon av høyst ett prosjekt fra hver alternativgruppe. Hvordan skal det gjøres – etter netto nytte eller nyttekostnadsbrøk?

Beste prosjektvalg under budsjettbetingelse i dette tilfellet:

Budsjett [0,4): Ingen

Budsjett [4,12): A

Budsjett [12,14): B

Budsjett [14,22): AE

Budsjett [22,26): BE

Budsjett [26,34): ADE

Budsjett [34,40): BDE

Budsjett [40,→): CDE

I tre forskjellige intervaller skal prosjekt B velges fra alternativgruppe 1. Men prosjekt B vil aldri bli valgt, verken om vi bruker netto nåverdi eller nyttekostnadsbrøk. Verken netto nytte eller nyttekostnadsbrøk er altså generelt brukbare valgkriterier for å sette sammen kombinasjoner fra alternativgruppene! Derfor

finns det ingen regel utenom den generelle regelen at vi skal velge det som gir samlet sett størst netto nytte gitt budsjettbetingelsen.

Konklusjonen vi må trekke av dette er at når det finns avhengige prosjekter, som i alternativgruppe 1, vinner vi ingenting på å holde alternativgruppene fra hverandre, bortsett fra at vi får eliminert de teknisk umulige alternativene (dvs. avhengighet av første og andre slag). Vi må i alle fall beregne alle kombinasjoner av prosjekter, enten de er avhengige eller ikke! I tabell 1 er det alle de 24 kombinasjonene, og i tabell 2 er det alle de 16 kombinasjonene.

Men grunnen til denne konklusjonen er at budsjettbetingelsen er absolutt, og prosjektene store i forhold til budsjettet. I den grad vi kan dele opp prosjektene slik at de begynner i denne budsjettperioden og fullføres i neste, eller justere budsjettet på andre måter, eller i den grad selv kombinasjonene av de virkelig avhengige prosjektene (som ab i tabell 1) er små i forhold til budsjettet, holder det å betrakte kombinasjonene av de virkelig avhengige prosjektene som enkeltprosjekter og velge disse kombinasjonene etter nyttekostnadsbrøken sammen med de uavhengige prosjektene.

Vi behøver altså ikke betrakte kombinasjoner av alle prosjekter i hele landet. Når det gjelder en enkelt by, derimot, er det best å gå ut fra kombinasjoner av alle de aktuelle prosjektene i byen, selv om vi skulle bedømme enkelte av prosjektene som ganske uavhengige av de øvrige.

Et spesialtilfelle av det vi har behandlet er når alle prosjektene er avhengige av hverandre. Det finns da bare en alternativgruppe. Dann alle mulige kombinasjoner av prosjekter. Dersom det er n prosjekter, finnes det 2^n mulige kombinasjoner. En og bare en av dem må velges. Beregn netto nåverdi av alle kombinasjoner som holder seg innenfor budsjettet. Velg kombinasjonen med høyest netto nåverdi.

Dette er altså resultatet av en systematisk, men ikke-matematisk behandling av problemet med avhengighet mellom prosjekter. Siden (1) det ikke finns noen rask og enkel regel for å rangere kombinasjonene, og (2) det kan bli en uhyggelig mengde kombinasjoner å undersøke, trenger vi datakraft. Og vi trenger å formulere problemet i en så enkel sammenheng at vi ikke bruker månedsvis og årevis på beregningen. Noe realisme må ofres for beregnbarhet. Det er utgangspunktet for prosjektet vårt, og grunnen til at vi anvender nettverksdesignproblemet som metode til å takle problemet.

3.1 Avhengighetsproblemet i Norge

Problemet med å ta hensyn til avhengighet mellom prosjekter har vært stilt i forbindelse med større bypakker, som Oslopakke 1. Den gangen stilte man problemet som et dynamisk problem – i hvilken rekkefølge skal vi ta prosjektene? Noen få mulige rekkefølger for prosjekter på Ring 3 og E6 blei vurdert, men hovedgrepet – å begynne innerst og arbeide seg utover – blei vel valgt på skjønn. I 1994 begynte vi på TØI å ta fatt på problemet på systematisk vis, men denne gangen som et statisk problem (Minken 1994, 1995, 1996, Jensen 1995, Jensen og Minken 1997). Vi utviklet en modell kalt SPIN som ikke var noe annet enn nettopp anvendelse av nettverksdesignproblemet. Men denne modellen tok ikke hensyn til brukerlikevekt, og egnet seg derfor ikke i byområder.

Takket være dette arbeidet blei det imidlertid stor forståelse for at avhengighet mellom prosjekter kunne utgjøre et problem. Hvor stort problemet var, blei aldri fastslått, og er framleis uklart. Det finns også en uklar forståelse for hva som skal til for å løse problemet – vi mistenker at mange ennå er på utkikk etter enklere metoder enn det som strengt tatt er forsvarlig. Uansett, interessen var stor nok til at prosjektet ”Prosjektvalg på strategisk nivå” vant fram i Samferdselsdepartementets POT-program.

Tilsvarende oppmerksomhet rundt avhengighet har vi ikke registrert i utlandet. Helt siden 60-årene har det vært forskning og anvendelser av nettverksdesign-problemet, men trolig har dette ofte vært reint akademisk forskning uten noen tilsvarende problemforståelse blant brukerne. Dette kan endre seg nå, når datakraften har økt og NDP blir anvendt i mer realistiske sammenhenger.

4 Nettverksdesignproblemet med brukerlikevekt

Avhengighet mellom prosjekter i byområder vil ofte skyldes at det finns køer. Dermed vil reisetidene som kan oppnås med et nytt prosjekt, avhenge av trafikkstrømmene på lenkene, som igjen avhenger av hvilke andre prosjekter som alt er implementert. Dette gir mer omfattende vekselvirkninger mellom prosjekter enn den enklere formen for avhengighet, der andelen som velger å benytte en viss infrastrukturforbedring avhenger av hvilke andre forbedringer som er gjort, men ikke av hvordan andre tilpasser seg til forbedringene.

Av den grunn må et verktøy som skal kunne brukes til å velge den beste kombinasjonen av prosjekter i by, ha *brukerlikevekt* som en forutsetning.⁴ Ettersom kollektivtransport er et reelt alternativ til biltransport i byene, må verktøyet også naturligvis ta hensyn til en mulig avhengighet mellom kollektivprosjekter og vegprosjekter. Dataprogrammet vi har laget, gjør dette. Det er i prinsippet en enkel utvidelse av det matematiske planleggingsproblemet vi formulerte ovenfor i kapittel 2. Den kan for eksempel formuleres slik:

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{x \in X} W(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \text{gitt } I(x_1, x_2, \dots, x_n) - R(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq R_0 \\ & X \text{ består av lenkeforbedringer og avgifter} \\ & \text{Det er likevekt i nettverket} \end{aligned}$$

Men bak dette skjuler det seg en rekke forbedringer.

- Vi tar hensyn til to transportmåter ("bil" og "kollektiv")
- De reisende kan velge mellom bil og kollektiv, men kan også ha etterspørselsfunksjoner som inkluderer destinasjonsvalg og reisefrekvens.
- Prosjektene kan være vegprosjekter og kollektivprosjekter i blanding, og kan også omfatte ulike plasseringer av innkrevingspunkter for brukerbetaling og størrelsen på brukerbetalingen.
- Vi tar hensyn til kø.
- Likevekten i vegnettet og kollektivnettet beregnes simultant.

Enda viktigere enn dette er at modellen enkelt kan implementeres for et hvilket som helst område, bare det finns en transportmodell der fra før. Sjøl om det ikke

⁴ Brukerlikevekt er forklart i avsnitt 2.3.

finnes, inneholder modellsystemet muligheter til å bygge en egen modell (en nested CES-modell) som kan estimeres uten spesielle programmer, forutsatt at det i det minste finnes pålitelige tur- og kostnadsmatriser.

Som nevnt kan NDP ikke løses på rimelig tid hvis transportmodellen er for detaljert. Betyr det at de regionale modellene, FREDRIK, TASS, den nasjonale persontransportmodellen osv. ikke kan anvendes i forbindelse med NDP-modellen? Nei, tvert imot. Vi kan bevare mesteparten av informasjonen i disse modellene ved å aggregere dem på en konsistent måte slik at de kan brukes i NDP. Vi har to metoder for å gjøre dette. Den første lar seg anvende på nested logit-modeller, som FREDRIK eller NPM-5. Disse kan aggregeres til nested logit-modeller med større soner. Den andre metoden kan anvendes på alle foreliggende modeller. Den tar output fra modellen (tur- og kostnadsmatriser) og bruker det til å estimere og kalibrere en nested CES-modell, som så kan aggregeres til en tilsvarende modell med større soner.

Noe større problemer er forbundet med forenkling av nettverket. Her må brukeren sjøl definere et enkelt, overordnet nettverk. Metoden for å få dette nettverket til å oppføre seg på samme måte som det detaljerte, består i å tilpasse kapasiteten på lenkene i det grove nettverket slik at alle reisekostnader tilsvare reisekostnadene i det detaljerte nettverket. Det kan ikke garanteres at dette samsvaret vil være like godt i alle strategiene som det er i nullalternativet.

Tatt i betraktning at vi derfor får en noe mindre realistisk modell, må det nye verktøyet først og fremst betraktes som en *idegenerator*. Det produserer de tre beste prosjektkombinasjonene. For å være sikker på at disse også gjør det like bra i den detaljerte modellen, må disse tre kombinasjonene også prøves ut der. Men dette er tross alt en meget betydelig innsparing i forhold til å prøve ut et høyt antall kombinasjoner i den detaljerte modellen.

Bare praktisk erfaring kan vise om NDP-modellen også kan brukes til den endelige effektberegningen.

Anvendelsesområdet for modellverktøyet er potensielt stort. Det umiddelbart mest naturlige er å anvende det på byproblemer som valg av "Oslopakke 3" eller en kombinasjon av Oslopakke 1 og 2. I den forbindelsen kan en samtidig analysere ulike former for vegprising, plassering av bomringer og egen eller felles innkrevning i forbindelse med OPS-prosjekter.

Det kan imidlertid også anvendes til å bestemme rekkefølgen på parsellutbygging av firefeltsveg eller av dobbeltspor på jernbanen (riktignok må en da kunne definere driftsopplegget for alle kombinasjoner som testes), eller finne beste strategi som kombinerer vegbygging og kollektivforbedring langs en korridor.

Det nærmeste steget i oppfølgingen av prosjektet vil være å finne ut hvor pålitelige resultater modellen gir når vi sammenlikner med en detaljert transportmodell. Dette arbeidet vil finne sted i løpet av det nærmeste året i et nytt prosjekt finansiert av Samferdseldepartementet. Deretter kan den settes inn i praktiske analyser, bl.a. slik at vi endelig kan finne ut hvor stort problemet med avhengighet mellom prosjekter er. Hvis det ikke er så lite at det kan ignoreres, er det vårt håp at data-programmet kan tas i bruk på vegkontorene og hos andre brukere.

4.1 Teknisk beskrivelse av NDP med brukerlikevekt

Den klassiske formuleringen av Nettverksdesignproblemet (NDP) gjelder beslutninger om utbygging av veg- og gatesystemet for å møte en stigende etterspørsel etter reiser. Hvordan kan slike beslutninger gjøres på en optimal måte? NDP har blitt et viktig felt i transportplanlegging nettopp fordi trafikken på vegene vokser raskere enn det vegsystemet i byene kan klare, samtidig som det er begrensede ressurser til å utvide kapasiteten. Historisk har problemet vært stilt i to former: En diskret form der nye lenker eller vegparseller kan føyes til det eksisterende vegsystemet (Magnanti and Wong, 1984), og en kontinuerlig form med optimal kapasitetsutvidelse på eksisterende lenker (Yang 1998). Uansett form er målet å optimere et gitt mål på systemets yteevne, samtidig som man tar hensyn til rutevalgsbeslutningene til brukerne av nettverket. Den iboende kompleksiteten gjør at NDP er anerkjent som et av de vanskeligste problemene i transport.

Problemet er altså å fastlegge et investeringsprogram som maksimerer samfunnet velferd, idet man tar hensyn til virkningene av den implementerte investeringsplanen på etterspørselen og systemets yteevne. En slik problemstilling har form av et tottrinns programmeringsproblem (bilevel programming) eller et Stackelbergspill (leader-follower game), hvor planleggingsmyndighetene er lederen og trafikantene følger etter. Problemet kan uttrykkes matematisk slik:

$$\min_u F(u, v(u))$$

$$\text{gitt } G(u, v(u)) \leq 0$$

hvor $v(u)$ er implisitt definert ved:

$$\min_v f(u, v)$$

$$\text{gitt } g(u, v) \leq 0$$

Det nedre trinnet i tottrinnsproblemet representerer likevekten mellom etterspørsel og systemytelse for en gitt investeringsplan. Det øvre trinnet av modellen representerer planleggingsmyndighetens investeringsbeslutningsproblem med samfunnsøkonomisk lønnsomhet som mål. Det er forutsatt at til enhver beslutningsvariabel u hører det et entydig likevekts trafikkmønster $v(u)$ som stammer fra løsningen av det nedre problemet. $v(u)$ kalles også respons- eller reaksjonsfunksjonen. Hele tottrinnsproblemet er altså å finne en optimal investeringsplan u som maksimerer målfunksjonen F under den gitte budsjettbetingelsen og under hensyntaken til reaksjonsmønsteret til brukerne av nettverket. Investeringsplanen kommer i høy grad til å avhenge av våre prediksjoner om trafikkstrømsendringene og etterspørselsendringene i kjølvannet av en kapasitetsforbedring i transportsystemet.

Nettverksdesignproblemet må løses under forutsetning av at trafikken på lenkene er i likevekt. Derfor er prediksjon av trafikkstrømmene på grunnlag av en sunn modell for trafikantenes atferd helt essensielt. Tradisjonelt antar NDP-modellene at etterspørselen er fast, mens bilistenes rutevalg er løsningen av et brukerlikevektsproblem (Sheffi, 1985). Noen forskere har brukt en alternativ formulering av det nedre problemet, nemlig det såkalte stokastiske brukerlikevektsproblemet, der trafikantene velger rute i henhold til en logitmodell (Chen and Alfa 1991, Davis

1994). Den alternative formuleringen har vist seg å være mindre god, siden den i regelen overestimerer trafikken på overlappende ruter, og derfor kan gi overinvestering på slike ruter.

For å gjøre NDP mest mulig realistisk virker det fornuftig å legge til grunn at etterspørselen er elastisk, siden NDP vanligvis handler om langsiktige investeringer i vegnettet – investeringer som sikkert vil kunne påvirke reiseetterspørselen.

Formen på transportplanleggerens målfunksjon F vil i regelen avhenge av hvordan det nedre problemet er formulert. I tilfellet med brukerlikevekt og konstant etterspørsel blir det naturlige målet å minimere hele summen av reisekostnadene. Med elastisk etterspørsel må dette endres til maksimering av konsumentoverskuddet (Yang and Bell, 1997). Den formen på målfunksjonen F som vi bruker i vårt program er beskrevet i vedlegg 1 til denne rapporten.

I sin klassiske formulering består NDP av to ikke-lineære maksimeringsproblemer som representerer henholdsvis transportplanleggerens investeringsbeslutningsproblem og brukerlikevektsproblemet. Det diskrete nettverksdesignproblemet tar form av et ikke-lineært heltallsprogrammeringsproblem med likevekt i nettverket som bibetingelser. Metodene for å løse denne typen problemer er Benders dekomponering, branch-and-bound metoder og andre heuristikker. Det kontinuerlige nettverksdesignproblemet er vanskeligere å løse enn diskrete nettverksdesignproblemet, men det finnes et antall relativt gode heuristiske algoritmer (Yang and Bell, 1998). Forskningen forsøker nå å utvikle mer pålitelige løsningsteknikker for denne slags problem.

Vanligvis formuleres brukerlikevekt som et ikke-lineært maksimeringsproblem der brukernes samlede nytte minus summen av de generaliserte reisekostnadene maksimeres under bibetingelser som sikrer at rutestrømmene adderer seg opp til etterspørselen på hver reiserelasjon. Siden de har en entydig løsning, kan slike maksimeringsproblemer omformuleres ved å bruke førsteordens Kuhn-Tuckerbetingelsene. Kuhn-Tuckerbetingelsene kan igjen formuleres som et Mixed Complementarity Problem (MCP). MCP tilhører den breie klassen av "Variational Inequality"-problemer. Det endeligdimensjonale variational inequality-problemet $VI(F,K)$ vil bestemme en vektor $x^* \in K \subset R^n$ slik at $F(x^*)^T \cdot (x - x^*) \geq 0, \forall x \in K$ der F er en gitt kontinuerlig funksjon fra K til R^n og K er en gitt lukket og konveks mengde. Mange matematiske problemer kan formuleres som variational inequality-problemer, og ikke-lineære optimeringsproblemer er bare et eksempel.

Når investeringene ikke bare gjelder veginvesteringer, men også investeringer for å forbedre infrastrukturen i kollektivtransporten, bør det nedre problemet i NDP inkludere både bilbrukernes og kollektivbrukernes tilpasning. Bilbrukernes tilpasning kan som nevnt modelleres som et brukerlikevektsproblem, mens kollektivbrukernes tilpasning kan formuleres som et kollektivrutevalgsproblem. Dette problemet kan også formuleres som et ikke-lineært maksimeringsproblem (Cea and Fernandez, 1993).

Vanligvis når brukerlikevektsproblemet og kollektivrutevalgsproblemet formuleres som ikke-lineære maksimeringsproblemer med elastisk reiseetterspørsel, vil man finne den simultane likevekten i begge nettverk ved å iterere mellom modellene til et visst konvergenskrav er oppfylt. For å slippe slike iterasjoner kan de to

likevektsproblemene formuleres som MCP-problemer ved å bruke Kuhn-Tucker-betingelsene. En simultan likevektsløsning kan da finnes ved å løse et MCP-problem basert på Kuhn-Tucker-betingelsene fra begge problemer. I de siste partiene har det blitt utviklet mange effektive algoritmer for å løse variational inequality-problemer, slik som projeksjonsmetoden, relaxeringsmetoden og dekomposisjonsmetoden. Disse algoritmene løser slike problemer ganske raskt og med stor presisjon. En MCP-formulering av vårt problem vil derfor ikke bare avskaffe behovet for iterering og dermed redusere løsningsstida, men også øke presisjonen i svaret.

I programmet som er utviklet i vårt prosjekt bruker vi en MCP-formulering av det nedre problemet, som består i å finne likevekten i nettverket for både bil- og kollektivtransport når etterspørselen er elastisk. MCP-formuleringen kan skrives:

$$\sum_j \sum_n x_{ijn}^k \delta_{ijn} - \sum_j \sum_n x_{jin}^k \delta_{ijn} = D_{ik}^{car} (c_{ik}^{car}, c_{ik}^{pub})$$

$$c_{ijn}(f_{ijn}) + c_{jk}^{car} - c_{ik}^{car} \geq 0 \perp x_{ijn}^k \geq 0$$

$$f_{ijn} = \sum_k x_{ijn}^k$$

$$\sum_j \sum_{r'} \sum_r y_{ijr'r}^k \lambda_{ijr'r} - \sum_j \sum_{r'} \sum_r y_{jir'r}^k \lambda_{ijr'r} = D_{ik}^{pub} (c_{ik}^{pub}, c_{ik}^{car})$$

$$t_{ijr} + w_{ijr'r}(f_{ijr}^p) + c_{jk}^{pub} - c_{ik}^{pub} \geq 0 \perp y_{ijr'r}^k \geq 0$$

$$f_{ijr}^p = \sum_k \sum_{r'} y_{ijr'r}^k$$

der δ_{ijn} er en binær parameter som representerer strukturen i vegnettverket, og er 1 hvis det finnes en lenke nummer n fra node i til node j og 0 ellers. Likeledes er γ_{ij}^r en binær parameter som representerer strukturen i kollektivnettverket, og er 1 hvis det finnes en lenke på kollektivlinje nummer r som fører fra node i til node j , og 0 ellers. Generalisert reisekostnad med bil c_{ij}^{car} og med kollektivtransport c_{ij}^{pub} bestemmer innbyggernes reisetterspørsel i henhold til de elastiske reisetterspørselsfunksjonene $D_{ij}^{car} (c_{ij}^{car}, c_{ij}^{pub})$ og $D_{ij}^{pub} (c_{ij}^{pub}, c_{ij}^{car})$.

