

# Verdien av raskere og mer pålitelig godstransport

Forskningsleder Harald Minken og forsker Hanne Samstad  
Transportøkonomisk institutt, Oslo

## *Innledning*

Å forbedre framføringshastigheten og påliteligheten for godstransporten er ansett som et hovedmål i transportpolitikken i de fleste land, men det byr på vanskeligheter å beregne den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av slike tiltak. Det gjelder især økt pålitelighet, hvor problemet ikke bare er å anslå verdien for bedriftene og for samfunnet av en gitt forbedring, men også å finne ut hvor stor denne forbedringen vil være ved forskjellige tiltak.

Sentralt i dagens verdsetting står de såkalte tidsverdiene for godstransport, som bygger på bedriftenes betalingsvillighet i henhold til stated preference-undersøkelser. Tilsvarende verdier for pålitelighetsforbedringer anvendes også i noen grad, og forskning pågår blant annet i Nederland for å forbedre dem. I dette paperet vil vi rapportere pågående forskning i et prosjekt for det svenske Vägverket med formål å etablere et alternativ til stated preference på dette området. En hovedtanke er at bedriftene allerede i utgangspunktet vil ha truffet tiltak for å forsikre seg mot konsekvensene av forsinkelser og uventede hendelser under transporttida, nemlig i form av et sikkerhetslager som skal opprettholde en fastlagt leveringsdyktighet. Det er ikke rasjonelt å ha en sikkerhetslagerpolitikk som gjør at man alltid vil kunne levere varen straks kunden etterspør den, derfor vil det også etter innføringen av sikkerhetslagerpolitikken forekomme kostnader ved at man ikke kan levere i tide (mankokostnader), så vel som kostnader ved å holde sikkerhetslageret. Et tiltak som forbedrer framføringstida og reduserer usikkerheten i transporten, vil gjøre det mulig for bedriftene å redusere sine lagre uten at leveringskvaliteten blir dårligere, eller å forbedre leveringskvaliteten uten å bruke mer penger på sikkerhetslageret. Heri ligger den samfunnsøkonomiske gevinsten ved slike tiltak. I tillegg kommer naturligvis innsparing av transportkostnader når raskere transport gjør at en bil kan rekke over mer på en dag, og når større pålitelighet gjør at behovet for å legge inn slakk mellom avtalene kan reduseres.

I dette perspektivet er det lite relevant å spørre bedriften med utgangspunkt i en enkelt forsendelse om hva den ville være villig til å betale for en tidsbesparelse eller en økning i sjansene for rettidig levering. Man må i det minste gjøre det klart om dette er forbedringer som vil påvirke alle sendinger eller om det er et engangstilfelle. Hvis det påvirker alle sendinger, er det relevante spørsmålet hvordan

bedriften da vil legge om sin lager- og leveringsdyktighetspolitikk, og hva den regner med å spare ved det. Eller vi kan beregne den endrede tilpasningen og kostnadsbesparelsen sjøl. I vårt prosjekt er det det vi vil forsøke.

Vi konstruerer en logistikkostnadsmodell som inkluderer de ulike transportkostnadselementene (avsnitt 2), og avleder tidsverdier og pålitelighetsverdier av den med hjelp av omhyllingssetningen (avsnitt 3). Vi finner at tidsverdien består av de kilometeravhengige transportkostnadene pluss kostnaden ved å binde kapital i varer under transport. I tillegg finner vi en eksplisitt formel for verdsetting av økt pålitelighet. For å finne ut hvordan forventet transporttid og variansen til transporttida endrer seg med ulike tiltak, anvender vi en teoretisk modell for forventning og varians til forsinkelsen pr. kilometer som følge av hendelser på vegen (avsnitt 4). Dermed har vi – i teorien – et fullstendig opplegg for å beregne nytte for godstrafikken av tiltak som påvirker transporttidens forventning og varians. I avsnitt 5 skisserer vi det gjenstående arbeidet. Det gjenstår å utvide opplegget til andre transportformer enn vegtransport, å vurdere andre kilder til forsinkelser enn hendelser undervegs, og å tilrettelegge data som trenges til opplegget.