Lenkekostnadsfunksjonene i vegnettverket betegnes $c_{ijn}(f_{ijn})$ og er tiltakende funksjoner av trafikkstrømmen på lenka, f_{ijn} . Disse funksjonene inkluderer tidskostnaden målt i penger, drivstoffkostnaden og andre mulige kostnader for trafikanten, som for eksempel vegavgifter. Lenkekostnadsfunksjonene reflekterer også kø i bygatene, som jo medfører økte reisetider og derfor en økning i de generaliserte lenkekostnadene. Generalisert reisekostnad med bil c_{ij}^{car} er summen av generaliserte lenkekostnader langs den optimale ruta fra node i til node j .

Generaliserte reisekostnader for kollektivtransport c_{ij}^{pub} består ikke bare av lenkekostnadene t_{ijr} på hver av lenkene i kollektivtransportnettverket, men også av ventekostnadene $w_{ijr'r}(f_{ijr}^p)$ forbundet med å bytte linje fra linje r' til linje r i

node i . Ventekostnadene er tiltakende funksjoner av passasjerstrømmen på lenka, f_{ijr}^p , og avhenger av frekvensen på linjene, g_r .

x_{ijn}^k er strømmen av biler med destinasjon i node k på lenke nummer n fra node i til node j . $y_{ijr'r}^k$ er strømmen av passasjerer med destinasjon i node k som benytter en lenke fra node i til node j , tilhørende kollektivlinje line r , etter å ha byttet linje fra r' til r i node i . $\lambda_{ijr'r} \in \{0,1\}$ framkommer slik: $\lambda_{ijr'r} = \max\{\max_k\{\gamma_{ki}^{r'}\}, \gamma_{ij}^r\}$. Den er 1 når det er mulig å bytte fra linje r' til line r i node i og fortsette reisa på lenka fra node i til node j .

De ukjente variablene i den simultane nettverkslikevekten er $x_{ijn}^k, y_{ijr'r}^k, c_{ij}^{car}, c_{ij}^{pub}$.

4.2 Noen trekk ved det utviklede dataprogrammet

Programmet som er utviklet i prosjektet finner de tre kombinasjonene av veg- og kollektivprosjekter som scorer høyest på målfunksjonen av de kombinasjonene som holder seg innenfor budsjettrestriksjonen. Målfunksjonen er en velferdsfunksjon. For hver av de tre kombinasjonene finnes også beste nivå på vegavgiftene og billettsatsene (se vedlegg 1 for en nærmere beskrivelse).

Den formuleringen av NDP som vi bruker i programmet, tilhører klassen av diskrete NDP-problemer, og vi bruker en MCP-formulering av nettverkslikevektsproblemet som beskrevet i forrige kapittel.

Resultatet av NDP avhenger generelt av forma på transportplanleggerens målfunksjon og av forma på etterspørselsfunksjonene og kostnadsfunksjonene som inngår i nettverkslikevektsproblemet.

Programmet som er utviklet gir brukeren mulighet til å definere forma på målfunksjonen slik hun vil. I den mest omfattende forma inkluderer den alle elementene som inngår i en nyttekostnadsanalyse, mens bare konsumentoverskuddet er tatt med i den mest reduserte forma (se vedlegg 1). Programmet gir også et valg mellom to ulike funksjonsformer på de elastiske etterspørselsfunksjonene, nemlig nested CES og nested logit.

4.2.1 Etterspørselen

Nested CES-funksjonene vi bruker er beskrevet i arbeidsdokumentet Minken, Samstad og Ivanova (2003) og framkommer av et nested CES nyttemaksimeringsproblem. De har følgende form:

$$D_{ij}^{car}(c_{ij}^{car}, c_{ij}^{pub}) = P_{ij} \frac{\alpha_{ij}^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{ij} S_{ij})^{\frac{\rho}{1-\rho}}}{\sum_k \alpha_{ik}^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{ik} S_{ik})^{\frac{\rho}{1-\rho}}} R_i \left(\frac{c_{ij}^{car}}{\beta_{ij}^{car}} \right)^{-\frac{1}{1-\mu}}$$

$$D_{ij}^{pub}(c_{ij}^{pub}, c_{ij}^{car}) = P_{ij} \frac{\alpha_{ij}^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{ij} S_{ij})^{\frac{\rho}{1-\rho}}}{\sum_k \alpha_{ik}^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{ik} S_{ik})^{\frac{\rho}{1-\rho}}} R_i \left(\frac{c_{ij}^{pub}}{\beta_{ij}^{pub}} \right)^{-\frac{1}{1-\mu}}$$

der

$$P_{ij} = \left(\beta_{ij}^{car} \left(\frac{c_{ij}^{car}}{\beta_{ij}^{car}} \right)^{-\frac{\mu}{1-\mu}} + \beta_{ij}^{pub} \left(\frac{c_{ij}^{pub}}{\beta_{ij}^{pub}} \right)^{-\frac{\mu}{1-\mu}} \right)^{-1}$$

$$S_{ij} = \left(\frac{c_{ij}^{car}}{\beta_{ij}^{car}} \right)^{-\frac{1}{1-\mu}} + \left(\frac{c_{ij}^{pub}}{\beta_{ij}^{pub}} \right)^{-\frac{1}{1-\mu}}$$

$$R_i = \gamma T_i + B_i$$

R_i er det generaliserte reisebudsjettet for reisende fra sone i , og består av summen av avsatt reisetid målt i penger γT_i og pengebeløpet som er avsatt til reising B_i . Parametrene $0 < \rho < 1$ og $0 < \mu < 1$ knytter seg til henholdsvis destinasjonsvalg og transportmiddelvalg, og tilfredsstiller $\mu > \rho$. Parametrene α_{ij} , β_{ij}^{car} og β_{ij}^{pub} er spredningsparametre for destinasjons- og transportmiddelvalget, og tilfredsstiller $\beta_{ij}^{car}, \beta_{ij}^{pub} > 0$, $\beta_{ij}^{car} + \beta_{ij}^{pub} = 1$ og $\alpha_{ij} > 0$, $\sum_j \alpha_{ij} = 1$.

Reiseetterspørselsfunksjonene i nested logit-modellen er basert på stokastisk nytteteori. De betingede indirekte nyttefunksjonene for et individ som hører hjemme i sone i og reiser til sone j med bil eller med kollektivtransport er henholdsvis $U_{j,car}^i$ og $U_{j,pub}^i$, der

$$U_{j,car}^i = \tilde{V}_{car}^i + \tilde{V}_j^i + \tilde{V}_{j,car}^i + \tilde{\varepsilon}_{car}^i + \tilde{\varepsilon}_j^i + \tilde{\varepsilon}_{j,car}^i$$

$$U_{j,pub}^i = \tilde{V}_{pub}^i + \tilde{V}_j^i + \tilde{V}_{j,pub}^i + \tilde{\varepsilon}_{pub}^i + \tilde{\varepsilon}_j^i + \tilde{\varepsilon}_{j,pub}^i$$

De tre siste leddene i hver funksjon er stokastiske feilledd, som oppstår fordi observatøren har mangelfull kunnskap om nøyaktig hva som motiverer beslutningene til det enkelte individ, eller nøyaktig hvilke omstendigheter han treffer sitt valg under. De tre første leddene er den systematiske (deterministiske) delen av nytten. Elementene $\tilde{V}_{j,car}^i$ og $\tilde{V}_{j,pub}^i$ kan tolkes som reisekostnaden mellom sone i og sone j med henholdsvis bil og kollektivtransport, og vil ha negative fortegn. Elementene som bare avhenger av destinasjonssonen kan tolkes som nytten av å utføre aktiviteten som motiverer reisa. Elementene som bare avhenger av transportmidlet må tolkes som transportmiddelspesifikke konstanter.

La oss kalle skalaparametrene for transportmiddelvalget og destinasjonsvalget for henholdsvis μ and λ . Under bestemte forutsetninger om sannsynlighetsfordelingen for feilleddene vil denne modellen resultere i elastiske etterspørselsfunksjoner av nested logit-type (Ben-Akiva and Lerman ,1997):

$$D_{ij}^{car}(c_{ij}^{car}, c_{ij}^{pub}) = T_i \frac{\exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j^{ni}) \exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car})}{\sum_j \exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j^{ni}) \exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub})}$$

$$D_{ij}^{pub}(c_{ij}^{car}, c_{ij}^{pub}) = T_i \frac{\exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j^{ni}) \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub})}{\sum_j \exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j^{ni}) \exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub})}$$

$$\text{der } V_j^i = \frac{1}{\mu} \log \left(\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub}) \right)$$

T_i er det totale antall reiser med startpunkt i sone i .

En bruker har to valgmuligheter når det gjelder hvor detaljert informasjon om reiseetterspørselen som legges inn i programmet. En kan enten legge inn reiseetterspørselen fordelt på de sonene som anvendes i NDP-programmet, eller etterspørselsdata for en mer detaljert soneinndeling. I det sistnevnte tilfellet vil reiseetterspørselsfunksjonene bli aggregert på en konsistent måte fra de detaljerte sonene til de aggregerte sonene som NDP-programmet bruker. Aggregeringsmetoden for nested CES er beskrevet i Minken, Samstad og Ivanova (2003) og for nested logit i vedlegg 2.

4.2.2 Test

Programvaren er testet med et nettverk som tilsvarer Oslo og omegn, og resultatene fra denne testen er presentert i vedlegg 3.

5 Våre valg

Nettverksdesignproblemet med brukerlikevekt og elastisk etterspørsel er grunnleggende vanskelig å løse. Det er tre forhold som bidrar til det – brukerlikevekt, ikke-linearitet og heltallighetsproblematikk.

Vi kan illustrere problemet med *brukerlikevekt* på følgende måte: Betrakt de totale reisekostnadene i et transportsystem med en fast turmatrise. En skulle tro at hvis vi forbedret systemet ved å bygge en ny lenke – en snarveg mellom to noder – så ville de totale reisekostnadene i hvert fall aldri bli større. Men det kan de faktisk bli! Dette kalles Braess' paradoks. En forutsetning for at slike fenomener kan oppstå er at det er køer i systemet, og at likevekten i systemet er brukerlikevekt. Som vi har sett, betyr brukerlikevekt at alle velger den ruta som gir lavest generalisert kostnad så lenge de andre holder fast ved de rutene de har valgt. Det er nettopp fordi brukerlikevekt er forskjellig fra den løsningen som gir de minste totale reisekostnadene (systemoptimum), at slike paradoksale fenomener kan oppstå.

Hvis vi kunne være sikre på at netto nytte i systemet alltid ville øke om vi la til en lenke som vi fikk gratis, ville løsningen helt sikkert være å legge til så mange lenker som mulig. Men det er det vi ikke kan være sikre på. Løsningen kan faktisk ligge i å ta vekk noen lenker. Dermed blir det prinsipielt vanskeligere å finne den riktige løsningen enn det ellers ville vært. På den andre sida kan det i det minste vises at det finnes en entydig og stabil brukerlikevekt. Problemet er ikke så mye å finne brukerlikevekta når nettverket er gitt, som å finne den samfunnsøkonomisk beste utvidelsen av nettverket i situasjoner med brukerlikevekt.

Målfunksjonen vår er *ikke-linear* fordi vi forutsetter elastisk etterspørsel, slik at vi må beregne brukernytte ved konsumentoverskuddet. Vi insisterer på at dette er nødvendig i en sammenheng med flere transportmåter og mange konkurrerende destinasjoner. Denne holdningen, sammen med beslutningen om å forutsette brukerlikevekt, koster oss dyrt i form av lengre regnetid for å løse problemet.

Hadde vi sett bort fra kø og brukerlikevekt og gått over til en *lineær* målfunksjon (transportkostnadsminimering, for eksempel), ville vi straks hatt tilgang til andre algoritmer, og ville kunne ha løst problemer med mange hundre eller mange tusen noder. Vi kunne også løst ganske store problemer hvis vi sørget for en lineær målfunksjon og tok hensyn til kø ved å formulere stykkevis lineære køfunksjoner (LeBlanc og Boyce 1986). Om vi hadde en lineær målfunksjon og formulerte brukerlikevekten som "variational inequalities", ville vi også tatt gode algoritmer (Marcotte og Zhu 1996). Men vi har altså insistert på en ikke-linear målfunksjon.

Heltallighetsproblematikken oppstår fordi vi ikke innskrenker oss til å se på marginale forbedringer av lenkene i transportnettverket. Siden forbedringer ofte vil inneholde ikke-marginale utvidelser, slik som en ny fil, har vi valgt å holde fast på en heltallsformulering av problemet. Hadde vi holdt oss til marginale utvidelser, men fremdeles holdt fast ved brukerlikevekt og å beregne brukernytte ved konsu-

mentoverskuddet, ville vi hatt tilgang til noenlunde eksakte og kraftige algoritmer (Marcotte 1986).

Våre valg har altså dømt oss til å operere med ganske små nettverk hvis vi skal finne løsningen innen rimelig tid. Vi forsvarer disse valgene fordi vi har tro på at det er mulig å få en liten transportmodell til å oppføre seg som en stor ved hjelp av konsistente aggregeringsrutiner, og fordi vi tror at en liten og skissepreget transportmodell også bør kunne spille andre viktige roller i strategisk planlegging. Det er en god ting å ha, og det bør arbeides for å gjøre små, skissepregede modeller så gode som mulig.

6 Konklusjon

Avhengighet mellom prosjekter innebærer i prinsippet at den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av det enkelte prosjekt ikke er noen veldefinert størrelse før vi har presisert hvilke andre prosjekter som blir implementert sammen med det. Derfor har vi heller ingen enkel måte å velge ut prosjekter på når det finns avhengighet. Det vil være nødvendig å analysere kombinasjoner av prosjekter, snarere enn enkeltprosjekter, for å finne den samfunnsøkonomisk mest lønnsomme kombinasjonen innen budsjetttrammene. Dermed øker regnearbeidet drastisk, for hvis det finns n prosjekter å velge mellom, finns det 2^n prosjektkombinasjoner å ta stilling til.

Her i landet har vi innsett problemet en tid, men det har ikke vært mulig å undersøke om det er stort eller lite i det enkelte praktiske tilfellet. Med det dataprogrammet som er utviklet i prosjektet "Prosjektvalg på strategisk nivå" kan et slikt arbeid påbegynnes. Programmet er et modellverktøy som gjør det mulig å formulere og løse NDP-problemer av ulik grad av kompleksitet. Det er utviklet et grensesnitt som gjør at brukeren ikke trenger matematiske kunnskaper eller programmeringskunnskaper ut over det nivået som skal til for å anvende kommersielle programpakker som EMMA og TRIPS. I tilknytning til programmet er det utviklet en systematisk metode for aggregering av soner, og en litt mindre systematisk måte for aggregering av nettverk.

Vi venter oss at verktøyet vil kunne fungere som en *idegenerator* i ulike faser av arbeidet med en strategisk transportplan for en by eller en transportkorridor. Det vil nemlig forhåpentligvis kunne finne fram til prosjektkombinasjoner som gir bedre samfunnsøkonomisk lønnsomhet enn noen av de pakkene som kan tenkes ut eller forhandles fram på annet vis. Men siden verktøyet innebærer visse forenklinger i forhold til en større transportmodell, vil de kombinasjonene som det finner fram til alltid måtte testes videre i en større modell.

Gevinsten ved å bruke verktøyet ligger i at det er helt urealistisk å prøve ut alle prosjektkombinasjoner i en større transportmodell. Dessuten gir verktøyet mulighet til å vurdere infrastrukturprosjektene og finansieringsløsninger (som bompenger og takstpåslag) i sammenheng. Det tar hensyn til to transportmåter ("bil" og "kollektiv"). De reisende kan velge mellom bil og kollektiv, men kan også ha etterspørselsfunksjoner som inkluderer destinasjonsvalg og reisefrekvens. Prosjektene kan være vegprosjekter og kollektivprosjekter i blanding, og kan også omfatte ulike plasseringer av innkrevingspunkter for brukerbetaling og størrelsen på brukerbetalingen. Verktøyet tar hensyn til kø, og likevekten i vegnettet og kollektivnettet beregnes simultant.

Verktøyet kan brukes til å etablere en modell for et hvilket som helst område, bare det finns en transportmodell der fra før. Sjøl om det ikke finnes, inneholder modellsystemet muligheter til å bygge en egen modell som kan estimeres uten

spesielle programmer, forutsatt at det i det minste finnes pålitelige tur- og kostnadsmatriser.

Det nærmeste steget vil være å finne ut hvor pålitelige resultater verktøyet gir når vi sammenlikner med en detaljert transportmodell. Dette arbeidet vil finne sted i løpet av det nærmeste året i et nytt prosjekt finansiert av Samferdseldepartementet. Deretter kan det settes inn i praktiske analyser, bl.a. slik at vi endelig kan finne ut hvor stort problemet med avhengighet mellom prosjekter er. Hvis det ikke er så lite at det kan ignoreres, er det vårt håp at dataprogrammet kan tas i bruk på vegkontorene og hos andre brukere.

Litteraturliste

- Ben-Akiva, M. and S. Lerman (1997). *Discrete choice analysis: Theory and application to travel transport*. The MIT press, London.
- Cea, J. and E. Fernandez (1993). Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model. *Transportation Science* **27**, 133-147.
- Chen, M and A. Alfa, (1991). A network algorithm using a stochastic incremental traffic assignment approach. *Transportation Science* **25**,215-224.
- Davis, G. (1994). Exact local solution of the continuous network design problem via stochastic user equilibrium assignment. *Transportation Research B* **28**,61-75.
- Ferris, M.C., A. Meeraus and T. Rutherford (1998). Computing Wardropian Equilibria in a Complementarity Framework. *Optimization Methods and Software* **10**, 669-685.
- Ivanova, O. (2003). Bi-level programming in network design. Chapter 2 in Ivanova (2003) *The Role of Transport Infrastructure in Regional Economic Development*. Dissertation submitted for the Dr.Phil degree. Department of Economics, University of Oslo.
- Jensen, T. (1995) SPIN. *Modell for strategiske prosjektvalg i nettverk*. Arbeidsdokument TØ/829/95. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Jensen, T. og H. Minken (1997). *SPIN – Strategisk prosjektvalg i nettverk*. TØI-rapport 358/1997. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- LeBlanc, L.J and D.E. Boyce (1986). A Bilevel Programming Algorithm for Exact Solution of the Network Design Problem with User-Optimal Flows. *Transportation Research B* **20B**(3), 259-265.
- Luo, Z.-Q, J.-S. Pang and D. Ralph (1996) *Mathematical Programs with Equilibrium Constraints*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Magnanti, T.L. and R.T. Wong (1984). Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. *Transportation Science* **18**(1), 1-55.
- Marcotte, P. (1986). Network Design Problem with Congestion Effects: A Case of Bi-Level Programming. *Mathematical Programming* **34**, 142-162.
- Marcotte, P. and D. Zhu (1996). Exact and inexact penalty methods for the generalised bilevel programming problem. *Mathematical Programming* **74**, 141-157.
- Minken, H. (1994). *Nettverksdesignproblemet*. Arbeidsdokument TØ/722/1994. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Minken, H. (1995). Interdependency among projects along a corridor. Paper presented at the conference “Exploring the Application of Benefit-Cost

- Methodologies to Transportation Infrastructure Decision Making”, Tampa, Florida. Arbeidsdokument TØ/793/1995, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Minken, H. (1996). *Lønnsomhetsberegning og valg av prosjekter som er avhengige av hverandre*. TØI-notat 1040/1996. Transportøkonomisk institutt,
- Minken, H. og Samstad, H. (2000). *En fattigmanns transportmodell (nested CES)*. Arbeidsdokument TØ/1239/2000, TØI, Oslo.
- Minken, H., H. Samstad og O. Ivanova (2003). *En fattigmanns transportmodell (nested CES)*. Arbeidsdokument TØ/1569/2003. Revidert utgave av arbeidsdokument TØ/1239/2000. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Minken, H., D. Jonsson, S.P. Shepherd, T. Järvi, A.D. May, M. Page, A. Pearman, P. Pfaffenbichler, P. Timms and A. Vold (2002). *Developing Sustainable Urban Land Use and Transport Strategies. A Methodological Guidebook*. PROSPECTS Deliverable 14. TØI Report 619/2003. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Nagurney, A. (1993). *Network Economics. A Variational Inequality Approach*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods*. Englewoods Cliffs, Prentice Hall, USA.
- Sweet, R. (1997). An aggregate measure of travel utility. *Transportation Research B* **31**(5), 403-416.
- Vold, A. (2000) *RETRO/IMREL- Modell for transport og arealbruk i Stor-Oslo – versjon 1.0*. TØI notat 1179/2000. The Institute of Transport Economics, Oslo.
- Yang, Y. and M.G.H. Bell (1997). Traffic restraint, road pricing and network equilibrium. *Transportation research B* **31**, 303-314.
- Yang, Y. and M.G.H. Bell (1998). Models and Algorithms for Road Network Design: A Review and Some New Developments. *Transport Reviews* **18**(3), 257-278.

*NDP-1: Verktøy til valg av prosjektpakker når
prosjektene er avhengige av hverandre*

Vedlegg

Vedlegg 1

Brukerhåndbok

Denne brukerhåndboka veileder om programvaren NDP-1, som TØI har full intellektuell eiendomsrett til. Programvaren kan ikke kopieres eller spres uten TØIs uttrykkelige samtykke. Villkårene for kommersiell og annen bruk av programvaren skal i hvert tilfelle på forhånd avtales med TØI. Kopier av programvaren kan fås ved henvendelse til Harald Minken eller Olga Ivanova ved TØI, hm@toi.no eller oiv@toi.no.

1 Hva programmet gjør

I forbindelse med de nasjonale transportplanene eller politiske initiativ for å løse transportproblemene i en by, et fylke eller et annet område, vil det ofte komme opp mange ulike forslag. Det kan dreie seg om forbedringer av vegsystemet, nye ruter eller ny infrastruktur i kollektivsystemet, eller hyppigere avganger. Vi kaller alle slike forslag for prosjekter. Programmet løser problemet med å finne de tre samfunnsøkonomisk beste *kombinasjonene av prosjekter* innenfor et gitt budsjett. Det kan derfor være til nytte ved forhandlinger om sammensetning av tiltakspakker (mellom etater, lokale myndigheter eller politiske fraksjoner), eller ved analyser av allerede utarbeidede tiltakspakker med sikte på å forbedre sammensetningen eller finne den beste finansieringsløsningen.

For hver mulig kombinasjon av prosjekter beregner programmet samfunnsøkonomisk lønnsomhet og en rekke andre indikatorer. Programmet tar hensyn til brukerlikevekt i rutevalget og likevekt mellom tilbud og etterspørsel i både bil- og kollektivmarkedet. Dette er krevende oppgaver, som bare kan løses innen en begrenset beregningstid dersom vi forenkler vegnettverket og kollektivnettverket og ikke har for mange soner. Som en egen del av programmet har vi derfor en modul som hjelper til med å gjøre disse forenklingene på en konsistent måte. Det vil likevel være nødvendig å teste løsningene i en større transportmodell etterpå.

Tre typer av prosjekter kan analyseres i programmet:

- Bygging, forbedring eller stenging av veger
- Oppretting, nedlegging eller utbedring av kollektivruter (linjer)
- Endret avgangshyppighet på kollektivruter.

Prosjektene kan finansieres enten over et gitt investeringsbudsjett eller med bomavgifter og takstpåslag i tillegg. I det sistnevnte tilfellet kan programmet om ønskelig også avgjøre hva avgiftene og takstene bør være og hvor bomstasjonene bør stå.

For å utføre analysen må brukeren gi inn data om vegnettet og kollektivnettet, reisetterspørselsfunksjonene og alle de foreslåtte prosjektene. Ulike enhetskostnader må også gis inn.

Som output fra programmet får brukeren en beskrivelse av de tre prosjektkombinasjonene med høyest samfunnsøkonomisk lønnsomhet og egenskapene til disse kombinasjonene, som for eksempel samlede miljøkostnader, samlede investeringskostnader og inntektene fra brukerbetaling dersom vegprising eller bompenger er brukt til finansiering.

Ved å endre forutsetningene, som for eksempel ved å kutte ut prosjekter, endre de mulige stedene der bomstasjonene kan stå, endre budsjettet eller noen av enhetskostnadene, kan brukeren studere hvor robuste løsningene er og i hvilken grad ulike politiske forutsetninger fører til ulike resultater. Det bør være mulig å gjennomføre mange slike følsomhetsanalyser i løpet av en uke.

2 Hva håndboka inneholder

Denne håndboka er et vedlegg til rapporten ”NDP-1: Verktøy til valg av prosjektpakker når prosjektene er avhengige av hverandre”. For å skjønne fullt ut hvordan programvaren virker og legge opp en foreløpig plan for de analysene du vil utføre, bør du lese rapporten først. Deretter går du til håndboka for tips og vegledning når du skal planlegge analysene i detalj, gjennomføre dem og tolke resultatene.

Håndboka gir opplysning om hva slags hardware og software du trenger for å bruke programvaren og hvordan du installerer den (kapittel 3). Den spesifiserer hva slags input programvaren trenger og hvilke begrensninger som programvaren har (kapittel 4). Dette er kunnskap som du trenger for å planlegge arbeidet.

Kapittel 5, 6 og 8 går gjennom brukergrensesnittet og valgmulighetene du blir stilt overfor når du skal bruke programmet. Kapittel 7 beskriver nøyaktig format på inputfilene. Det er altså kapittel 5-8 du trenger når du skal gjennomføre en analyse i praksis.

Kapittel 9 gir veiledning om outputfilene og hvordan de skal forstås.

Kapittel 10 gir opplysninger om andre ting du bør vite om programmet og bruken.

Det er altså nødvendig å sette seg inn i alle deler av håndboka for å kunne bruke programmet.

3 Installasjon og systemkrav

For å kjøre programmet bør du minst ha en datamaskin med

- Pentium III 1000 prosessor
- 128 MB RAM
- 16 MB Video RAM

Dessuten trenger du programvarepakka GAMS med solveren PATH. (Leveres av GAMS Development Corporation (www.gams.com)).

For å kunne bruke programmet må du først gjøre følgende:

- Installere GAMS-programmet til mappa **C:\GAMS20.1** sammen med PATH-solveren
- Kopiere filene **path.opt** og **nlp.opt** fra installasjonsdisketten til mappa **C:\WINDOWS\gamsdir** eller **C:WINNT\gamsdir**, avhengig av hva slags Windowsversjon du har på maskinen
- I mappa **C:\WINDOWS\gamsdir** (eller **C:WINNT\gamsdir**) finner du undermappene **225a – 225z**. De bør slettes etter hver kjøring av programmet.
- Kopier mappa **NDP** fra installasjonsdisketten til disk **C:**
- Lag en snarveg til programmet på skrivebordet med eksekveringsstien **C:\NDP\NDP.exe** og gi den navnet **NDP**. Denne snarvegen brukes til å kjøre programmet fra nå av.

4 Delene av programvaren

Den viktigste delen av programvaren er modulen som løser Nettverksdesign-problemet (NDP). Den beregner optimale og nesten-optimale kombinasjoner av prosjekter i henhold til et gitt velferdsmål. Beregningen av velferdsmålet for hver prosjektkombinasjon skjer etter at brukerlikevekt i nettverket er beregnet. Brukerlikevekt betyr at hver trafikant tar hensyn til hvilke ruter de andre trafikantene har valgt når han søker å finne den eller de rutene for seg sjøl som koster minst i tid og penger (dvs. i generalisert reisekostnad). Det er derfor en tilstand hvor ingen vil ha noen grunn til å endre sitt rutevalg hvis ikke noen andre endrer sitt.

Brukerlikevekt er en standard forutsetning i transportmodellering, og antas å være realistisk hvis flesteparten av trafikantene har daglige erfaringer med den samme reisen. Når det er kø og trengsel i et transportsystem, vil brukerlikevektsløsningen atskille seg fra systemoptimum, som er den løsningen som gir de laveste samlede generaliserte kostnader i hele systemet. I vår programvare er det samtidig brukerlikevekt i både vegnettet og kollektivnettet.

Når brukerlikevekt er beregnet for en viss kombinasjon av prosjekter, vil programvaren automatisk evaluere resultatet i henhold til den målfunksjon som du har spesifisert. Du kan for eksempel ha spesifisert en full nyttekostnadsanalyse. Når den er utført, vil programvaren automatisk gå videre og beregne andre projektkombinasjoner på samme måte, inntil den er klar til å rapportere de tre beste kombinasjonene. Dette kan ta timer eller dager. Følsomhetsanalyser tar utgangspunkt i den optimale løsningen som er funnet, og tar derfor kortere tid.

4.1 Transportnettverket

Den delen av programvaren som beregner likevekt i nettverket består av transportnettverket for bil, transportnettverket for kollektivtrafikk og etterspørselsfunksjonene. Gjennomgangen av de to nettverkene i dette avsnittet har til hensikt å vise hvilke nettverksdata brukeren må gi inn i programvaren, og til dels hvordan det skal gjøres. Etterspørselsfunksjonene behandles i avsnitt 4.3.

Transportnettverket for bil har følgende elementer:

- Et sett av noder, nummerert fra 1 til N. Brukeren må gi inn hvor mange noder det er, dvs. fastlegge N. Vi bruker indeksen n på noder. Dvs. at n står for et vilkårlig helt tall mellom 1 og N, eller uttrykt matematisk: $n \in \{1, 2, \dots, N\}$. (Når vi nedenfor omtaler to vilkårlige noder, vil vi bruke indeksene n og m).
- Strukturen i nettverket, som er uttrykt i form av en kvadratisk matrise med ettall og nuller. Det elementet i matrisen som står i n-te rad og m-te kolonne, betegnes δ_{nm} . Et slikt element er enten 0 eller 1, hvilket vi skriver $\delta_{nm} \in \{0, 1\}$. δ_{nm} er 1 hvis det finns minst en lenke for bil som fører direkte fra node n til node m og 0 hvis det ikke er tilfelle.

Brukeren må altså lage seg en tegning av bilnettverket, sette nummer på nodene i tegningen og overføre strukturen fra tegningen til matrisen ved å skrive inn 1 på plassen nm i matrisen (dvs. i cella i n-te rad, m-te kolonne) hvis det finns en lenke fra n til m, og null ellers.

En lenke kan identifiseres ved to hele tall, nummeret på noden som lenken går fra og nummeret på noden som den går til, dvs. nm. Når vi snakker om en bestemt lenke, for eksempel lenken mellom node 2 og node 5, må vi skille de to tallene fra hverandre med et punktum, slik: 2.5. Hva vi skal gjøre hvis det finns flere enn en lenke mellom node 2 og 5, kommer vi tilbake til.

Hver eneste veglenke har tre forskjellige *egenskaper*, type, lenkekostnad og lengde. Disse egenskapene må også registreres i programmet. Lenkene består egentlig av to lenker, en i hver retning, med like stor kapasitet i begge retninger. Kø på en lenke vil være en funksjon av trafikkstrømmen i den ene retningen.

En lenke i bilnettverket er av en av følgende fem typer: 1) Hovedveg med tre filer i begge retninger, 2) Hovedveg med to filer i begge retninger, 3) Bygate med to filer i begge retninger, 4) Bygate med en fil i begge retninger, 5) Hovedveg med fire filer i begge retninger. Typen er representert ved en logisk parameter $\eta_{nm} \in \{1, 2, 3, 4\}$. For hver lenke nm skal altså den logiske parameteren settes til 1, 2, 3 eller 4. Dette innebærer å fylle ut en matrise med hele tall fra 1 til 4.

Hver av lenkene har en lenkekostnadsfunksjon av formen $t_{nm} = t_0 \left(1 + \beta \left(\frac{v_{nm}}{c} \right)^\alpha \right)$

der v_{nm} er volumet på lenka, målt i antall kjøretøyer pr. time, t_0 er tida det tar (i timer) å kjøre en kilometer på lenka når det ikke finns kø (t_0 er den inverse av hastigheten ved "fri flyt", og er for eksempel bestemt av fartsgrenser), c er kapasiteten på lenka (kan defineres som det volum pr. time som gir kjøretid $t_0(1 + \beta)$ pr. kilometer), og α og β er positive parametre. Kjøretid ved fri flyt t_0 , kapasiteten c og parametrene α og β er egenskaper ved vegtypen, og er like for lenker av samme type.

- Hver av lenkene har en lenkelengde h_{nm} i kilometer. Den er, som vi ser, spesifikk for den enkelte lenke.

Kollektivnettverket har de *samme* nodene som nettverket for biltrafikk. De følgende elementene bestemmer kollektivnettverket:

- Settet av noder, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$.

- Et sett av kollektivlinjer, L i tallet. Vi bruker indeksen l til å betegne en vilkårlig kollektivtransportlinje, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$.
- Strukturen i kollektivnettverket, som er uttrykt i form av L kvadratiske matriser med ettall og nuller, en for hver linje. Elementet i n -te rad og m -te kolonne i matrisen for kollektivlinje l betegnes μ_{nm}^l . Et slikt element er enten 0 eller 1, hvilket vi skriver $\mu_{nm}^l \in \{0, 1\}$. μ_{nm}^l er 1 hvis det i kollektivlinje l finns minst en kollektivlenke som fører direkte fra node n til node m , og 0 hvis det ikke er tilfelle. Men videre antar vi at enhver kollektivlenke hører til en og bare en linje, slik at $\sum_{l=1}^L \mu_{nm}^l = 1$.
- For hver av lenkene i kollektivnettverket finnes det en reisetid målt i timer, τ_{nm}^l . Se for øvrig avsnitt 4.2.
- For hvert par av noder ij som det kan reises kollektivt mellom, finnes det en kollektivtakst målt i kroner, t_{ij}^{pub} , som viser hva det koster å reise kollektivt mellom i og j . Merk at denne kollektivtaksten ikke gjelder lenker, men nodepar som betegner start og bestemmelsessted for reiser.
- Hver kollektivlinje har sin egen frekvens f_l målt i antall avganger pr. time.
- Hver avgang har en kapasitet, målt i antall passasjerplasser inkludert ståplasser.

Å samle opplysningene om de to nettverkene og legge dem inn i programmet ("kode nettverket") kan være en møysommelig oppgave. I mange tilfeller vil man kjenne noen av opplysningene på forhånd. Vi skiller mellom ulike grader av informasjon om hver av nettverkene. Programmet er konstruert slik at det som er kjent på forhånd, enkelt kan legges inn. Mye av det som er ukjent må man finne fram sjøl før det legges inn, men ukjente køfunksjoner på billene og ukjente reisetider i kollektivsystemet kan estimeres i programmet.

Informasjonsnivå når det gjelder køfunksjonene

- 1) *Kjente køfunksjoner.* Brukeren har full informasjon om køfunksjonene for hver av de fem vegtypene, dvs. at hun kjenner fri-flyts reisetid pr. kilometer t_0 , lenkekapasiteten c , og parametrene α og β . Disse verdiene legges inn i programmet.
- 2) *Estimering av køfunksjonene er nødvendig.* Brukeren kjenner fri-flyts reisetid pr. kilometer t_0 , men ikke parametrene α og β . Hun har imidlertid 20 observasjoner av gjennomsnittsfart og trafikkvolum for hver av de fire første veglenketyper, pluss tilsvarende observasjon for hele reisetida τ_{nm} . Dette er tilstrekkelig til å estimere parametrene α og β . (Vi bruker den inverse av gjennomsnittsfarten, dvs. tida det tar å reise en kilometer, i estimeringen). De estimerte parametrene bør sammenliknes med tilsvarende estimater fra litteraturen. Parametrene for den femte lenketyper (åttefeltsveg) må anslås.

- 3) *Vegkapasiteten er ukjent.* Dette tilfellet oppstår særlig når vi har måttet forenkle nettverket, slik at en lenke må representere en hovedveg eller hovedgate pluss parallelle småveger og smågater. For å få reisetidene mellom alle noder til å samsvare med det vi veit fra før, må vi da tilpasse lenkekapasitetene. Vi går ut fra at parametrene t_0 , α og β er kjent for hver av lenketypene vi opererer med, og setter en øvre og en nedre grense for den ukjente kapasiteten. Den nedre grensen er åpenbart kapasiteten for denne lenketypen dersom den ikke også måtte representere trafikkstrømmene som velger småvegene. Når disse parameterverdiene og de kjente reisetidene mellom noder gis inn i en spesiell modul i programmet, vil den kunne beregne hvilke kapasiteter som gir best samsvar mellom observerte reisetider og reisetidene i likevekt i det forenklede nettverket.

Informasjonsnivå når det gjelder kollektivreisetider

- 1) *Kjente kollektivreisetider.* Brukeren har full informasjon om kollektivreisetidene τ_{nm}^l for hver lenke i hver linje i kollektivnett. Dette er naturligvis det normale – det er jo bare å se i rutetabellene.
- 2) *Ukjente kollektivreisetider.* Dette tilfellet oppstår særlig når vi har måttet forenklet kollektivnettverket, slik at en lenke må representere flere parallelle linjer. For å få reisetidene mellom alle noder til å samsvare med det vi veit fra før, må vi da tilpasse reisetidene på lenkene. Vi går ut fra at den totale reisetida med kollektivtransport mellom alle nodepar er kjent fra før. Vi bruker en spesiell modul i programmet til å tilpasse lenkereisetidene i likevekt slik at de samsvarer best mulig med disse observasjonene.

4.2 Reisekostnader, operatørkostnader og kapasitetsskranker

Vi har hittil bare behandlet visse faktorer som er med og bestemmer kostnadene pr. lenke. Kostnaden for en reise mellom sone i og j består av summen av lenkekostnadene på de lenkene som blir benyttet, pluss andre elementer som vi skal komme tilbake til nedafor. Det er disse *generaliserte reisekostnadene* som inngår i etterspørselsfunksjonene, og derfor skal vi se på hvordan de er sammensatt før vi behandler etterspørselen i neste avsnitt.

Når det gjelder bilreiser er den generaliserte reisekostnaden for reiser på reiselasjon (sonepar) ij rett og slett summen av lenkekostnaden $c_{nm}(f_{nm})$ på hver av lenkene langs den optimale ruta fra i til j . Lenkekostnaden $c_{nm}(f_{nm})$ er en tiltakende funksjon av trafikkstrømmen på lenke nm , f_{nm} . Hver lenke nm har sin egen lenkekostnad, som er bestemt av lenkelengda, lenketypen, trafikkstrømmen på lenka og en eventuell lenkeavgift. Lenkekostnaden består av to ledd, en tidskostnad målt i penger og en pengekostnad. Totalt sett er altså lenkekostnadene uttrykt i penger. Det er tidskostnaden som avhenger av trafikkstrømmen på lenka og dermed gjenspeiler køer og framkommelighetsproblemer i systemet.