### ***Logistikkostnadsfunksjonen***

Vi betrakter et enkelt men ikke utypisk tilfelle der varer skal leveres fra et produksjons- eller importsted A til et utsalgssted B. Transporten kan foregå med bil hele vegen, eller vi kan ha transport på en hovedstrekning med et hvilket som helst transportmiddel og distribusjonskjøring med bil i begge ender. Med hyppige transporter vil vi ha gjennomsnittlig lavt lagerhold, små sendingsstørrelser, men likevel høye kostnader forbundet med sendingene, fordi det finnes elementer av faste kostnader pr. sending. Omvendt vil sjeldne leveringer gi store sendingsstørrelser og gjennomsnittlige lagre. Det er vanlig bedriftsøkonomi i et slikt tilfelle å minimere summen av lagerkostnader og kostnadene som er faste pr. sending (ordrekostnader), mens transportkostnadene i sin helhet regnes å påløpe pr. tonn, og dermed være irrelevante for kostnadsminimeringsproblemet så lenge etterspørselen i tonn pr. år er konstant. Resultatet av kostnadsminimeringen er en viss sendingsstørrelse og sendingshyppighet og et visst gjennomsnittlig lager.

Et nærmere blikk på transportkostnadene viser imidlertid at ikke alle kostnader påløper pr. tonn. De transportkostnadene som påløper pr. tonn er laste- og lossekostnader ved terminalene og transportkostnaden på hovedstrekningen, forutsatt at transportøren på hovedstrekningen tilbyr en frakttariff som er pr. tonn, hvilket han bør gjøre med mindre sendingene til vår bedrift påvirker størrelsen på de kjøretøyene han må anvende eller hyppigheten av avgangene. Disse kostnadene kan

altså utelates fra bedriftens kostnadsminimeringsproblem. Bildet blir imidlertid annerledes for de etappene av transporten der sendingsstørrelsen kan påvirke valg av kjøretøystørrelse, dvs. for distribusjonskjøringen, og for hele transporten hvis den foregår dør til dør og uten samlastning med andre sendinger. Anta at det finnes en minste og en største tilgjengelig kjøretøystørrelse (kjøretøykapasitet). Da vil kostnaden ved å bruke det minste kjøretøyet være en kostnad som påløper pr. sending, altså en del av ordrekostnaden, og høyst relevant for kostnadsminimeringsproblemet. Kostnaden ved å gå opp i kjøretøystørrelse er også relevant, og vi må nå ta med valg av kjøretøystørrelse som en valgvariabel i kostnadsminimeringsproblemet.

Vi går ikke her inn på den matematiske formuleringen av logistikkostnadene når transportkostnadene er innpasset på den måten som er forklart. En fullstendig matematisk beskrivelse finnes i Minken (2005). Men det som skulle være klart, er at bedriften vil beslutte sendingsstørrelse og kjøretøystørrelse for å minimere logistikkostnadene med de relevante delene av transportkostnadene innpasset. Dette må gjøres under bibetingelser som sier at sendingsstørrelsen ikke kan overstige kapasiteten til det største tilgjengelige kjøretøyet, at kjøretøystørrelsen må ligge mellom et minimum og et maksimum, og at årlig transportert volum minst må dekke forventet gjennomsnittlig årlig etterspørsel.

## Usikkerhet

Ledetida er tida fra en ny sending blir bestilt til de nye varene er tilgjengelige for kundene. Anta nå at både ledetida og etterspørselen pr. time, dag, eller uke er stokastisk. Forsinkelser i transporten er en del av usikkerheten til ledetida.

Når både ledetida og etterspørselen er usikker, blir naturligvis etterspørselen i ledetida også usikker. Skal nå bedriften tilpasse seg rasjonelt, må den vite (eller anta) noe om sannsynlighetsfordelinga til etterspørselen i ledetida. Det kan vises at etterspørselen i ledetida har følgende forventning og varians:

$$(1) \quad \mu_L = \mu_D \mu_T$$

$$(2) \quad \sigma_L^2 = \mu_T \sigma_D^2 + \mu_D^2 \sigma_T^2$$

der  $\mu_D$  og  $\sigma_D$  er forventning og varians til etterspørselen pr. tidsenhet,  $\mu_T$  og  $\sigma_T$  er forventning og varians til ledetida og  $\mu_L$  og  $\sigma_L$  er forventning og varians til etterspørselen i ledetida. (1) er vel hva man kunne vente seg, men (2) har en underlig asymmetri. Uansett, det (2) viser, er hvordan de to kildene til usikkerhet virker sammen om å gjøre etterspørselen i ledetida usikker. Vi må anta at forventa ledetid  $\mu_T$  blir lengre jo lengre transporttida er. Vi ser da at lang transporttid spiller liten rolle så lenge etterspørselen er ganske sikker, men stor rolle om den er

usikker. Hva verre er: når forventet etterspørsel doubles, firedobles betydningen av usikkerhet i ledetida, og omvendt. Dersom bedriftens tilpasning og kostnader i det usikre tilfellet avhenger av etterspørselen i ledetida, kan vi altså vente at en tidsbesparelse i transport, eller en reduksjon i variansen til transporttida, vil virke forskjellig alt etter hvilke etterspørselsforhold den enkelte bedrift står overfor.

Antar vi normalfordeling, er (1) og (2) alt vi trenger å vite om sannsynlighetsfordelingen til etterspørselen i ledetida.

Mens vi i det deterministiske tilfellet åpenbart burde vente med å plassere en ny bestilling til lageret var akkurat så stort at det dekket etterspørselen i ledetida, må vi i det stokastiske tilfellet ha en ny valgvariabel, nemlig den størrelsen på lageret som skal utløse en ny bestilling. Kall denne valgvariabelen for  $R$ , ordrepunktet. Velger vi liten  $R$ , vil sannsynligheten for at vi opplever manko<sup>1</sup> i ledetida være høy. Hvor høy, se det avhenger av  $\sigma_L$ . Velger vi stor  $R$ , får vi på den andre sida høye gjennomsnittlige lagerholdskostnader. Sikkerhetslageret er differansen mellom den  $R$  vi velger og forventet etterspørsel i ledetida.

Vi må nå føye ytterligere noen elementer til i de kostnadene som skal minimeres, nemlig kostnaden ved å holde det sikkerhetslageret som følger av  $R$ , og den forventede mankokostnaden pr. år. I dette, som i alt annet bortsett fra transportkostnadene, følger vi standard lagerstyringsteori, som i Hadley og Whitin (1963). Bedriftens problem er å minimere alle de relevante logistikkostnadene med hensyn på sendingsstørrelse, kjøretøystørrelse for distribusjonskjøringa og ordrepunkt  $R$ . Bibetingelsene er de samme som i det sikre tilfellet.

Åpenbart blir det optimale sikkerhetslageret og mankokostnadene større jo større  $\sigma_L$  er. Et tiltak som reduser forventning og varians til transporttida vil altså redusere disse samfunnsøkonomisk relevante kostnadselementene. Virkningen vil være forskjellig alt etter hvilken distanse bedriften transporterer over og hvor stor og usikker etterspørselen er.

Vi har løst bedriftens kostnadsminimeringsproblem i det usikre tilfellet med transportkostnader og valg av kjøretøystørrelse. Løsningen, logistikkostnadsfunksjonen, tror vi kan ha en brei anvendelse når det gjelder å forklare lokalisering, valg av leverandører, muligheten for å praktisere just-in-time-politikk osv. For eksempel framgår det at øvre og nedre grense for kjøretøystørrelsen begge har betydning for om det finns stordriftsfordeler eller ikke. Her skal vi imidlertid konsentrere oss om å bruke denne modellen til å utlede tidsverdier og pålitelighetsverdier for nyttekostnadsanalyse.