Lenkekostnadene i programmet har følgende form:

$$c_{nm}(f_{nm}) = v^{time} \cdot l_{nm} \cdot t_0^{nm} \cdot \left(1 + \beta_{nm} \left(\frac{f_{nm}}{C_{nm}}\right)^{\alpha_{nm}}\right) + p_{nm}$$

der v^{time} er tidsverdien i penger, l_{nm} er lengda av veglenka i kilometer, t_0^{nm} er reisetida i timer pr. kilometer under fri flyt, C_{nm} er kapasiteten på veglenka i antall kjøretøy pr. time, α_{nm} og β_{nm} er vegtypespesifikke parametre og p_{nm} er prisen for å passere over lenka (vegpris eller bomavgift).

Lenkekostnadene i den nåværende versjonen av programmet inneholder ikke noen kilometeravhengig kjørekostnad, slik som bensinkostnad. En konsekvens av det er at programmet ikke tar hensyn til merverdiavgift og bensinavgift, verken som utgift for trafikantene eller som inntekt for det offentlige. En annen konsekvens er at kostnadene i vårt program og i andre transportmodeller ikke er helt sammenliknbare.

Det er også verdt å merke seg at tidsverdien er den samme for alle trafikanter. Alternativet ville være såkalt "multi-class assignment", som vi ikke har gitt oss inn på.

Når det gjelder *kollektivreiser* er den generaliserte reisekostnaden for reiser på reiserelasjon ij summen av tre elementer: *De konstante lenkekostnadene*, *vente- og trengselskostnadene* og *billettprisen*. De konstante lenkekostnadene er $v^{time} \tau_{nm}^l$, der tidsverdien v^{time} er den samme som for bil og reisetida på lenka, τ_{nm}^l , er definert i avsnitt 4.1. Billettprisen t_{ij}^{pub} blei definert i avsnitt 4.1.

Vente- og trengselskostnadene er i den nåværende versjonen av programmet knyttet til lenker som ligger inntil noder der flere kollektivlinjer møtes. En tolkning av dem er derfor at de er forbundet med ventetid ved overganger, som generelt vil avhenge av frekvensen på linja som det byttes til og av trengselen om bord på denne linja (muligheten for å ikke komme med). I denne tolkningen kan disse kostnadene skrives $w_{nmr'r}(f_{nmr}^p, g_r)$, der f_{nmr}^p er passasjerstrømmen på lenke nm på linje r , og g_r er frekvensen på linje r . r' er linja som man bytter fra ved node i for å gå på linje r . Trengselen på linje r avhenger av forholdet mellom antall passasjerer pr. avgang og kapasiteten pr. avgang, C_r . Følgende uttrykk kan da settes opp for vente- og trengselskostnadene:

$$w_{ijr'r}(f_{ijr}^p) = v^{time} \left(\frac{1}{2 \cdot g_r} + \gamma^r \left(\frac{f_{ijr}^p}{C_r} \right)^{\eta^r} \right)$$

der γ^r and η^r er linjespesifikke parameter. I programmet har vi antatt at de er de samme for alle linjer.

En alternativ tolkning av vente- og trengselskostnadene er at det første leddet i parenteser gjelder *ulike* former for skjult ventetid, mens det siste gjelder ulemper ved å ikke få sitteplass etc. I så fall vil det ha betydning for hvilke lenker som skal ha slike kostnader. Vi vil vurdere dette i framtidige versjoner.

Kollektivselskapet driver alle kollektivlinjer og mottar billettinntektene. Hver kollektivlinje r har sin egen driftskostnad O^r , som avhenger av linjas struktur og frekvensen. En endring i strukturen (nye eller modifiserte lenker) eller frekvensen innebærer ikke bare en investeringskostnad, men også endringer i driftskostnaden på linja. La oss kalle endringen i driftskostnaden på grunn av endret struktur på linje r for OM^r , og endringen i driftskostnaden når frekvensvariant s innføres på linje r for OH_s^r . Den totale endringen i driftskostnadene for kollektivselskapet er da tilnærmet lik $\sum_r \beta^r OM^r + \sum_s \sum_r \varphi_s^r OH_s^r$. Dette uttrykket er ikke eksakt, fordi endringene på lenkene også vil endre kostnaden ved å øke frekvensen. En mer fullstendig kostnadsfunksjon for kollektivselskapet vil bli vurdert for framtidige versjoner av programmet.

Egne billettpriser kan defineres for hver reiserelasjon (sonepar) i programmet. De avhenger ikke av hvilke linjer den reisende velger. Kollektivselskapets samlede billettinntekter kan skrives $\sum_i \sum_j D_{ij}^{pub} (c_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub}, c_{ij}^{car}) \cdot t_{ij}^{pub}$, der t_{ij}^{pub} er billettprisen og $D_{ij}^{pub}(\cdot)$ er etterspørselsfunksjonen for reiser med kollektivtransport på reiserelasjon ij .

For hver kombinasjon av investeringsprosjekter kan vi da beregne driftsoverskuddet for kollektivselskapet som forskjellen mellom driftsinntekter og driftskostnader:

$$OS = \sum_i \sum_j D_{ij}^{pub} t_{ij}^{pub} - \sum_r O^r - \sum_r \beta^r OM^r - \sum_s \sum_r \varphi_s^r OH_s^r.$$

Økt frekvens på linjene kan medføre trengselsfenomener som forsinkelser. Brukeren må sjøl ta hensyn til dette når hun legger inn de mulige frekvensvariantene. (Se avsnitt 4.4 om hvordan frekvensendring modelleres).

4.3 Reiseetterspørselsfunksjonene

I modellen som beregner likevekt i nettverkene trenger vi også å spesifisere etterspørselen etter reiser. Reisene oppstår i *soner* og har *soner* som målpunkt. I vår modell er sonene identiske med en delmengde av nodene. Det betyr at vi ikke opererer med egne noder der trafikken oppstår (sentroider) eller egne lenker fra sentroidene til transportnettverket (konnektorer). Tilbringerreisa og tida den tar må altså modelleres på annet vis, og det samme gjelder gangtid fra hovedtransportmidlet til bestemmelsesstedet i den andre enden av reisa. En mulighet er at de kan legges inn sammen med billettprisen.

Det er I soner der reiser kan oppstå. Disse indekseres med i , $i \in \{1, 2, \dots, I\}$. Det er J soner der reisene ender, indeksert med j , $j \in \{1, 2, \dots, J\}$. Mengdene av startsoner og endepunktssoner er delmengder av mengden av noder: $\{1, 2, \dots, I\} \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$ og $\{1, 2, \dots, J\} \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$. Mengden av startsoner og mengden av destinasjonssoner kan være den samme, men behøver ikke være det.

Når programmet anvendes på byområder, vil det normale være at vi modellerer etterspørselen i en rushtime. Vi kaller et sonepar ij for en reiserelasjon. Antall reiser ut fra sone i , andelen av dem som skal til j , og andelen på reiserelasjon ij som bruker henholdsvis bil og kollektivtransport, er bestemt av en *reiseetter-spørselsfunksjon*. Denne funksjonen gjenspeiler preferansene til de som bor i sone i , og kan være en funksjon av reisebudsjettet målt i kroner samt den generaliserte reisekostnaden ved henholdsvis bil- og kollektivreiser på alle reiserelasjonene. I programmet kan vi definere ulike typer av reisende. Dette kan eventuelt brukes til å programmere et skille mellom ulike reisehensikter.

Programvaren gir brukeren et fritt valg mellom to slags funksjoner for reiseetter-spørselen: *logitfunksjoner* og *CES-funksjoner*.

Hvis brukeren velger funksjonsformen CES, må følgende følgende informasjon gis inn i programmet for å bestemme etterpørselsfunksjonene.

- Generaliserte reisekostnader for bilreiser og kollektivreiser for følgende to situasjoner: (1) utgangssituasjonen $D_{ij}^{car^1}, D_{ij}^{pub^1}$ og (2) en situasjon der reisekostnadene avviker fra utgangssituasjonen, men i ulik grad for hver av reiserelasjonene og transportmidlene, $D_{ij}^{car^2}, D_{ij}^{pub^2}$. De sistnevnte dataene trenges til eventuell estimering av ukjente parametre.
- Den tilhørende etterspørselen etter bil- og kollektivreiser på alle reiserelasjonene i hver av de to situasjonene, (1) $c_{ij}^{car^1}, c_{ij}^{pub^1}$ og (2) $c_{ij}^{car^2}, c_{ij}^{pub^2}$.

Vi skal altså ha to sett av sammenhørende tur- og kostnadsmatriser for å kunne estimere CES-modellen uten å "gjette" på noen av parametrene.

Hvis brukeren vil bruke funksjonsforma nested logit til etterspørselsfunksjonene, er det fordi hun har en slik modell eller fordi hun vil lage en. Uansett må følgende data legges inn i programmet (se formlene for betinget indirekte nytte i *rapporten*, avsnitt 4.2.1):

- Skalaparameteren for destinasjonsvalget, λ
- Skalaparameteren for transportmiddelvalget, μ
- Den indirekte nytten til et individ i startzone i som velger bil som transportmåte, \tilde{V}_{car}^i
- Den indirekte nytten til et individ i startzone i som velger kollektivtransport som transportmåte, \tilde{V}_{pub}^i
- Den indirekte nytten til et individ i startzone i som velger å reise til destinasjon j , \tilde{V}_j^i
- Totalt antall reiser som oppstår i startzone i , T_i

Hva slags data skal legges inn som de tre indirekte nyttene? Hvis man har en logitmodell fra før, vil man finne ut det ved å studere hva, utenom de generaliserte kostnadene, som bestemmer valget på de to nivåene. Det kan for eksempel dreie

seg om konstanter som er tilpasset under kalibreringen (sannsynligvis vil enten \tilde{V}_{car}^i eller \tilde{V}_{pub}^i være satt til 0). \tilde{V}_j^i vil være et uttrykk for hvor attraktiv sone j er for den aktiviteten som skal utføres.

Valget mellom CES og logit avhenger bl.a. av hvor mye man veit på forhånd om etterspørselen i området, og i hvilken grad det er nødvendig å bearbeide denne kunnskapen videre i programvaren. Vi kan skille mellom følgende informasjonsnivåer:

- 1) *Reisetterspørselen er ukjent.* I dette tilfellet må man gjøre en omfattende jobb utenfor programmet. Jobben består i å estimere en turmatrise med tilhørende kostnadsmatrise. Turmatrisen kan estimeres fra anslag for hvor mye trafikk som starter i hver av sonene og havner i hver av sonene, eller fra omfattende reisevanedata, eller fra tellinger av trafikken på lenkene. Dersom det er kø i området, er riktig matriseestimering i prinsippet ganske komplisert, og nært beslektet med problemet med å finne brukerlikevekt i nettverket (Yang, Meng og Bell 2001). Sjøl om det ville vært mulig å bygge en modul i programmet vårt som kunne hjelpe til med en slik oppgave, er det ikke gjort i den nåværende versjonen. Brukeren rådes derfor til å gi et oppdrag til en forskningsinstitusjon for å få løst denne oppgava.
- 2) *En turmatrise med tilhørende kostnadsmatrise er kjent.* (Merk: Hvis du vil estimere en CES-modell, vil du trenge to turmatriser med tilhørende kostnadsmatriser). Turmatrisen(e) behøver ikke ha samme soneinndeling som i programmet vårt, men kan godt være betydelig mer detaljert. Du kan bruke spesielle funksjoner i programmet til å estimere en nested CES etterspørselsfunksjon på grunnlag av de to matrisene. Deretter kan du bruke en annen funksjon i programmet til å aggregere over soner til de sonene du opererer med i programmet. Alternativt kan du på egenhånd estimere en nested logit transportmodell og bruke de gitte matrisene til å kalibrere den. Deretter kan du bruke en funksjon i programmet som aggregerer logitmodeller til de sonene du opererer med i programmet.
- 3) *En transportmodell for området finnes.* Transportmodellen behøver ikke ha samme soneinndeling som i programmet vårt, men kan godt være betydelig mer detaljert. Du må da bruke en av funksjonene i programmet vårt til å aggregere modellen til det antall soner du vil operere med i programmet. Bruk funksjonen som aggregerer nested logit-modeller hvis du har en nested logit-modell. Hvis ikke, må du produsere en turmatrise med tilhørende kostnadsmatrise ved hjelp av transportmodellen, deretter bruke matrisene til å estimere en nested CES-funksjon, og til slutt aggregere denne CES-modellen til det antall soner du vil bruke i programmet.

4.4 Investeringsprosjektene

Infrastrukturprosjektene som skal analyseres må legges inn i programmet. De kan være av følgende slag:

- Konstruksjon av en ny veglenke
- Forbedring av eksisterende veglenke

- Konstruksjon av en ny kollektivlinje
- Forbedring av eksisterende kollektivlinje
- Økt frekvens på en kollektivlinje.

Disse prosjektene beskrives av følgende dataelementer:

- En kvadratisk "veginvesteringsmatrise" med elementer av forma $\delta_{nm}^{ny} \in \{0,1\}$. δ_{nm}^{ny} er 1 hvis det finns et investeringsprosjekt som bygger ny veglenke eller forbedrer eksisterende veglenke mellom node n og m, og 0 ellers.
- En liste med anleggskostnader K_{nm} for alle lenker nm der det finns et veginvesteringsprosjekt. Anleggskostnadene bør også inkludere nåverdien av økt vedlikeholdsbehov.
- Et sett av L kvadratiske "kollektivinvesteringsmatriser" med elementer av forma $\mu_{nm}^{l-ny} \in \{0,1\}$. μ_{nm}^{l-ny} er 1 hvis det finns et investeringsprosjekt som bygger ny lenke eller forbedrer eksisterende lenke på kollektivlinje l mellom node n og m, og 0 ellers.
- Et sett av L lister med anleggskostnader M_{nm}^l i alle celler der det finns et kollektivinvesteringsprosjekt på lenken mellom n og m tilhørende kollektivlinje l . Anleggskostnadene bør også inkludere nåverdien av økt vedlikeholdsbehov på den nye kollektivlenka.
- Potensielle nye driftsplaner, dvs. et sett av mulige nye frekvenser $s \in \{1,2,\dots,S\}$ på kollektivlinjene. Hvert element s i denne lista er en driftsplan, dvs. en vektor som angir frekvensen på kollektivlinje 1, kollektivlinje 2 osv. til kollektivlinje L . Anta for eksempel at vi har to kollektivlinjer ($l \in \{1,2\}$), hver med halvtimesruter i dag. Vi vurderer å innføre kvartersruter, og kan innføre det på linje 1, linje 2 eller begge. De tre potensielle nye driftsplanene ($s \in \{1,2,3\}$) kan da settes opp i følgende tabell (jfr. pkt 23 i 7.1):

	$s = 1$	$s = 2$	$s = 3$
$l = 1$	4	2	4
$l = 2$	2	4	4

- For hver ny driftsplan, en matrise av frekvenser med elementer av typen f_{ls}^{ny} , der indeks l står for en kollektivlinje og indeks s står for en driftsplan. Tabellen i forrige punkt gir et eksempel på disse nye frekvensene – for eksempel er f_{21}^{ny} lik 2 og f_{13}^{ny} er lik 4.
- En matrise av kapitalkostnader forbundet med å etablere de nye frekvensene. Kapitalkostnaden knytter seg til økt behov for nytt rullende materiell (dvs. differansen mellom kapitalkostnaden i den opprinnelige driftsplanen og kapitalkostnaden i den nye driftsplanen). Elementene i matrisa er G_{ls} (jfr pkt 24 i avsnitt 7.1). Kapitalkostnadene bør også inneholde nåverdien av de økte kilometeruavhengige vedlikeholdskostnadene og garasje.

- En matrise av driftskostnader forbundet med å etablere de nye frekvensene. Driftskostnaden knytter seg til energibruk, kilometeravhengig vedlikehold, mannskapsbehov og daglige klargjøringskostnader. Det er forskjellen mellom den nye driftsplanen og den opprinnelige som skal føres inn. Elementene i matrisa er G_{ls} (jfr pkt 25 i avsnitt 7.1).
- Det totale investeringsbudsjettet B, målt i kroner. Dette budsjettet skal dekke anleggskostnader og nåverdien av vedlikehold av infrastrukturen. B er ikke en annuitet, men blir omregnet til annuiteten A i programmet når målfunksjonen beregnes.

4.5 Nye bompenger og kollektivtakster

Noen av lenkene i vegnettverket kan defineres som lenker der det skal innkreves avgift. Avgiftssatsene på disse lenkene kan fastsettes individuelt for hver lenke. Et sett av lenkeavgifter som er spesifisert på denne måten kaller vi en *variant*. Hvis du bare har fastsatt en variant, er det denne som inngår i alle beregningene, både som et ledd i generaliserte reisekostnader for bilreisene, og som en inntekt for det offentlige. (Jfr. pkt. 11 i avsnitt 7.1).

Du kan imidlertid fastsette flere varianter. Dette gjøres i en egen matrise, se punkt 2 i avsnitt 7.4. Det programmet da gjør, er at etter at de tre beste infrastrukturinvesteringene er funnet, startes et nytt optimeringsprogram som finner de tre beste variantene av vegavgifter for hver av de tre infrastrukturkombinasjonene. Beste fysiske tiltak og beste prispolitikk løses altså ikke samtidig, fordi dette vil forlenge regnetida eller innskrenke antall infrastrukturprosjekter som kan analyseres. Dette er en svakhet, men den kan trolig avhjelpes ved for eksempel å bruke den beste varianten som utgangspunkt for en ny kjøring av programmet, som beskrevet i avsnitt 8.4.

Situasjonen når det gjelder billettpriser er tilsvarende. Billettprisene i utgangspunktet, t_{ij}^{pub} , er en del av beskrivelsen av nettverket, se avsnitt 4.1. Du kan imidlertid fastsette flere varianter av billettprisene. Etter at de tre beste infrastrukturinvesteringene er funnet, vil programmet da også finne de beste variantene av billettprisene. Dette skjer samtidig med at det finner beste variant av vegavgiftene. Det man altså finner, er de tre beste kombinasjonene av vegavgifts- og billettprisvarianter for hver av de tre beste kombinasjonene av infrastrukturprosjekter.

Billettinntektene bestemmer kollektivselskapets resultat. Hvis du velger at avgiftene skal kunne brukes som et tilskudd til det faste investeringsbudsjettet (se avsnitt 4.6), vil de bli behandlet av programmet som en kilde til finansiering av infrastrukturforbedringer. I motsatt fall vil vegavgiftene avleire seg som overskudd for det offentlige.

4.6 Målfunksjonen

Når programvaren beregner virkningene av å implementere en bestemt kombinasjon av prosjekter, beregner den samtidig verdien av målfunksjonen. Målfunksjonen er en mer eller mindre fullstendig nyttekostnadsanalyse, og brukeren må

velge hvilke elementer hun ønsker å ha med i en slik beregning. Denne egenkapen ved programvaren er laget for at enkle analyser kan gjøres sjøl om ikke alle data, for eksempel om miljøkostnadene, er tilgjengelige. Den er også nyttig for å kunne studere virkningene på det optimale prosjektvalget av å ikke ta hensyn til visse typer av kostnader. Se kapittel 9 for framgangsmåten når ikke alle nytte- og kostnadselementer skal beregnes.

Generelt vil målfunksjonen W inkludere velferdsvirkningen (netto nyttevirkning) for følgende aktører: trafikantene, kollektivtransportselskapene og det offentlige. I tillegg kommer miljø- og ulykkesvirkningene.