---

<sup>1</sup> Engelsk: stock out, svensk: leveringsbrist.

## Tidsverdier og pålitelighetsverdier

Vi vil nå anta at ledetida er sammensatt av transporttida på  $n$  delstrekninger pluss den delen av ledetida som ikke består av transport. Vi antar at alle disse elementene er stokastiske variable som er uavhengige av hverandre. Delstrekning  $i$  har lengde  $a_i$ , og tida pr. kilometer på denne strekningen er en stokastisk variabel  $q_i$  (den inverse av farta). Forventet transporttid pr. kilometer er  $\bar{q}_i$ . Kaller vi nå den delen av ledetida som ikke har med transport å gjøre, for  $T_0$ , har vi:

$$(3) \quad \begin{aligned} \mu_T &= \mathbf{a}\bar{\mathbf{q}} + ET_0 \\ \sigma_T^2 &= \sum a_i^2 \text{var } q_i + \text{var } T_0 \end{aligned}$$

Betrakt et tiltak på en av delstrekningene. Det kan være en innkorting av vegen eller et hvilket som helst tiltak som påvirker forventning og varians til  $q_i$ . Hvilken virkning vil det ha på de forventede gjennomsnittlige årlige logistikkostnadene til vår bedrift?

For å finne ut det, deriverer vi logistikkostnadsfunksjonen med hensyn på  $a_i$ ,  $\bar{q}_i$  og  $\text{var}q_i$ , idet vi tar hensyn til at  $\text{var}q_i$  bare inngår i kostnadsfunksjonen gjennom  $\sigma_T$  (likning 3), som inngår i  $\sigma_L$  (likning 2), som er en parameter i kostnadsfunksjonen, mens  $a_i$  og  $\bar{q}_i$  både inngår direkte i kostnadsfunksjonen som ledd i de tidsavhengige og kilometeravhengige transportkostnadene, og indirekte via (1), (2) og (3). Vi kan benytte omhyllingssetningen. Kaller vi logistikkostnadsfunksjonen  $K$ , beregner vi altså differensialet

$$(4) \quad dK = \frac{\partial K}{\partial a_i} da_i + \frac{\partial K}{\partial \bar{q}_i} d\bar{q}_i + \frac{\partial K}{\partial \text{var } q_i} d \text{var } q_i$$

Vi deler resultatet på forventet antall turer pr. år for å finne kostnadsendringen pr. tur. Vi kommer da fram til følgende: (a) Verdien av en innspart kilometer er den kilometeravhengige transportkostnaden for det optimale kjøretøyet, (b) Verdien av en spart time er kostnaden ved å leie og bemanne det optimale kjøretøyet i en time (den tidsavhengige kostnaden), (c) Verdien av en marginalt redusert varians i framføringstida på strekningen (altså marginal endring av  $\text{var}[a_i q_i]$ , ikke  $\text{var}q_i$ ), er

$$(5) \quad \text{VOR} = \frac{1}{4} \left[ \pi x f \left( \frac{R^* - \mu_L}{\sigma_L} \right) + (ph + \hat{\pi}) \sigma_L \left( 1 - F \left( \frac{R^* - \mu_L}{\sigma_L} \right) \right) \right] \frac{x}{\eta^2 \sigma_L}$$

Her må det først forklares at  $f(\cdot)$  er tetthetsfunksjonen til den standardiserte normalfordelingen og  $F(\cdot)$  er den kumulative sannsynlighetsfordelingen til samme,  $p$  er varens pris,  $H$  lagerkostnad pr. varenhet pr. time,  $\pi$  er engangskostnaden pr. tilfelle av manko og  $\tilde{\pi}$  er kostnaden ved at et tilfelle av manko varer i en time. (5) er derfor et uttrykk for økningen i mankokostnadene når bedriften i utgangspunkt

har tilpasset seg optimalt, men opplever en liten reduksjon i usikkerheten i transporttida. (5) gjelder bare distribusjonskjøring eller dør til dør med bil, men dersom pris er lik marginalkostnad i hovedstrekningen og frekvensen der ikke er noe problem for kundene, vil formelen også gjelde hovedstrekningen.

La oss se hva vi har funnet. Vi har funnet at tidsverdien ikke skal inneholde noe påslag ut over de opplagte tidsavhengige kostnadene. En forventet tidsbesparelse vil imidlertid som regel ha årsaker som også påvirker variansen til transporttida. Gevinsten ved dette måler vi ved å beregne hvor mye variansen har gått ned (se nedenfor), og evaluere dette med enhetsprisen på "variabilitet", VOR i (5). (5) kommer også til anvendelse om forventet transporttid er uendret, men variansen er endret ved andre typer tiltak.

Det kan se ut som (5) er ubrukelig i praksis, fordi vi ikke kjenner mankokostnaden pr. tilfelle og tidsenhet. Vi kan omgå det ved å anta  $\pi = 0$ , la  $S_1$  være den forventede andelen av leveringsperioder pr. år der det ikke oppstår manko, og la  $S_2$  være et gitt leveringsdyktighetskrav, nemlig at en andel  $S_2$  av alle salg skal kunne leveres straks.  $Q$  er sendingsstørrelsen. I det tilfellet kan VOR omformes til:

$$(6) \quad VOR = \frac{1(1-S_1)}{4(1-S_2)} \cdot \frac{\mu_D}{Q} \cdot pHQ$$

VOR er proporsjonal med lastens lagerkostnad pr. time, andelen av lasten som kan forventes etterspurt pr. time (JIT-faktoren) og faktoren som inneholder  $S_1$  og  $S_2$  (S-faktoren). Kjenner vi  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $\mu_D$ ,  $Q$  og prisene  $p$  og  $H$ , så kan vi beregne VOR. Det er naturligvis et problem at det eneste vi likevel nå har oppnådd, er å finne verdien av raskere og mer pålitelig transport for en enkelt varestrøm i en enkelt bedrift. Hvordan finne gjennomsnittsverdier til nyttekostnadsanalyse? Del bedriftene inn i S-klasser og videre hver S-klasse i underklasser etter JIT-faktoren. Fjern ekstreme JIT-faktorer. For hver underklasse, finn en gjennomsnittlig  $pHQ$ . Vi vil trenge et utvalg av bedrifts- og varespesifikke data. Problemet er ikke prinsipielt annerledes enn ved stated preference. Forskjellen er kanskje bare at mens all variasjon i SP blir behandlet som uobserverbare feilledd, mener vi å kunne vite noe konkret om hva variasjonene mellom bedriftene kan skyldes.

### ***Transporttidens forventning og varians***

Vi vender oss nå til spørsmålet om å anslå  $\mu_L$  og  $\sigma_L$ , transporttidens forventning og varians. Vi ønsker oss eksplisitte formler som viser hvilke variable som påvirker de to størrelsene, i hvilken grad de samme variablene inngår i begge formler, og hvordan ulike tiltak påvirker disse variablene. Vi har i første omgang konsentrert oss om vegtrafikk (Samstad og Minken 2005). For å finne et mål på forventet transporttid og dens varians antar vi at transporttida uten forsinkelser er konstant,

slik at forsinkelsesvariansen blir transporttidens varians. Vi skiller mellom ulike typer forsinkelser på vegen: Uventede hendelser i trafikken, planlagt hendelse i et punkt, uventet forbigående trafikkøkning, ekstreme værforhold og planlagte hendelser på en hel strekning. De tre første kan beskrives ved hjelp av en modell for hendelser i et punkt, mens de to siste kan beskrives ved hjelp av en modell for hendelser som berører en strekning eller transportnettverket i et område.