Prosjektene kan påvirke nytten til trafikantene. Dette beregnes som summen av konsumentoverskuddet til trafikanter i en rushtidstime, CS^{rush} , og i en periode utenom rushtida, CS^{annet} . Det samlede konsumentoverskuddet er $CS = CS^{rush} + CS^{annet}$.

Prosjektene kan også påvirke miljøkostnadene EC . Miljøkostnadene vil generelt avhenge av trafikken på lenkene, og kan være forskjellige alt etter hvor i nettverket en lenke befinner seg. Miljøkostnadene omfatter både utslippskostnader, støy og ulykker, men brukeren må utenfor programmet beregne den totale miljøkostnaden pr. kjøretøykilometer for hver lenke. Enhetskostnader kan tas fra Eriksen et al (1999) eller Econ (2003).

Miljøkostnader i rush og utenom rush antas å være de samme pr. kilometer og rapporteres ikke separat.

Vi antar at det finnes bare ett kollektivselskap. Kollektivselskapet har kontroll over alle kollektivlinjer og tar opp betaling fra brukerne for bruken av dem. Hver kollektivlinje koster et visst beløp pr. år å drive i utgangssituasjonen, inkludert kapitalkostnadene for det rullende materiellet. Denne kostnaden avhenger av linjas struktur og av frekvensen. Forandringer i linjas struktur eller frekvensen medfører ikke bare en investeringskostnad, men også endringer i driftskostnadene. Derfor fører hver prosjektkombinasjon til nye driftskostnader for operatøren.

Billettprisen kan defineres for hver reiserelasjon ij (hvert enkelt par av en start- og en destinasjonsnode). Den avhenger ikke av hvilke linjer som brukes til reisa. Driftsoverskuddet til kollektivselskapet, OS , er billettinntektene minus driftskostnadene (inklusive kapitalkostnadene for rullende materiell).

Driftsoverskuddet OS kan være positivt eller negativt. Programvaren har to valgmuligheter når det gjelder finansiering av kollektivtrafikken. Den første er å anta at det offentlige dekker hele kollektivselskapets underskudd, og innkasserer hele kollektivselskapets overskudd, hvis det finns. Den andre er at det offentlige dekker en viss andel $0 < \Phi \leq 1$ av driftsunderskuddet.

Inntektene fra vegprising beregnes som den vektete summen av trafikkstrømmene på alle lenkene, med lenkeavgiftene som vektor. Inntektene fra vegprising går til det offentlige.

De totale investeringskostnadene omregnes til en annuitet A som inkluderes i målfunksjonen. Annuiteten er beregnet under forutsetning av en levetid på 30 år for alle investeringer, og med bruk av en rente som gis inn av brukeren.

Hvis vi bruker toppskrift 0 til å betegne utgangssituasjonen og toppskrift 1 til å betegne situasjonen når en prosjektkombinasjon er implementert, kan målfunksjonen W skrives slik:

$$W = CS + (1 - \Phi)(OS^1 - OS^0) + p^{\text{skygge}} \left[\Phi(OS^1 - OS^0) + (RP^1 - RP^0) - A \right] - (EC^1 - EC^0)$$

der p^{skygge} er 1 pluss skyggeprisen på offentlige midler. (Skyggeprisen på offentlige midler er 0.2 ifølge Finansdepartementets retningslinjer, men brukeren kan gi inn verdien $p^{\text{skygge}} = 1.2$ eller en annen verdi, om ønskelig).

Brukeren kan ha et høyt eller lavt informasjonsnivå om elementene i W :

- 1) *Full informasjon om elementene i W .* Alle elementene i formelen kan beregnes, og parametrene p^{skygge} og Φ er fastlagt.
- 2) *Mangelfull informasjon om noen av elementene.* Framgangsmåten for å formulere en forenklet målfunksjon er da beskrevet i kapittel 9.

4.7 Reiser utenom rush

Reiser utenom rush er modellert som en fast andel av reiser i rushtida. Reisekostnadene beregnes i det samme nettverket som i rush, men under forutsetning av uelastisk etterspørsel og at det ikke er noen køer. De samlede sparte reisekostnadene utenom rush tas med i målfunksjonen.

4.8 Kapasitetsbegrensninger i programvaren

Begrensninger i programvaren gjør at antall noder i nettverket ikke bør overstige 120. Antall soner i nettverket bør ikke overstige 60. Dersom analysen skal kunne gjennomføres på rimelig tid, må antall nye prosjekter som skal vurderes ikke være for stort. 10 prosjekter går bra, 20 vil ta tid, 30 krever ekstrem tålmodighet. For alt hva vi veit kan det ta år ...

5 Brukergrensesnitt

Brukergrensesnittet er på engelsk. Derfor gir vi i avsnitt 5.1 en ordliste over enkelte av ordene som er brukt i vinduene og dialogboksene.

Brukergrensesnittet består av følgende elementer:

- Knapper for å starte beregningene, se inputdata og se outputdata.
- Knapper for å velge om GAMS-beregningene skal vises eller ikke.
- Knapper for å velge finansieringsmåte.
- Knapper for å velge reiseetterspørselsfunksjoner.
- Knapper for å angi informasjonsnivå for kjøfunksjoner.
- Knapper for å angi informasjonsnivå for kollektivreisetider.

- Knapper for å velge om optimale vegavgifter skal beregnes eller ikke.

Network Design Problem

Start calculation View input data View output Close

GAMS Process Display Mode

Normal Minimized Hidden

Close process window on completion

The way to finance investment projects

Fixed budget Fixed budget and road pricing

Options with respect to travel demand functions

CES travel demand functions Nested Logit demand functions

CES for detailed zones Nested Logit for detailed zones

Options with respect to volume-delay functions

Known volume-delay functions Unknown capacities of roads

Estimation of volume-delay functions

Options with respect to transit times

Known transit times Unknown transit times

Options with respect to optimal road charges

Without optimal road charges With optimal road charges

5.1 Engelske ord

GAMS process display mode = måten GAMS-beregningene vises på.

Process window = vinduet som viser GAMS-beregningene.

Volume-delay functions = køfunksjoner.

Transit times = reisetid med kollektivtransport

Road charges = bomavgifter, vegprising.

5.2 Måten GAMS-beregningene vises på

Deler av programvaren er programmert i GAMS. GAMS brukes til å løse ulike typer matematiske problemer og har innebygd ulike løsningsalgoritmer. Velg å skjule GAMS-beregningene hvis du ikke er kjent med denne programvaren. De som kjenner GAMS, kan derimot være interessert i hvordan solveren løser vårt problem i det enkelte tilfelle, og vil derfor velge å vise GAMS i et normalt eller minimert vindu.

5.3 Valg av finansieringsmåte

Det er to valgmuligheter med hensyn til finansieringsmåten. Den første er "fixed budget", altså fast budsjett. Totale investeringskostnader kan da ikke overstige et fast beløp gitt av brukeren. Den andre muliggjør bruk av inntekter fra vegprising i tillegg til det faste budsjettet. Valget påvirker det totale investeringsbudsjettet og dermed det optimale valget av prosjekter. Vanligvis vil et større investeringsbudsjett gi høyere W .

5.4 Valg av reiseetterspørselsfunksjoner, køfunksjoner og reisetid med kollektivtransport

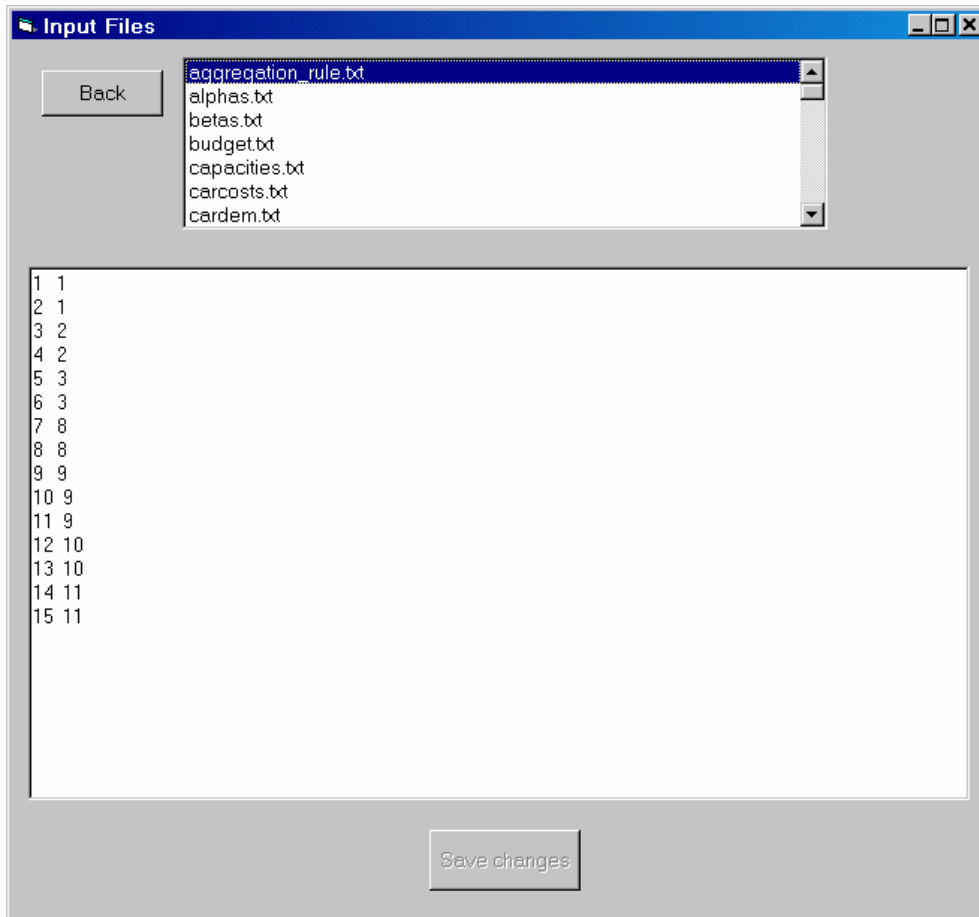
Velg det alternativet som tilsvarer informasjonsnivået i ditt tilfelle – se kapittel 4 og 6.

5.5 Valgmulighet angående vegprising

Du kan velge mellom "med" eller "uten" optimale vegavgifter. Hvis du velger "med" optimale vegavgifter, må du spesifisere et sett av lenker der avgift kan kreves inn, og deretter spesifisere avgiften på hver av disse lenkene. Dette kan du gjøre i en eller flere varianter. Hvis du har flere varianter, vil programvaren velge den beste varianten for hver av de tre beste prosjektkombinasjonene.

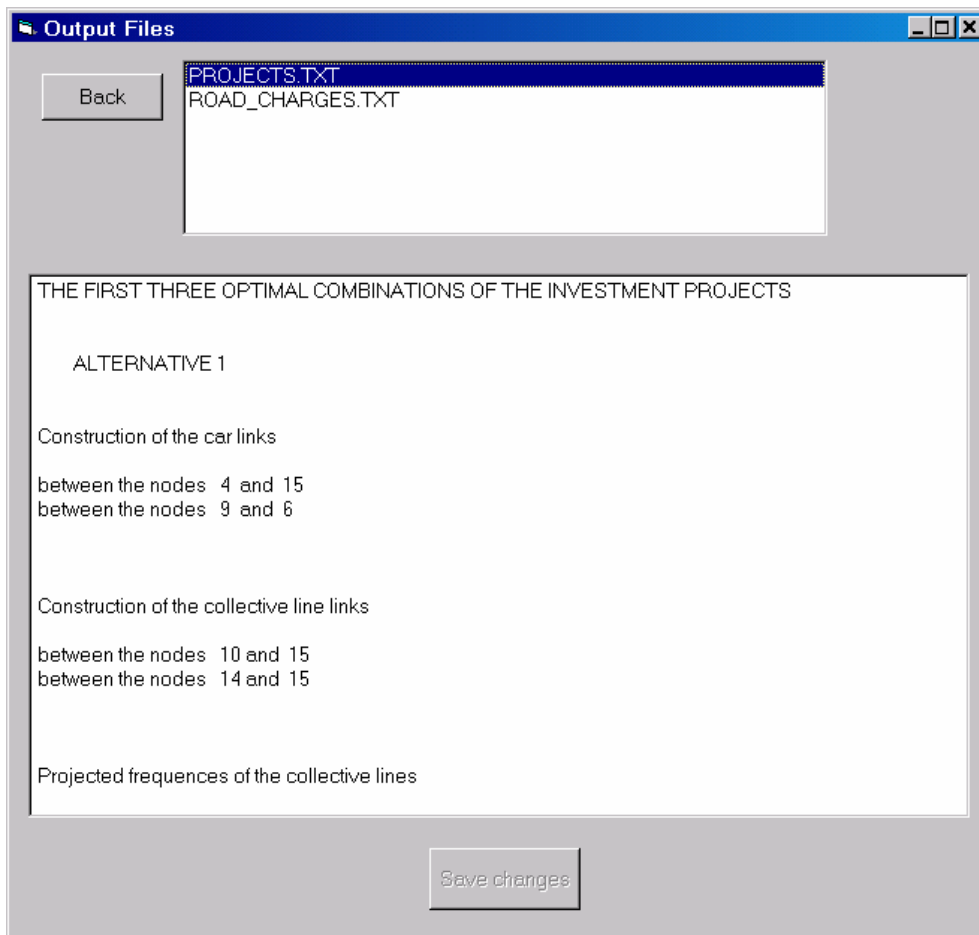
5.6 Knappene for start, se inputdata og se outputdata

Etter å ha gjort de nødvendige valgene som beskrevet ovenfor, kan beregningene startes ved å trykke "Start calculations". Analysen gjennomføres da med de data som brukeren har lagt inn, og som finnes i tekstformat i filer med merket **.txt**. Disse inputfilene kan redigeres enten med en standard teksteditor som Text Pad eller med editoren som følger med programvaren. Ved å trykke på "View input data" får brukeren tilgang til inputdatafilene, og kan editere dem direkte i programmet. Hvis du foretrekker å bruke standard teksteditorer, må du gå inn i mappa **C:\NDP\data** hvor alle inputdatafilene er lagret, og velge de som du vil editere. Se kapittel 7 for navn og beskrivelse av hver av inputfilene.



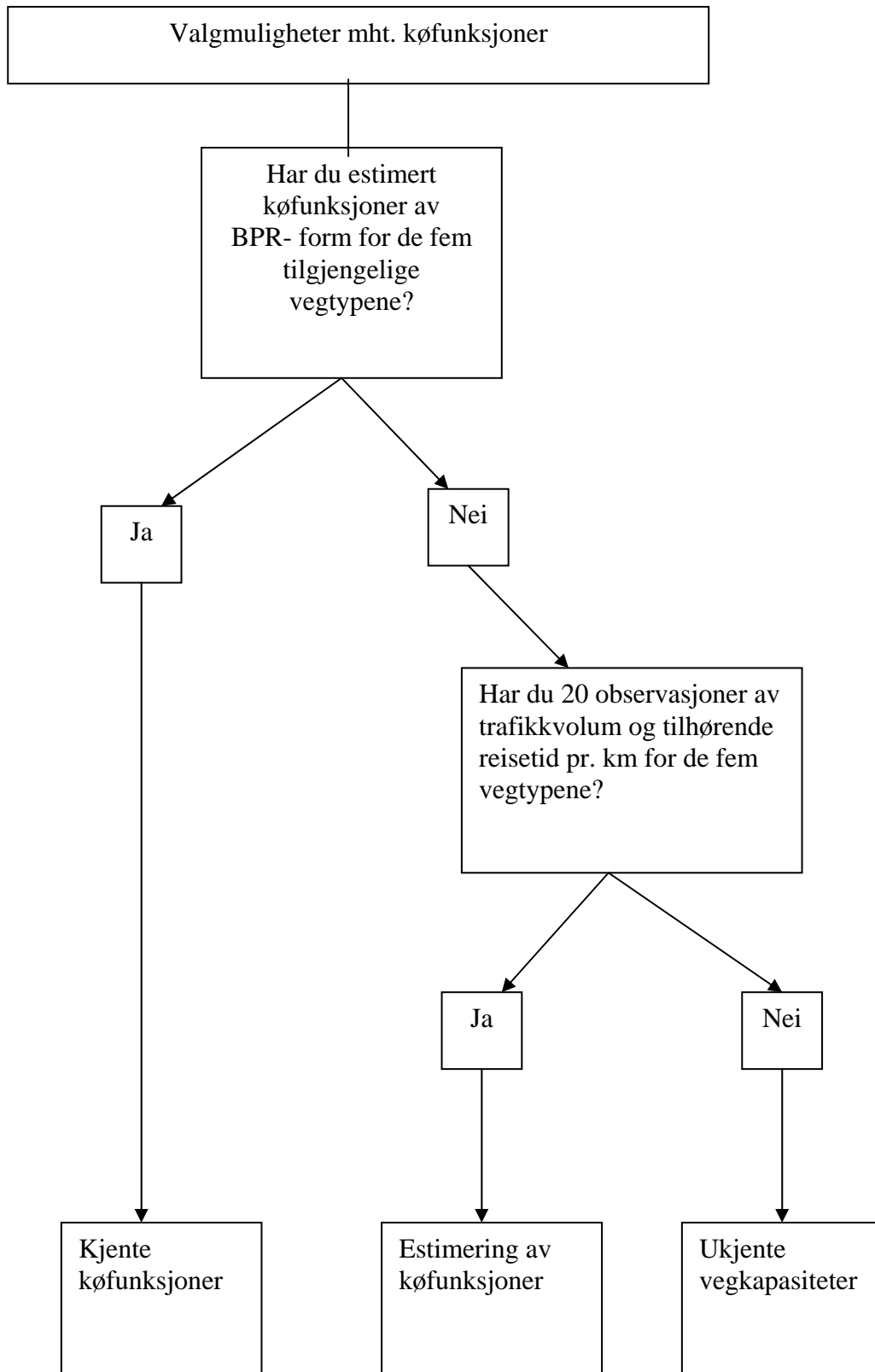
Mens beregningene pågår vises meldingen "GAMS running" i vinduet. Den forsvinner når beregningene er fullført.

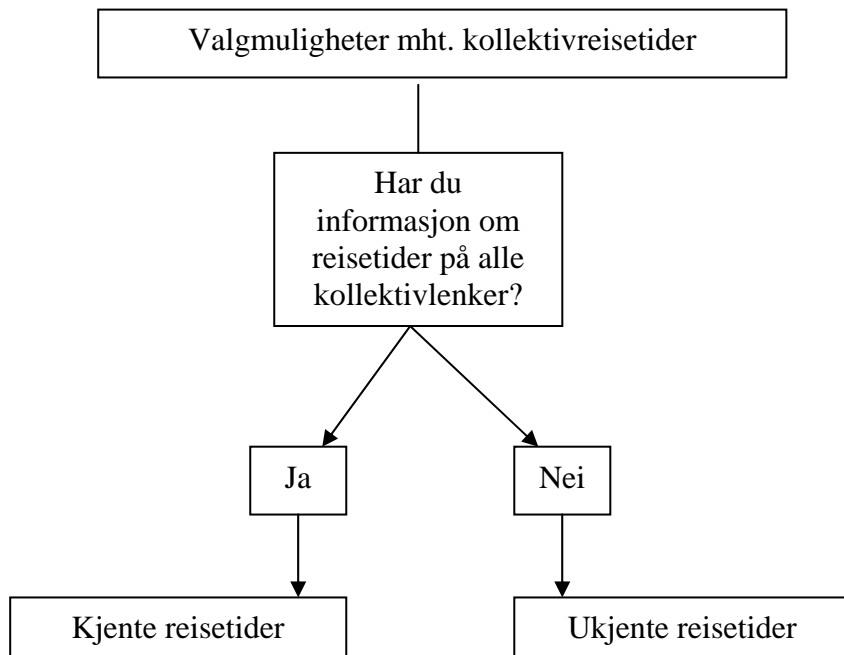
Når beregningene er fullført kan brukeren få tilgang til outputfilene enten ved å bruke en standard teksteditor til å åpne filene i mappa **C:\NDP\output** eller ved å trykke "view output" i hovedvinduet og bruke programmets egen editor.