Forsinkelsesmodellen for hendelser i et punkt er basert på en modell presentert av Cohen og Southworth (1999). Betrakt en motorvegstreking. Initialt er trafikkvolumet  $v$  på denne lenka lavere enn eller lik kapasiteten  $c$ ,  $v \leq c$ . Så inntreffer en hendelse som reduserer kapasiteten på et punkt til  $rc$ , som er lavere enn  $c$ , slik at det bygger seg opp en kø bak hendelsespunktet. Når hindringen er ryddet av vegen vil det være en periode før køen er avviklet og trafikken går som normalt igjen. Ved å ta hensyn til sannsynligheten for en slik hendelse kan man utlede forventet forsinkelse og dens varians. Resultatet er vist i tabell 1. Indeks  $j$  er type forsinkelse,  $T_j$  er oppryddingstida og  $\lambda_j$  er sannsynligheten per kilometer for at en hendelse skal inntreffe. Når hindringen er ryddet av vegen, er  $g > 1$  den raten bilene forlater hendelsespunktet med inntil normale trafikkforhold er gjenopprettet. Merk at forventet forsinkelse avhenger av kvadratet av oppryddingstida, hvilket tyder på at rask respons og opprydding kan være et effektivt tiltak for å redusere forsinkelser.

Siden sannsynligheten for en hendelse på den ene kilometeren er uavhengig av om det har skjedd en hendelse på den forrige kilometeren, er forventning og varians på en lengre strekning med ensartede trafikkforhold lik strekningslengda multiplisert med tabellens verdier.

Tilfellet med forbigående, uventet trafikkøkning omfatter kø som ikke er en del av det daglige, ukentlige eller sesongmessige kømønsteret. Modellen er et slags speilbilde av modellen til Cohen og Southworth, og likner modellen fra Arnott et al. (1991). Kapasiteten ligger fast mens trafikkvolumet overstiger kapasiteten i et tidsrom, og det bygges opp kø helt til trafikkvolumet er tilbake til normalt igjen. Forventning og varians er ikke tatt med her, av grunner diskutert i avsnittet om datatilgjengelighet.

Hendelser som berører en hel strekning eller transportnettverket i et område er av en annen karakter. Volume-delay-funksjoner (VDF) beskriver hvordan transporttid avhenger av forholdet mellom trafikkvolum og kapasitet ( $v/c$ ) i et område. Hendelser kan tolkes som skift i VDF gjennom at kapasitetsparameteren reduseres. Ekstremt vær eller vegarbeid kan påtvinge bilistene lavere fart også når trafikkvolumet er lavere enn kapasiteten og det ikke er køer. Derfor introduseres også en faktor  $\rho$  for å justere friflythastigheten  $q_0$  under en hendelse. Med en VDF

av typen  $q = q_0[1 + a(\frac{v}{c})^b]$  får vi følgende VDF for hendelser:  $q = \rho q_0[1 + a(\frac{v}{rc})^b]$ .

Vi har tre tilfeller ved denne typen hendelser: Det er ikke kø verken før eller under hendelsen; det er ikke kø før hendelsen, men det oppstår kø under hendelsen; og det er kø både før og under hendelsen. I alle tilfeller fører hendelsen til en forsinkelse. Forventning og varians i de tre tilfellene er vist i tabell 1.

Ved planlagte hendelser forventes at en del bilister er informert, f.eks. når det gjelder vegarbeid eller store sportsarrangementer som hindrer framkommeligheten. Også ved ekstremt vær kan forholdene være kjent på forhånd. Følgelig vil enkelte bilister velge andre transportalternativer. Modellen i sin nåværende form tar ikke hensyn til dette. En naturlig videreutvikling vil være å korrigere for atferdsvirkninger.

Det er flere forskjeller mellom modellen basert på Cohen og Southworth (CS) og den VDF-baserte modellen. Hendelsesvarigheten er eksplisitt i CS-modellen, mens den er innbakt i hendessannsynligheten i VDF-modellen. I CS-modellen vil det ikke være kø dersom trafikkvolumet ikke overstiger kapasiteten under hendelsen, mens VDF-modellen gjelder for hendelser hvor hastigheten kan reduseres på grunn av kjøreforholdene alene, også om det bare hadde vært ett kjøretøy på lenken.

Tabell 1: Forventet forsinkelse og forsinkelsesvariens for en hendelse av type  $j$  på en lenke

Hendelser i et punkt	
Forventet forsinkelse: $\bar{q}_j = \frac{1}{2} \lambda_j \frac{(g-r)(v-rc)}{gc-v} c \cdot E(T_j^2)$ $= \Lambda \cdot \lambda_j \cdot E(T_j^2)$	Forsinkelsesvariens: $\text{Var } q_j = \frac{2}{3} \frac{v-rc}{v} \Lambda \cdot \lambda_j \cdot E(T_j^3) - \Lambda^2 \cdot \lambda_j^2 \cdot [E(T_j^2)]^2$
Hendelser på en strekning	
Forventet forsinkelse: $\bar{q}_j = \begin{cases} \lambda_j q_0 (\rho - 1) & ; v \leq rc < c \\ \lambda_j q_0 [\rho - 1 + a(\frac{v}{rc})^b \rho] & ; rc < v \leq c \\ \lambda_j q_0 [\rho - 1 + a(\frac{v}{c})^b (\rho r^{-b} - 1)] & ; rc < c < v \end{cases}$	Forsinkelsesvariens: $\text{Var } q_j = \begin{cases} \lambda_j (1 - \lambda_j) q_0^2 (\rho - 1)^2 & ; v \leq rc < c \\ \lambda_j (1 - \lambda_j) q_0^2 [\rho - 1 + a(\frac{v}{rc})^b \rho]^2 & ; rc < v \leq c \\ \lambda_j (1 - \lambda_j) q_0^2 [\rho - 1 + a(\frac{v}{c})^b (\rho r^{-b} - 1)]^2 & ; rc < c < v \end{cases}$

Det framgår av tabell 1 at forventet forsinkelse og dens varians kan påvirkes av tiltak som trafikkdemping (reduksjon i  $v$ ), kapasitetsutvidelse (økning i  $c$ ), raskere opprydding etter hendelser (reduksjon i  $T_j$ ), og noen typer trafiksikkerhetstiltak (reduksjon i  $\lambda_j$ ).



Formlene i tabell 1 kan nå settes inn i likning (3). Vi har:

$$(7) \quad \begin{aligned} \mu_T &= \sum_j \sum_i a_i q_{ji} + ET_0 \\ \sigma_T^2 &= \sum_j \sum_i a_i^2 \text{var } q_{ji} \end{aligned}$$

Her er det forutsatt at hendelsestypene er uavhengig av hverandre. I realiteten vil det antakelig være større sannsynlighet for at et kjøretøy forårsaker en hendelse dersom en av de andre hendelsestypene har inntruffet (eksempelvis ekstremt vær).

### **Datatilgjengelighet for forsinkelsesmodellen**

Datatilgjengeligheten ble vurdert gjennom innhenting av informasjon fra Statens vegvesen i Norge og Vägverket i Sverige.

Data om kapasitet  $c$  og trafikkvolumer  $v$  er spesifikke for den enkelte vegstrekning og kan finnes ved hjelp av eksisterende databaser. Når det gjelder sannsynlighet og varighet av hendelser foreslår vi at det gjøres grove anslag basert på tilgjengelige kilder. Verken i Norge eller Sverige registreres det systematisk data om hendelsenes varighet (med unntak av det norske tunnelregisteret).

$g$  kan for enkelhets skyld settes til 1, da den ikke kan avvike særlig fra 1 uansett.