6 Valg mht. etterspørselsfunksjoner, køfunksjoner og reisetider

Informasjonsnivået til brukeren avgjør hvilke valg hun må gjøre. Hensikten med dette kapitlet er å hjelpe henne med å bestemme sitt informasjonsnivå og dermed hva programmet skal gjøre. Valgene mht. etterspørselsfunksjoner, køfunksjoner og reisetider med kollektivtransport er vist i de følgende diagrammene. (Merk: Det første diagrammet omtaler fem vegtyper. Vi kan ikke vente å ha empiriske observasjoner av åttefeltsveg, så denne vegtypen må anslås på annen måte).





Utenom valgene som avhenger av informasjonsnivået er det også noen andre valg som må gjøres før programmet kan kjøres. Det anbefales generelt å teste både alternativet med fast budsjett og alternativet med optimale bomavgifter, for å se om brukerfinansiering er viktig for å oppnå det samfunnsøkonomisk beste resultatet.

7 Inputfilene

Inputfilene skal beskrive vegnettverket, kollektivnettverket, etterspørselsfunksjonene og infrastrukturprosjektene. Alle inputfiler har tekstformat. Måten du legger inn data i dem er avgjørende for at programmet skal fungere og gi riktig resultat. Følger du følgende generelle regler vil du unngå problemer:

- Når det gjelder å gjengi vektorer (lister), er følgende syntakser ekvivalente.
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 er ekvivalent med 1*10
1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 13, 14, 15 er ekvivalent med 1*4, 10*15
- En endimensjonal tabell (for eksempel en tabell som tilordner en verdi til hver av kollektivlinjene) skal representeres slik:

1	0.1
2	0.2
3	0.3

- Todimensjonale tabeller skal representeres slik:

	1
1.1	100
1.2	150
2.1	190
2.2	110

- Flerdimensjonale tabeller skal representeres slik:

	1	2	3
1.2	1	1	0
2.2	0	0	1
3.2	1	1	1

- Tall i tabeller må utgjøre klare og tydelige kolonner, som vist her:

	1	2	3
10	1	0	0
4	0	1	0
14	0	0	1

7.1 Felles inputfiler

1. Mengden av noder i transportnettverket

nodeset.txt

Eksempel: 1*60

2. Mengden av soner som det kan reises til og fra

zoneset.txt

Eksempel: 1*10,15,18, 20, 25*30

Merk: Mengden av soner må være en delmengde av mengden av noder

3. Mengden av kollektivlinjer

lineset.txt

Eksempel: 1*3

4. Mengden av varianter av framtidige frekvenser

freqset.txt

Eksempel: 1

Merk: Hver variant består av en pakke med egne frekvenser for hver linje

5. Strukturen i biltransportnettverket

carnet.txt

Eksempel:

1	
1.5	1
2.6	1
4.8	1
5.2	1

Merk: Bare eksisterende veger skal tas med i denne matrisen. Alle lenker i matrisen representerer tovegskjørte veger med like mange filer i begge retninger, slik at når en har skrevet opp 1.5 for å markere at det finns en lenke som forbinder 1 og 5, er det feil å også skrive opp 5.1. Men *i stedet for 1.5 kunne en naturligvis ha ført opp 5.1.*

6. Veglenkenes typer

road_types.txt

Eksempel:

1	
1.5	4
2.6	2
4.8	3
5.2	1

Merk: Potensielle NYE lenker må også legges inn i denne lista!

7. Veglenkenes lengde i kilometer

lengths_km.txt

Eksempel:

1	
1.5	5
2.6	2
4.8	3
5.2	6

Merk: Potensielle NYE lenker må også legges inn i denne lista!

8. Friflyts fart for veglenketypene i km/t

ff_times.txt

Eksempel:

1	80
2	60
3	60
4	50

9. Miljøkostnader for bil i kroner pr. kjøretøykm envcosts.txt

Eksempel:

1	
1.5	1.2
2.6	1.4

4.8 1.6

10. Veglenker som kan avgiftsbelegges

roads_charged.txt

Eksempel: 1
 1.5 1
 2.6 1
 4.8 1

11. Lenkeavgifter i kroner pr. passering

road_charges.txt

Eksempel: 1
 1.5 12
 2.6 14
 4.8 6

12. Strukturen i kollektivnettverket

colnet.txt

Eksempel: 1 2 3
 1.3 1 0 0
 2.4 1 0 0
 3.5 0 1 0
 4.7 0 1 0
 2.5 0 0 1
 3.7 0 0 1

Merk: Bare eksisterende kollektivlenker skal tas med i denne tabellen. Alle lenker i tabellen representerer tovegskjorte kollektivlenker i begge retninger, slik at når en har skrevet opp 1.3 for å markere at det finns en lenke som forbinder 1 og 3, er det feil å også skrive opp 3.1. Men *i stedet for* 1.3 kunne en naturligvis ha ført opp 3.1.

13. Nåværende kollektivfrekvenser i avganger pr. time

frequencies.txt

Eksempel: 1 5
 2 6
 3 4

14. Driftskostnader pr. år på nåværende kollektivlinjer i kroner

oper_costs.txt

Eksempel: 1 5000000
 2 6000000
 3 4000000

Merk: Driftskostnadene inkluderer kapitalkostnader for eksisterende rullende materiell. For å legge inn nødvendige data her, kreves det en "ekstern" modell for beregning av linjekostnadene.

15. Kollektivlinjenes kapasitet i passasjerer pr. avgang

translation.txt

Eksempel: 1 163
 2 300
 3 400
 4 186
 5 350

Merk: Når etterspørselen overstiger kapasiteten, vil programmet øke kollektivtrafikantenes reisekostnader i henhold til lenkekostnadsfunksjoner av den typen som er vist i avsnitt 4.2. I kollektivtransporten vil en slik funksjon ikke gjenspeile økt reisetid, men andre kostnader, som trengsel om bord eller økte muligheter til å ikke komme med avgangen.

16. Billettpris (en veg) i kroner for sonepar tickets.txt

Eksempel:	1
1.2	15
2.3	20
4.3	24

17. Mulige nye eller forbedrede veglenker carnew.txt

Eksempel:	1
3.5	1
1.7	1

18. Investeringskostnad i kroner, nye eller forbedrede veglenker carinv.txt

Eksempel:	1
3.5	500000
1.7	7000000

Merk: Investeringskostnadene er ikke annuiteter, men virkelig anleggskostnad.

19. Ny kapasitet i kjøretøy pr. time, nye/forbedrede veglenker capacities_new.txt

Eksempel:	1
3.5	1500
1.7	1700

20. Nye lenker på kollektivlinjene colnew.txt

Eksempel:	1	2	3
1.4	1	0	0
2.6	0	1	0
3.7	0	0	1

21. Investeringskostnad i kroner, nye lenker på kollektivlinjene colinv.txt

Eksempel:	1	2	3
1.4	6000000	0	0
2.6	0	8000000	0
3.7	0	0	4000000

22. Økte driftskostnader i kroner, nye kollektivlenker oper_costs_new.txt

Eksempel:	1	2	3
1.4	-6000	0	0
2.6	0	8000	0
3.7	0	0	14000

Merk: Disse kostnadene er benevnt kroner pr. linje pr. år, ikke pr. lenke. De inkluderer alle positive og negative kostnader for kollektivselskapet på grunn av den forbedrede lenken, inkludert kapitalkostnader pr. år vedrørende det rullende materiellet. Beregning av kostnadsendringene må gjøres utenfor programmet. Ideelt sett bør kostnadsendringen også ta hensyn til den nye optimale frekvensen, men i denne versjonen av programmet beregnes de to kostnadsendringene separat (se neste pkt.).

23. Nye frekvenser på kollektivlinjene, avganger pr. time **freqnew.txt**

Eksempel:	1	2
1	5	6
2	6	6
3	6	10

Merk: Linjenumrene er numrene på kollektivlinjene, mens kolonnennumrene er varianter av pakker av frekvenser. Hvis frekvensen på en linje er uendret fra utgangspunktet i en eller flere av variantene, må de tilsvarende investeringskostnadene (kapitalkostnader for rullende materiell, se neste pkt.) settes til null. Dvs. vi regner ikke med andre endringer i driftsopplegget enn frekvensendringer her (se merknad til forrige pkt.).

24. Økt kapitalkostnad i kroner, rullende materiell ved nye frekvenser **freqinv.txt**

Eksempel:	1	2
1	30000	40000
2	50000	60000
3	40000	50000

Merk: Kostnadene er benevnt kroner pr. linje pr. år.

25. Økte driftskostnader i kroner ved nye frekvenser **oper_costs_freq.txt**

Eksempel:	1	2
1	30000	40000
2	50000	60000
3	40000	50000

Merk: Kostnadene er benevnt kroner pr. linje pr. år.

26. Fast investeringsbudsjett i kroner **budget.txt**

Eksempel: 25000000

Merk: Ikke annuitet.

27. Rushtids tidsverdi i kroner/time
value_trav.txt

Eksempel: 150

28. Tidsverdi utenom rush i kroner/time **value_trav_other.txt**

Eksempel: 100

29. Kollektivtransportens tilskuddsandel **share_govt.txt**

Eksempel: 0.4

30. Kalkulasjonsrente

discount_rate.txt

Eksempel: 0.065

31. Reiser utenom rush som andel av rushtidsreiser

share_other_trips.txt

Eksempel: 1

1.1 1.65

1.2 1.65

2.1 1.65

Merk: Første kolonne er reiserelasjoner (sonepar). Andelen kan være spesifikk for hver reise-relasjon

32. Skyggepris på offentlige midler

shadow_price.txt

Eksempel: 0.2

33. Reisekostnader i kollektivnettverket

transit_costs.txt

Eksempel:	1	2	3
1.3	5	0	0
2.4	9	0	0
3.5	0	8	0
4.7	0	11	0
2.5	0	0	18
3.7	0	0	10

Merk: Potensielle NYE lenker må også legges inn i denne lista! Alle lenker i tabellen representerer tovegskjørte kollektivlenker i begge retninger, slik at når en har skrevet opp 1.3 for å markere at det finns en lenke som forbinder 1 og 3, er det feil å også skrive opp 3.1. Men *i stedet for* 1.3 kunne en naturligvis ha ført opp 3.1.

7.2 Inputfiler som avhenger av brukerens informasjon

Køfunksjonene forutsettes kjent

1. Kapasiteter for vegtypene i biler/time

capacities.txt

Eksempel:	1	20000
	2	15000
	3	16000
	4	17000

2. Koeffisienten α for vegtypene

alphas.txt

Eksempel: 1 0.2

2	0.4
3	0.6
4	0.8

3. Koeffisienten β for vegtypene

betas.txt

Eksempel:	1	0.6
	2	0.8
	3	1.2
	4	1.4

Estimering av køfunksjonene

1. Observasjoner av lenkevolumer

volumes_r1.txt

volumes_r2.txt

volumes_r3.txt

volumes_r4.txt

Eksempel:	1	15000
	2	20000
	3	24000

	29	85000
	30	90000

Merk: Her er første kolonne nummeret på observasjonen. Tilhørende observasjon av tidskostnad (neste pkt.) må naturligvis nummereres på samme måte. Observasjoner som gjelder lenketype 1 legges inn i fila r1, lenketype 2 i fila r2 osv.

2. Tilhørende observasjon av tidskostnad i timer

travel_costs_r1.txt

travel_costs_r2.txt

travel_costs_r3.txt

travel_costs_r4.txt

Eksempel:	1	0.15
	2	0.2

3	0.24
...	...
29	0.85
30	0.9

Merk: Her er første kolonne nummeret på observasjonen. Tilhørende observasjon av lenkevolum (forrige pkt.) må naturligvis nummereres på samme måte. Observasjoner som gjelder lenketype 1 legges inn i fila r1, lenketype 2 i fila r2 osv.

Estimering av vegkapasiteter

1. Minimumskapasiteter for vegtypene i biler/time

min_capacities.txt

Eksempel:

1	2500
2	1500
3	1000
4	500

2. Maksimumskapasiteter for vegtypene i biler/time

max_capacities.txt

Eksempel:

1	3000
2	1850
3	1400
4	700

3. Koeffisienten α for vegtypene

alphas.txt

Eksempel:

1	0.2
2	0.4
3	0.6
4	0.8

4. Koeffisienten β for vegtypene

betas.txt

Eksempel:

1	0.6
2	0.8
3	1.2
4	1.4

Kjente kollektivreisetider

1. Kollektivreisetider i timer

transit_costs.txt

Eksempel:	1	2	3
1.3	0.3	0	0
2.4	0.4	0	0
3.5	0	0.2	0
4.7	0	0.4	0
2.5	0	0	0.3
3.7	0	0	0.2

Merk: Her er første kolonne kollektivlenker.

Ukjente kollektivreisetider

1. Minimums kollektivreisetider i timer

min_transit_costs.txt

Eksempel:	1	2	3
1.3	0.3	0	0
2.4	0.4	0	0
3.5	0	0.2	0
4.7	0	0.4	0
2.5	0	0	0.3
3.7	0	0	0.2

2. Maksimums kollektivreisetider i timer

max_transit_costs.txt

Eksempel:	1	2	3
1.3	0.8	0	0
2.4	1.2	0	0
3.5	0	0.8	0
4.7	0	1.2	0
2.5	0	0	0.9
3.7	0	0	0.8

Merk: Her er første kolonne kollektivlenker.

7.3 Inputfiler for reiseetterspørsel

Vi må skille mellom tilfellet hvor våre data om etterspørselen er på en tilstrekkelig aggregert form til å passe inn i det sonesystemet som er definert i avsnitt 7.1, og det tilfellet hvor data er fra en detaljert modell og må aggregeres.

Det detaljerte sonesystemet defineres av brukeren i følgende fil: **det_zoneset.txt**

Eksempel: 1*100

Når vi har data for et detaljert sonesystem, må brukeren gi inn en aggregeringsregel i programmet. Aggregeringsregelen inneholder informasjon om hvilke detaljerte soner som hører til i hver av de aggregerte sonene vi skal bruke i programmet. Denne informasjonen gis i følgende inputfil: **aggregation_rule.txt**

Eksempel:	1	1
	2	1
	3	2
	4	2
	5	3
	6	3

Note: I første kolonne står sonenumrene i det detaljerte sonesystemet, og i andre kolonne står sonenumrene i det kompakte sonesystemet. I dette eksemplet består det detaljerte systemet av seks soner og det kompakte av tre.

Nested CES funksjonsform på etterspørselsfunksjonene

(i) *Alle data legges inn i det kompakte sonesystemet*

1. Generaliserte reisekostnader i kroner med bil i utgangspunktet (kolonne 1) og i en situasjon der de er endret i ulik grad for de ulike reiserelasjonene og transportmåtene (kolonne 2)

carcosts.txt

Eksempel:	1	2
1.1	140	150
1.2	150	152
2.1	130	134

Merk: Her er kolonnen lengst til venstre reiserelasjoner (sonepar). Hensikten med kolonnen merket 2 er at det trenges data fra litt ulike situasjoner for å kunne estimere ukjente parametre i den kompakte modellen. Vi ønsker å unngå kollinearitet. Kostnadene gjelder pr. tur en veg.

2. Den tilsvarende etterspørselen i biler/time

cardem.txt

Eksempel:	1	2
1.1	100	98
1.2	150	145
2.1	200	190

Merk: Her er første kolonne reiserelasjoner (sonepar). Denne tabellen hører sammen med den foregående og må ha samme rekkefølge på soneparane. Et fast belegg på 1.2 passasjerer pr. bil er forutsatt i programmet.

3. Reisekostnader i kroner med kollektiv i utgangspunktet (kolonne 1) og i en situasjon der de er endret i ulik grad for de ulike reiserelasjonene og transportmåtene (kolonne 2).

colcosts.txt

Eksempel:	1	2
1.1	180	178
1.2	200	195
2.1	250	220

Merk: Her er kolonnen lengst til venstre reiserelasjoner (sonepar). Hensikten med kolonnen merket 2 er at det trengs data fra litt ulike situasjoner for å kunne estimere ukjente parametre i den kompakte modellen. Vi ønsker å unngå kolinearit. Kostnadene gjelder pr. tur en veg.

4. Den tilsvarende kollektiveterspørselen i passasjerer/time **coldem.txt**

Eksempel:	1	2
1.1	150	153
1.2	250	256
2.1	270	275

Merk: Her er første kolonne reiserelasjoner (sonepar). Denne tabellen hører sammen med den foregående og må ha samme rekkefølge på soneparene.

(ii) Alle data legges inn i det detaljerte sonesystemet

1. Reisekostnader i kroner med bil i utgangspunktet (kolonne 1) og i en situasjon der de er endret i ulik grad for de ulike reiserelasjonene og transportmåtene (kolonne 2) **det_carcosts.txt**

Merk: Denne tabellen fylles ut på tilsvarende måte som samme tabell under avsnitt (i). Forskjellen er definisjonen av sonene og navnet på fila.

2. Den tilsvarende etterspørselen i biler/time
det_cardem.txt

Merk: Denne tabellen fylles ut på tilsvarende måte som samme tabell under avsnitt (i). Forskjellen er definisjonen av sonene og navnet på fila. Et belegg på 1.2 passasjerer pr. bil er forutsatt.

3. Reisekostnader i kroner med kollektiv i utgangspunktet (kolonne 1) og i en situasjon der de er endret i ulik grad for de ulike reiserelasjonene og transportmåtene (kolonne 2). **det_colcosts.txt**

Merk: Denne tabellen fylles ut på tilsvarende måte som samme tabell under avsnitt (i). Forskjellen er definisjonen av sonene og navnet på fila.

4. Den tilsvarende kollektiveterspørselen i passasjerer/time **det_coldem.txt**

Merk: Denne tabellen fylles ut på tilsvarende måte som samme tabell under avsnitt (i). Forskjellen er definisjonen av sonene og navnet på fila.

Nested logit funksjonsform på etterspørselsfunksjonene

(i) Alle data legges inn i det kompakte sonesystemet

1. Skalaparameter for destinasjonsvalg **dest_scale.txt**

Eksempel: 0.4

2. Skalaparameter for transportmiddelvalg **mode_scale.txt**

Eksempel: 0.6

3. Mengden av individtyper i startsonene **individuals.txt**

Eksempel: 1*3

4. Indirekte nytte i kroner for individer av de ulike typene i startsonen i som velger destinasjon j , **indirect_ut.txt**

Eksempel:

	1	2	3
1.1	100	120	130
1.2	90	110	150
2.1	98	100	105
2.2	80	70	100

Merk: Kolonnene representerer individtypene, linjene representerer reiserelasjoner (sonepar).

5. Indirekte nytte i kroner for individer i startsonen i som velger bil som transportmåte, for hver av individtypene i sonen **car_ind.txt**

Eksempel:

	1	2	3
1	100	150	100
2	80	120	150

Note: indexes for types of individuals are the column numbers.

6. Indirekte nytte i kroner for individer i startsonen i som velger kollektivtransport som transportmåte, for hver av individtypene i sonen **col_ind.txt**

Eksempel:

	1	2	3
1	80	50	70
2	80	50	70

7. Antall individer av hver type **tr_budgets.txt**

Eksempel:

	1	2	3
1	300	500	550
2	350	400	480

8. Reisekostnad i kroner med bil mellom sonene **carcosts.txt**

Eksempel:

	1
1.1	140
1.2	150
2.1	130

Merk: Denne tabellen er input til estimering av kapasiteten på lenkene i det forenklede nettverket. Data må tas fra en annen eksisterende modell eller kostnadsmatrise, eller fra empiriske undersøkelser.