$r$  er antakelig nokså situasjonsavhengig, men et gjennomsnittsmål er det beste vi kan få til *a priori*. En mulighet er å la  $r$  være en funksjon av  $c$ , under antakelsen om at  $r$  øker med  $c$ . Videre må  $r$  alltid være mellom 0 og 1.

For å kunne anslå  $\rho$  trengs det målrettede undersøkelser. VD-funksjoner vil allerede være estimert i en del tilfeller siden de brukes i transportmodellering.

Modellen for forbigående trafikkøkning ser ut til å være den vanskeligste å finne data for. Hvis slike uventede etterspørselssvingninger er av liten betydning, er det kanskje ikke verdt innsatsen å prøve å skaffe data til denne delmodellen.

Vi konkluderer med at data til forsinkelsesmodellen ikke er enkelt tilgjengelige, men databehovet kan i stor grad dekkes på tre måter: Ved endrede datainnsamlingsrutiner hos vegmyndighetene, ved målrettede undersøkelser, og ved kvalifiserte gjetninger basert på tilgjengelige kilder.

Videre vil mangelen på data gjøre det vanskelig å validere modellen. En mulig tilnærming kunne være å observere variasjoner i transporttid slik de oppleves av et transportfirma som kjører gjentatte turer på samme rute. Bedrifter registrerer vanligvis ikke transporttidsdata på det detaljnivået modellen krever.

### **Konklusjon og videre arbeid**

Vi har innarbeidet transport på en relativt realistisk måte i en vanlig lagerstyringsmodell med usikkert etterspørsel og ledetid, og utledet tidsverdier og pålitelighetsverdier fra den. De gjelder i prinsippet for alle transportmåter. Med

litt forenkling har vi funnet en form på pålitelighetsverdien som ikke er for vanskelig å bruke. For å bruke vårt opplegg eller et hvilket som helst annet opplegg for verdsetting av økt pålitelighet, trenger vi imidlertid gode modeller for endringen i variansen til transporttida ved tiltak. Vi har skissert en første slik modell for vegtrafikk.

Vi har påpekt flere punkter for forbedring av forsinkelsesmodellen. For det første er det behov for bedre data for å kunne teste og eventuelt ta i bruk modellen. For det andre bør det tas hensyn til atferdsvirkninger av at bilister er informert om hendelser. For det tredje er hendelsestypene antakelig ikke uavhengige av hverandre, noe som vil påvirke den samlede variansen. For det fjerde kunne andre typer forsinkelser innlemmes, for eksempel kolonnekjøring eller midlertidig (vinter-)stengte veger med omkjøring. Utvidelsen til forsinkelser i sjø, luft og bane vil bli vurdert i fortsettelsen av prosjektet. Forsinkelser i andre deler av transportkjeden, som terminaler, burde også inkluderes. Om forsinkelser i terminaler finns det god litteratur, bl.a. av Jan Owen Jansson.

For å fastlegge pålitelighetsverdier til praktisk bruk trengs det bedriftsdata som samferdselsmyndighetene ikke har nå. Noen nye data vil bli innhentet i det svensk-norske prosjektet som skal innarbeide logistikk i de nasjonale gods-transportmodellene. I vårt prosjekt vil vi også vurdere om vår logistikkostnads-funksjon kan integreres i godstransportmodellene.

### ***Referanser***

- Arnott, R., A. de Palma og R. Lindsey (1991): Does providing information to drivers reduce traffic congestion? *Transportation Research A* 25A(5), 309-318.
- Cohen, H. and Southworth, F. (1999) On the measurement and valuation of travel time variability due to incidents on highways. *Journal of Transportation and Statistics* 2(2), 123-131.
- Hadley, G. and Whitin, T.M.(1963) *Analysis of Inventory Systems*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Minken, H. (2005) A theory of freight values of time and reliability. TØI Working Paper TØ/1777/2005.
- Samstad, H. og Minken, H. (2005) Towards a theory of delays: the case of roads. TØI Working Paper TØ/1778/2005.