9. Reisekostnad i kroner med kollektiv mellom sonene **colcosts.txt**

Eksempel:	1
1.1	180
1.2	200
2.1	250

Merk: Denne tabellen er input til estimering av kapasiteten på lenkene i det forenklede nettverket. Data må tas fra en annen eksisterende modell eller kostnadsmatrise, eller fra empiriske undersøkelser.

(ii) Alle data legges inn i det detaljerte sonesystemet

Data vil her være helt tilsvarende det aggregerte tilfellet i avsnitt (i), og vi viser til eksemplene som er gitt der.

1. Skalaparameteren for destinasjonsvalg **dest_scale.txt**
2. Skalaparameteren for transportmiddel **mode_scale.txt**
3. Mengden av individtyper i startsonene **individuals.txt**
4. Indirekte nytte i kroner for individer av de ulike typene i startsoner i som velger destinasjon j **det_indirect_ut.txt**
5. Indirekte nytte i kroner for individer i startsoner i som velger bil som transportmåte, for hver av individtypene i sonen **det_car_ind.txt**
6. Indirekte nytte i kroner for individer i startsoner i som velger kollektivtransport som transportmåte, for hver av individtypene i sonen **det_col_ind.txt**
7. Antall individer av hver type i startsonene **det_tr_budgets.txt**
8. Reisekostnad i kroner med bil mellom sonene **det_carcosts.txt**

Merk: Denne tabellen er input til estimering av kapasiteten på lenkene i det forenklede nettverket. Data må tas fra en annen eksisterende modell eller kostnadsmatrise, eller fra empiriske undersøkelser.

9. Reisekostnad i kroner med kollektiv mellom sonene **det_colcosts.txt**

Merk: Denne tabellen er input til estimering av kapasiteten på lenkene i det forenklede nettverket. Data må tas fra en annen eksisterende modell eller kostnadsmatrise, eller fra empiriske undersøkelser.

7.4 Inputfiler for optimale avgifter

1. Mengden av lenkeavgiftsvarianter **charge_set.txt**

Eksempel: 1*3

2. Lenkeavgifter i kroner for variantene **charges_variants.txt**

Eksempel: 1 2 3

1.2	20	25	30
1.3	20	25	30
1.5	20	25	30

3. Mengden av kollektivtakstvarianter **ticket_set.txt**

Eksempel: 1*2

4. Kollektivtakster i kroner for variantene

tickets_variants.txt

Eksempel:	1	2	3
1.2	40	45	50
2.3	40	45	50
1.3	40	45	50

8 Outputfilene

Output i programmet består av følgende: Estimatorer for ulike parametre i transportsystemet, egenskaper ved transportsystemet i utgangspunktet, beskrivelse av de tre utvalgte projektkombinasjonene og deres egenskaper, samt de utvalgte vegprisene og billettprisene.

8.1 Estimatorer for parametre i transportsystemet

Før programmet begynner å beregne projektkombinasjoner foretar det estimering av alle parametre som ikke er gitt inn som kjent fra før. Når det gjelder transporttilbudet kan det dreie seg om:

- parametrene α and β for de ulike vegtypene
- vegkapasiteter
- reisetider på lenker i kollektivsystemet

Når det gjelder etterspørselen, vil det avhenge av hva slags etterspørselsfunksjon som er valgt hvilke parametre som skal estimeres og rapporteres:

- elastisitetsparametre i CES-funksjonen
- skalaparametre i logitfunksjonen.

De estimerte parametrene er rapportert i outputfila **estimates.txt**.

8.2 Egenskaper ved transportsystemet i utgangssituasjonen

I en nyttekostnadsanalyse er det forskjellen mellom det alternativet som er testet og nullalternativet som har interesse. Sammenlikningen med nullalternativet er allerede innbakt i beregningene av samfunnsøkonomisk nytte og de ulike elementene av den. Men sammenlikning med nullalternativet (utgangssituasjonen) er også nyttig når det gjelder andre indikatorer. Egenskaper ved utgangssituasjonen er derfor rapportert til å begynne med i den viktigste outputfila, **projects.txt**. Følgende rapporteres:

- Årlige miljøkostnader i kroner
- Årlig overskudd for kollektivselskapet i kroner
- Årlige inntekter fra vegprising i kroner
- Andelen reiser med bil i hele regionen
- Andelen kollektivreiser i regionen
- Totalt antall bilkilometre pr. dag
- Tilgjengelighetsmål for hver sone (hypotetiske enheter)
- Tilgjengelighetsmål for regionen som helhet (hypotetiske enheter)

8.3 De utvalgte kombinasjonene og deres egenskaper

Hovedresultatet av beregningene, slik det er rapportert i **projects.txt**, er de tre prosjektkombinasjonene med høyest score på målfunksjonen (høyest velferd, slik den er målt ved en vanlig nyttekostnadsanalyse, dvs. høyest årlig netto nytte). Prosjektkombinasjonene er ordnet fra den som scorer høyest og nedover. Egenskapene som rapporteres for hver kombinasjon er:

- Årlig netto nytte i kroner (investeringer vil være inkludert i dette som annuiteter, med mindre en har valgt å ikke inkludere investeringene i målfunksjonen)
- Samlede investeringskostnader i kroner (ikke annuitet)
- Årlig samlet konsumentoverskudd i kroner, bestående av, og oppdelt i, konsumentoverskudd i og utenom rush
- Årlig konsumentoverskudd i kroner for hver av startsonene
- Årlige miljøkostnader i kroner
- Årlig overskudd for kollektivselskapet i kroner
- Årlig inntekt fra vegprising (bomavgifter) i kroner
- Andelen bilreiser i hele regionen
- Andelen kollektivreiser i hele regionen
- Totalt antall bilkilometer pr. dag
- Tilgjengelighetsmål for hver sone (hypotetiske enheter)
- Tilgjengelighetsmål for regionen som helhet (hypotetiske enheter)

8.4 De utvalgte avgiftene og deres egenskaper

Dersom en har spesifisert ulike varianter av vegprising (bomavgifter på de definerte lenkene) og ulike varianter av billettpriser, vil en, for hver av de tre utvalgte kombinasjonene, få rapportert de tre variantene av prispolitikken som gir høyest velferd gitt denne prosjektkombinasjonen. Disse opplysningene finnes i fila **opt_charges.txt**. Følgende egenskaper rapporteres for hver av de tre kombinasjonene:

- De tre variantene av bomavgifter og billettpriser som gir høyest velferd
- Årlig netto nytte i kroner (investeringer er inkludert i dette som annuiteter)
- Samlede investeringskostnader i kroner (ikke annuitet)
- Årlig samlet konsumentoverskudd i kroner, bestående av, og oppdelt i, konsumentoverskudd i og utenom rush
- Årlig konsumentoverskudd i kroner for hver av startsonene
- Årlige miljøkostnader i kroner
- Årlig overskudd for kollektivselskapet i kroner
- Årlig inntekt fra vegprising (bomavgifter) i kroner
- Andelen bilreiser i hele regionen
- Andelen kollektivreiser i hele regionen
- Totalt antall bilkilometer pr. dag
- Tilgjengelighetsmål for hver sone (hypotetiske enheter)
- Tilgjengelighetsmål for regionen som helhet (hypotetiske enheter)

Disse egenskapene tilsvarer de som rapporteres fra de tre kombinasjonene av infrastrukturprosjekter med høyest score for målfunksjonen. Ved å sammenlikne verdiene som rapporteres i fila **opt_charges.txt** med verdiene som rapporteres i fila **projects.txt** kan en studere hvordan prissettingen bidrar for hver av indikatorene. Ved å sammenlikne verdiene i fila **opt_charges.txt** for to ulike kjøring, en med få og en med mange potensielle nye infrastrukturforbedringer, kan en se hvordan optimal prissetting endrer seg med kvaliteten på infrastrukturen, og hva prissettingen bidrar med i de to tilfellene. Tilsvarende kan en eksperimentere med endringer i settet av lenker som kan prissettes. Ved å sammenlikne verdiene i fila **projects.txt** for to ulike kjøring, en med dagens prissetting og en med antatt riktigere prissetting, kan en se hvordan optimal infrastrukturpolitikk endrer seg med forutsetningene om prisene.

En kan tenke seg å gjennomføre en prosess der optimal prissetting for den optimale kombinasjonen av infrastrukturprosjekter brukes som input i form av en ny variant for bompengene og billettprisene. Denne prosessen kan gjentas, men det er ingen garanti for at man dermed finner den optimale kombinasjonen av både priser og infrastrukturforbedringer. En simultan optimering av både priser og infrastruktur er ikke implementert i denne versjonen av programmet, men vil utstå til vi har funnet raskere løsningsalgoritmer.

9 Brukervalg mht. målfunksjonen

I denne versjonen av programmet er det ikke mulig å velge en annen målfunksjon enn samfunnsøkonomisk lønnsomhet. Den samfunnsøkonomiske lønnsomheten beregnes i henhold til formelen for W i avsnitt 4.6. W er summen av konsumentoverskudd, endringer i kollektivselskapets resultat, endringer i det offentlige regnskap multiplisert med 1 pluss skyggeprisen for offentlige midler, og end-

ringene i eksterne kostnader. W kan imidlertid beregnes under ulike forutsetninger og med mer eller mindre fullstendige data.

Velferdsfunksjonen W kan forenkles og modifiseres på mange måter, alt etter brukerens ønske. Noen av filene som kan brukes til dette, er: **share_govt.txt**, **shadow_price.txt**, **dummy_other.txt**, **dummy_ec.txt** og **dummy_an.txt**.

Ved å sette Φ lik 1 gjøres myndighetene ansvarlig for kollektivselskapets resultat. Ved å sette p^{sh} lik 1 gjøres skyggeprisen på offentlige midler lik 0 (skyggeprisen på offentlige midler er $p^{sh} - 1$). Ved å sette p^{sh} lik 0 elimineres vegprisingsinntektene og tilskuddet til kollektivtrafikken fra W (Sjøl om den formelen som er gitt for W i avsnitt 4 skulle tyde på noe annet, er det programmert slik at A fremdeles regnes med). Hvis en altså regner med at vegprisingsinntektene vil bli sløst vekk, kan en sette Φ lik 0 og p^{sh} lik 0, mens hvis man regner med at de vil bli brukt til å dekke kollektivselskapets underskudd, mens det som blir til overs, blir sløst vekk, kan man sette Φ lik 1 og p^{sh} lik 0 (det samme kan man gjøre om har andre grunner for å ikke ville ta hensyn til kollektivselskapet og myndighetene i målfunksjonen).

Hvis brukeren mener miljøkostnadene er for usikre til å tas med i målfunksjonen, eller ikke har gode nok data om dem, kan hun sette dummyvariabelen i inputfila **dummy_ec.txt** til null.

Hvis brukeren av en eller annen grunn ikke vil ta hensyn til annuiteten A i målfunksjonen W , kan hun sette dummyvariabelen i inputfila **dummy_an.txt** til null. Endelig er det mulig at hun ikke vil ta med andre perioder av dagen i målfunksjonen. Ved å sette dummyvariabelen i inputfila **dummy_other.txt** til null, vil konsumentoverskuddet bare bestå av konsumentoverskudd for rushtidsreisene, og tilsvarende for kollektivselskapets resultat, vegprisingsinntektene og miljøkostnadene.

10 Andre opplysninger

Programmet varsler ikke om det er noen feil i inputfilene. Før beregningene starter, bør en derfor sjekke grundig:

- 1) At alle nødvendige inputfiler er fylt ut med alle nødvendige data, og at disse data er riktige. Når det mangler data på noen plasser i en fil som trengs til beregningene, vil programmet anta at verdien i disse cellene er lik 0. Dette kan naturligvis gi feilaktige resultater. Like feilaktige resultater kan det bli om noen av dataene for eksempel har feil benevning.
- 2) At data i tekstfilene har det format som kreves, slik at programmet leser dem riktig. En slik kontroll er spesielt påkrevet når store datamengder lastes inn fra en ekstern transportmodell.

Vi er oppmerksom på enkelte svakheter ved den nåværende versjonen av programmet. Av de viktigste kan nevnes at optimal infrastruktur og priser ikke velges simultant, at løsningsalgoritmene trolig kan forbedres, at vi ikke tar ordentlig hensyn til skatter og avgifter, at vi burde hatt flere lenketyper, at endringen i kollektivselskapets kostnader ved samtidig endring av kollektiv-

infrastrukturen og frekvensene beregnes unøyaktig, at regimene for tilskudd til kollektivselskapet burde endres, at kø og trengsel i kollektivsystemet kan forbedres, og at det ikke er mulig å endre materielltype i kollektivtrafikken uten å definere en helt ny linje.

Vi tror imidlertid at programmet fungerer bra nok til å gjennomføre validering av prosedyrene for aggregering av soner og nettverk, og til en første vurdering av betydningen av avhengighet mellom prosjekter. Vi håper andre vil ha interesse av å eksperimentere med programmet selv på dette tidlige stadiet, og at de kan bidra til å avsløre andre feil og forbedringsmuligheter.

Litteratur

- ECON (2003) *Eksterne marginale kostnader ved transport*. Rapport 54/2003.
- Eriksen, K.S., Markussen, T.E. og Pütz, K. (1999) *Marginale kostnader ved transportvirksomhet*. TØI-rapport 464/1999.
- Yang, H., Meng, Q. And M.G.H. Bell (2001) Simultaneous Estimation of the Origin-Destination Matrices and Travel-Cost Coefficient for Congested Networks in a Stochastic User Equilibrium. *Transportation Science* **35**(2), 107-123.

Vedlegg 2

Detailed mathematical derivation of the aggregation rule for nested Logit travel demand functions

In order to perform the consistent aggregation of bested Logit travel demands, let us first introduce the following notation. Denote by P_j^i the probability that individual at the origin zone i chooses zone j as his destination zone. Denote by $P_{j,car}^i, P_{j,pub}^i$ the probabilities that individual at the origin zone i chooses to travel by car or by public transport respectively, given that he has chosen zone j as his destination zone. Denote by $P_{ij}^{car}, P_{ij}^{pub}$ the probabilities that an individual at origin zone i chooses to travel to destination zone j using car or public transport respectively. Given this notation nested Logit demands are written in the following form:

$$D_{ij}^{car} = T_i P_{ij}^{car} = T_i P_j^i P_{j,car}^i$$

$$D_{ij}^{pub} = T_i P_{ij}^{pub} = T_i P_j^i P_{j,pub}^i$$

where

$$P_j^i = \frac{\exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j^{ii})}{\sum_j \exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j^{ii})}$$

$$\text{with } V_j^{ii} = \frac{1}{\mu} \log(\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub}))$$

$$P_{j,car}^i = \frac{\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car})}{\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub})}$$

$$P_{j,pub}^i = \frac{\exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub})}{\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub})}$$

The introduced probabilities satisfy the following requirements:

$$\sum_j P_j^i = 1 \quad \text{for } i \in \{1, \dots, Z^d\}$$

$$P_{j,car}^i + P_{j,pub}^i = 1 \quad \text{for } i, j \in \{1, \dots, Z^d\}$$

$$P_j^i = P_{ij}^{car} + P_{ij}^{pub} \text{ for } i, j \in \{1, \dots, Z^d\}$$

In order to perform aggregation of nested Logit travel demands from the detailed zone system to the compact one, one should derive a number of dependences between the introduced detailed zone probabilities $P_j^i, P_{j,car}^i, P_{j,pub}^i$ for $i, j \in \{1, \dots, Z^d\}$ and similar compact zone probabilities $P_J^I, P_{J,car}^I, P_{J,pub}^I$ for $I, J \in \{1, \dots, Z^c\}$. Based on these dependences it is possible to provide the consistent rules of aggregation for all elements of nested Logit travel demand functions.

The following relationships are true:

$$P_J^I = \sum_{j \in J} (P_j^I P_{j,car}^I + P_j^I P_{j,pub}^I) = \sum_{j \in J} P_j^I \quad (1)$$

$$P_J^I P_{J,car}^I = \sum_{j \in J} P_j^I P_{j,car}^I \Leftrightarrow P_{J,car}^I = \frac{\sum_{j \in J} P_j^I P_{j,car}^I}{\sum_{j \in J} P_j^I} \quad (2)$$

$$P_J^I P_{J,pub}^I = \sum_{j \in J} P_j^I P_{j,pub}^I \Leftrightarrow P_{J,pub}^I = \frac{\sum_{j \in J} P_j^I P_{j,pub}^I}{\sum_{j \in J} P_j^I} \quad (3)$$

Relationship (1) is equivalent to the following one:

$$\frac{\exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j'^i)}{\sum_{j'} \exp \lambda (\tilde{V}_{j'}^i + V_{j'}'^i)} = \sum_{j \in J} \frac{\exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j'^i)}{\sum_{j'} \exp \lambda (\tilde{V}_{j'}^i + V_{j'}'^i)} \Leftrightarrow$$

$$\exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j'^i) = \sum_{j \in J} \exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j'^i) = \sum_{j \in J} \exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j'^i) \Rightarrow$$

$$\tilde{V}_j^i = \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{j \in J} \exp \lambda \tilde{V}_j^i \right) \quad \text{and} \quad (4)$$

$$V_j'^i = \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{j \in J} \exp \lambda (\tilde{V}_j^i + V_j'^i) \right) - \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{j \in J} \exp \lambda \tilde{V}_j^i \right) \quad (5)$$

where

$$V_j'^i = \frac{1}{\mu} \log \left(\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub}) \right)$$

$$V_j'^i = \frac{1}{\mu} \log \left(\exp \mu (\tilde{V}_{car}^i - c_{ij}^{car}) + \exp \mu (\tilde{V}_{pub}^i - c_{ij}^{pub}) \right)$$

Given (4) and (5), the following relationships are derived from (2) and (3):

$$\begin{aligned}
 P_{J,car}^i &= \frac{\exp \mu(\tilde{V}_{car}^i - c_{iJ}^{car})}{\exp \mu V_J^i} = \frac{\sum_{j \in J} P_j^i P_{j,car}^i}{\sum_{j \in J} P_j^i} \Leftrightarrow \\
 \exp \mu(\tilde{V}_{car}^i - c_{iJ}^{car}) &= \exp \mu V_J^i \cdot \frac{\sum_{j \in J} P_j^i P_{j,car}^i}{\sum_{j \in J} P_j^i} \Leftrightarrow \\
 c_{iJ}^{car} &= \tilde{V}_{car}^i - V_J^i - \frac{1}{\mu} \log \left(\frac{\sum_{j \in J} P_j^i P_{j,car}^i}{\sum_{j \in J} P_j^i} \right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

The same type of relationship is true for the generalized costs of traveling by public transport:

$$c_{iJ}^{pub} = \tilde{V}_{pub}^i - V_J^i - \frac{1}{\mu} \log \left(\frac{\sum_{j \in J} P_j^i P_{j,pub}^i}{\sum_{j \in J} P_j^i} \right) \quad (7)$$

In order to aggregate travel demands across the origin zones one should use a number of relationships between the probabilities for the detailed $P_j^i, P_{j,car}^i, P_{j,pub}^i$ and the compact zone $P_J^i, P_{J,car}^i, P_{J,pub}^i$ systems that are based upon the sampling theory. According to the sampling theory, the total share of individuals with certain characteristics in the population is equal to the weighted sum of shares of such individuals in different population groups, with the used weights being equal the share of these groups in the total population. Given that shares are interpreted as probabilities, the sample theory results in the following relationships:

$$P_J^i = \sum_{j \in J} \frac{T_j}{T_I} P_j^i \quad (8)$$

$$P_{J,car}^i = \sum_{j \in J} \frac{T_j}{T_I} P_{j,car}^i \quad (9)$$

$$P_{J,pub}^i = \sum_{j \in J} \frac{T_j}{T_I} P_{j,pub}^i \quad (10)$$

where $T_I = \sum_{i \in I} T_i$

The relationship (8) is equivalent to:

$$\begin{aligned} \frac{\exp \lambda(\tilde{V}_J^I + V_J^{II})}{\sum_{J'} \exp \lambda(\tilde{V}_{J'}^I + V_{J'}^{II})} &= \sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \frac{\exp \lambda(\tilde{V}_J^i + V_J^{II})}{\sum_{J'} \exp \lambda(\tilde{V}_{J'}^i + V_{J'}^{II})} \Leftrightarrow \\ \exp \lambda(\tilde{V}_J^I + V_J^{II}) &= \sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \exp \lambda(\tilde{V}_J^i + V_J^{II}) = \sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \exp \lambda(\tilde{V}_J^i + V_J^{II}) \Rightarrow \\ \tilde{V}_J^I &= \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \exp \lambda \tilde{V}_J^i \right) = \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \left(\sum_{j \in J} \exp \lambda \tilde{V}_j^i \right) \right) \end{aligned}$$

(11)

$$\begin{aligned} V_J^{II} &= \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \exp \lambda(\tilde{V}_J^i + V_J^{II}) \right) - \frac{1}{\lambda} \log \left(\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} \exp \lambda \tilde{V}_J^i \right) = \\ &= \frac{1}{\mu} \left(\exp \mu(\tilde{V}_{car}^I - c_{IJ}^{car}) + \exp \mu(\tilde{V}_{pub}^I - c_{IJ}^{pub}) \right) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\tilde{V}_{car}^I = \log \left(\sum_{i \in I} \exp \tilde{V}_{car}^i \right)$$

(12)

$$\tilde{V}_{pub}^I = \log \left(\sum_{i \in I} \exp \tilde{V}_{pub}^i \right)$$

(13)

Relationships (9) and (10) are equivalent to:

$$P_{J,car}^I = \frac{\exp \mu(\tilde{V}_{car}^I - c_{IJ}^{car})}{\exp \mu V_J^{II}} = \frac{\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} P_{J,car}^i}{\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} P_J^i} \Rightarrow$$

$$c_{IJ}^{car} = \tilde{V}_{car}^I - V_J^{II} - \frac{1}{\mu} \log \left(\frac{\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} P_{J,car}^i}{\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} P_J^i} \right)$$

(14)

The generalized costs of traveling by public transport are derived in the same manner:

$$c_{IJ}^{pub} = \tilde{V}_{pub}^I - V_J^{II} - \frac{1}{\mu} \log \left(\frac{\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} P_{J,pub}^i}{\sum_{i \in I} \frac{T_i}{T_I} P_J^i} \right)$$

(15)

Vedlegg 3

Implementation of the model for Oslo/Akershus case study

Case study used for the analysis in this section covers the transport system of Oslo/Akershus region of Norway. It is a rather large part of Norway in terms of its population, which is about 700 000 citizens. Both road system and public transport system are well developed. There are four types of public transport in this region: metro, bus, tram, train and boat, with bus system being the most developed one. Road system is rather elaborated, but congestion is typical phenomenon in the rush hour. Car users pay a certain fee in order to enter the city. The level of information concerning transport system in the region is rather high, so that social welfare measure W is calculated as follows:

$$W = CS + (1 - \Phi)(OS^1 - OS^0) + p^{sh}\Phi(OS^1 - OS^0) + p^{sh}(RP^1 - RP^0) - (EC^1 - EC^0) - A$$

where p^{sh} denotes the shadow price of governmental funds. CS is the consumer surplus consisting of the consumer surplus for those traveling in the rush hour and in other periods of the day. OS is the operative surplus of public transport agency and Φ is the share of governmental financing for public transport. RP is the revenue from road pricing, EC is the environmental costs and A is the annuitant of total investment costs. Subscripts 0 and 1 correspond respectively to situations before and after investments are done.

Transport network of the region used for the analysis is simplified by including just major roads. Such simplification is acceptable since the analysis concentrates on the rush hour traffic, which uses mostly major roads. The nodes of transport network represent origins and destinations of traffic/passenger flows, which are called travel zones, as well as crossings of the roads and stops of the public lines. The travel zones used in the model correspond to official division of Oslo into city parts and of Akershus into communalities.

Demands for traveling by car and by public transport between the travel zones are derived from transport and location RETRO model for Oslo/Akershus (Vold, 2000). Demands for traveling between each pair of travel zones are fixed, but shares of people using car and public transport for moving between them are derived according to the elastic demand functions and depend upon the generalized travel costs.

A number of infrastructure project combinations are analyzed in this section, for each of them the network equilibrium model is solved and different types of welfare measures and transport system performance indicators are calculated according to the derived equilibrium volumes on the links.

1. Description of transport network

The Oslo/Akershus region is divided into 36 travel zones that correspond to the official division of Oslo into city parts and of Akershus into communalities as represented at Figure 2 in Appendix. Each travel zone shelters several network

nodes that may be either origin/destination nodes and/or crossings of the roads and stops of the public lines. There are in total 53 network nodes in the model.

Transport network of Oslo/Akershus region consists of car network and public transport network, with the last one being constructed of (1) bus, (2) train, (3) metro, (4) tram, and (5) boat public lines, which are enumerated accordingly. Car and public transport networks are constructed using the same nodes and travel zones.

Car network used for the analysis includes just major roads of the region, which are divided into the four road classes: free-field highway, two-field highway, two-field city road and one-field city road. The generalized link costs depend upon the type of road this link belongs to. Car network of the region is represented at Figure 3 and is a simplified version of the real one. Car users are charged a certain road tolls while entering the city.

Public transport network consists of five different public lines: bus, train, metro, tram and boat. The lines have different structure and frequencies. Frequencies for bus, metro and tram lines are four vehicles per hour, while for train and boat lines are two vehicles per hour. Bus public line has the most developed network structure, which is represented at Figure 4 in Appendix.

The following types of infrastructure improvements are defined on the transport network: construction of new roads, improvement of old roads, construction of new public lines links and increase in frequencies of public lines. Only two types of improvements have been used for the analysis performed in the paper: double increase in capacities of old roads between nodes 53 and 52, 52 and 51, 48 and 49, 33 and 32, 51 and 49, 51 and 50 as well as increase in frequencies of the public lines (2) train up to 4 vehicles per hour, (3) metro up to 5 vehicles per hour, (5) boat up to 4 vehicles per hour. Since investment projects used in the paper are hypothetical ones, there exists no information about their investment costs as well as changes in operational costs they induce. Hence, welfare functions chosen for the analysis do not take investment costs and changes in operational costs into account.

2. Description of travel demands

Travel zones used in the model correspond to the official division of Oslo into city parts and of Akershus into communalities. There are in total 35 travel zones and base case travel demands and travel costs are derived from RETRO model. Given base case values of rush hour travel demands and travel costs, one calculates the total budgets for traveling between each pair of zones. The total budgets are divided between car and public transportation during the rush hour according to the elastic demand functions of the CES functional form (Appendix 2):

$$D_{ij}^{car}(c_{ij}^{car}, c_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub}) = B_{ij} \frac{\left(\frac{\beta_{ij}^{car}}{c_{ij}^{car}}\right)^{1/(1-\mu)}}{\left(\frac{\beta_{ij}^{car}}{c_{ij}^{car}}\right)^{1/(1-\mu)} + \left(\frac{\beta_{ij}^{pub}}{c_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub}}\right)^{1/(1-\mu)}}$$

$$D_{ij}^{pub}(c_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub}, c_{ij}^{car}) = B_{ij} \frac{\left(\frac{\beta_{ij}^{pub}}{c_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub}}\right)^{1/(1-\mu)}}{\left(\frac{\beta_{ij}^{car}}{c_{ij}^{car}}\right)^{1/(1-\mu)} + \left(\frac{\beta_{ij}^{pub}}{c_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub}}\right)^{1/(1-\mu)}}$$

The total travel budgets B_{ij} and coefficients β_{ij}^{car} , β_{ij}^{pub} of demand functions are derived from base case travel demands d_{ij}^{car} , d_{ij}^{pub} and travel costs s_{ij}^{car} , s_{ij}^{pub} in the following way:

$$B_{ij} = d_{ij}^{car} s_{ij}^{car} + d_{ij}^{pub} (s_{ij}^{pub} + t_{ij}^{pub})$$

$$\beta_{ij}^{car} = \frac{d_{ij}^{car}}{d_{ij}^{car} + d_{ij}^{pub}}$$

$$\beta_{ij}^{pub} = \frac{d_{ij}^{pub}}{d_{ij}^{car} + d_{ij}^{pub}}$$

The elasticity parameter μ is chosen in such a way that the modeling system reproduces the base case values of travel demands d_{ij}^{car} , d_{ij}^{pub} in the situation when none of investment projects is implemented, that is in the base case situation. In the case of Oslo/Akershus model it equals -4 , which corresponds to elasticity

$$\sigma = \frac{1}{1 - \mu} = 0.2.$$

Consumer surplus of network users, traveling during the rush hour, may be calculated in the form of equivalent variation measure $EV = e(p^0, u^1) - e(p^1, u^1)$, where $e(p, u)$ is the expenditure function, depending upon the price and utility levels. The functional form of consumer surplus is derived according to the travel demand functions and is represented as (Appendix 2):

$$EV = \sum_i \sum_j B_{ij} \left[\frac{\left(\left(\frac{\beta_{ij}^{car}}{c_{ij}^{car^0}} \right)^{1/(1-\mu)} + \left(\frac{\beta_{ij}^{pub}}{c_{ij}^{pub^0} + t_{ij}^{pub}} \right)^{1/(1-\mu)} \right)^{(1-\mu)/\mu}}{\left(\left(\frac{\beta_{ij}^{car}}{c_{ij}^{car^1}} \right)^{1/(1-\mu)} + \left(\frac{\beta_{ij}^{pub}}{c_{ij}^{pub^1} + t_{ij}^{pub}} \right)^{1/(1-\mu)} \right)^{(1-\mu)/\mu}} - 1 \right]$$

Travel demands of network users, traveling during other periods of the day except rush hour, are derived as a certain share of rush hour demands. Since there is no congestion during other periods of the day except rush hour, CS^{other} is derived as the sum of travel demands in other periods of the day multiplied with the difference in travel costs, which are due to implementation of infrastructure projects.

3. Calculation results

Calculations with the model are performed for the following four types of social welfare measures:

$$W_1 = CS + (1 - \Phi)(OS^1 - OS^0) + p^{sh}\Phi(OS^1 - OS^0) + p^{sh}(RP^1 - RP^0) - (EC^1 - EC^0)$$

$$W_2 = CS + (OS^1 - OS^0) + (RP^1 - RP^0) - (EC^1 - EC^0)$$

$$W_3 = CS - (EC^1 - EC^0)$$

$$W_4 = CS$$

Calculated values are measured in 1000 NOK. Base case characteristics of transportation system are represented in Table 1, while calculated welfare measures and other indicators of infrastructure improvements are represented in Table 2.

Table 1. Base case characteristics of transportation system in 1000 NOK

Base case characteristics	
operative surplus	365838.3
governmental revenue	180.746
external costs	37615.8
share of car transportation	0.635
total distance covered by cars (km)	435251
accessibility measure	1992.752
share of governmental financing	0.5
shadow price of public funds	1.2

Table 2. Welfare measures and other indicators of infrastructure improvements in 1000 NOK

	Inf package 1	Inf package 2	Inf package 3	Inf package 4	Inf package 5
Doubled capacities for car links					
between nodes 53 and 52	yes	yes	no	yes	no
between nodes 52 and 51	yes	yes	no	yes	no
between nodes 48 and 49	yes	yes	no	yes	no
between nodes 33 and 32	yes	yes	no	no	yes
between nodes 51 and 49	yes	yes	no	no	yes
between nodes 51 and 50	yes	yes	no	no	yes
Increased frequencies for lines					
line 3 = 5 vehicles per hour	yes	no	yes	yes	no
line 2 = 4 vehicles per hour	yes	no	yes	no	yes
line 5 = 4 vehicles per hour	yes	no	yes	no	yes
Calculation results					
rush hour consumer surplus	247331.8	132739.9	116122.8	113003.1	124910.8
other periods consumer surplus	766519.9	105940.9	690360.5	121510.2	685598.5
operative surplus	363676.3	356084.8	373165.7	358935.8	371300.2
governmental revenue	178.651	180.746	178.651	178.651	180.746
external costs	36658.16	37815.47	36513.52	39484.57	3466.33
share of car transportation	0.635	0.643	0.627	0.64	0.629
total distance covered by cars (km)	438941	452914	422005	457798	414898
accessibility measure	2156.391	2081.749	2074.484	2067.793	2078.706
Social welfare measures					
social welfare 1	1012428.626	227752.28	815643.206	225049.266	850666.86
social welfare 2	1012645.245	228727.63	814910.885	225739.935	850120.67
social welfare 3	1014809.34	238481.13	807585.58	232644.53	844658.77
social welfare 4	1013851.7	238680.8	806483.3	234513.3	810509.3

Values in Table 2 are calculated according to the optimal car/passenger link flows that are the solution to network equilibrium problem with improved transport infrastructure. Average solution time for the problem was 2 minutes. Accessibility measures for base situation and infrastructure investment packages are calculated according to the following formula (Pooler, 1995):

$$A = \sum_i \sum_j (D_{ij}^{car} \exp(-c_{ij}^{car}) + D_{ij}^{pub} \exp(-c_{ij}^{pub} - t_{ij}^{pub}))$$

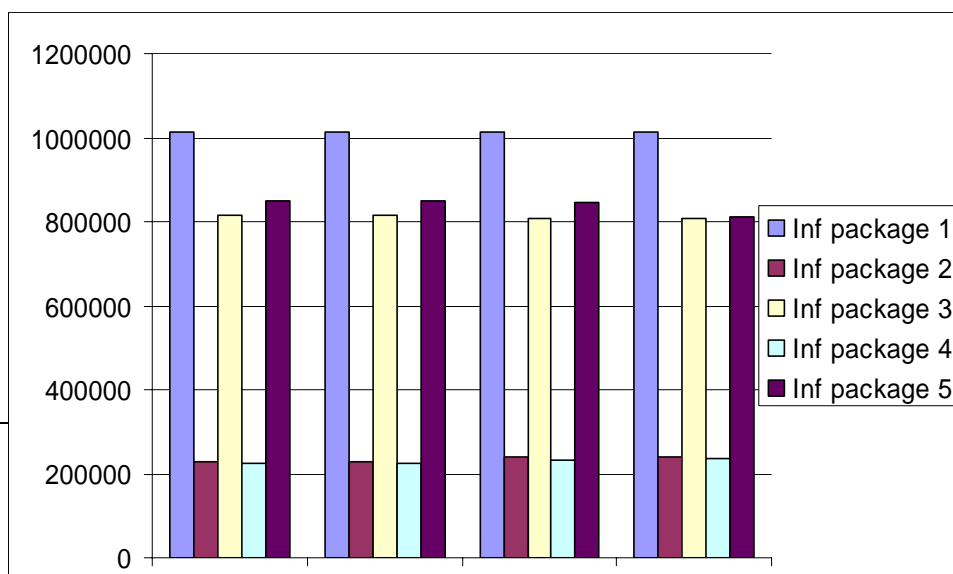


Figure 1. Welfare measures of infrastructure project packages in 1000 NOK

As demonstrated at Figure 1 the four functional forms of welfare measures used for the analysis result in the same ordering of infrastructure packages, with the values of welfare measures being slightly different for different formulations. Moreover the ordering of infrastructure packages according to the welfare measures is consistent with their ordering according to the accessibility measures (Table 2).

Based on the presented Oslo case-study there is possible to give a number of recommendations to a transport ministry concerning the choice of social welfare functional form. Since the four different functional forms considered in the paper resulted in the same order of infrastructure packages, it is possible to state that the most important component of social welfare is the total consumer surplus of network users. Hence, it should be necessarily taken into account while analyzing infrastructure packages. Other elements of social welfare such as operative surplus and governmental revenue are not that important and may be neglected in case of low level of available informational details. Furthermore, the use of accessibility measure as the social welfare measure gives the same results as the use of other tested social welfare functional forms and hence may be recommended as an alternative welfare measure.

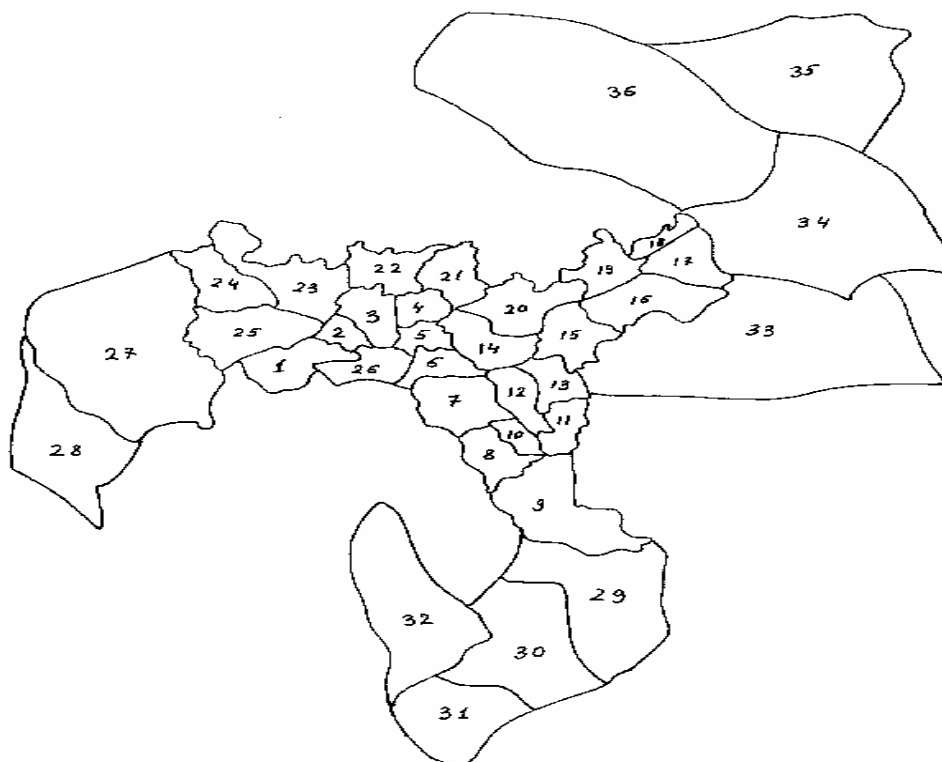


Figure 2. Travel zones used for the representation of Oslo/Akershus region

(1) Bygdøy-Frogner	(10) Lamberseter	(19) Grorud	(28) Asker
(2) Uranienborg-Majorstuen	(11) Bøler	(20) Bjerke	(29) Oppegard-Ski
(3) St.Hanshaugen-Ullevål	(12) Manglerud	(21) Grefsen-Kjelsås	(30) Ås
(4) Sagene-Torshov	(13) Østensjø	(22) Sogn	(31) Vestby
(5) Gruneløkka-Sofienberg	(14) Helsefyr-Sinsen	(23) Vinderen	(32) Nesodden-Frogn
(6) Gamle Oslo	(15) Hellerud	(24) Røa	(33) Lørenskog-Rælingen
(7) Ekeberg-Bekkelaget	(16) Furuset	(25) Ullern	(34) Skedsmo
(8) Nordstrand	(17) Stovner	(26) Sentrum	(35) Gjerdrum-Ullensaker
(9) Søndre Nordstrand	(18) Romsås	(27) Bærum	(36) Nittedal



Figure 3. Structure of the car network in Oslo/Akershus region



Figure 4. Structure of the bus line in Oslo/Akershus region