

Metode til opgørelse af trængselsomkostninger

v/Niels Buus Kristensen, COWI

Metode til opgørelse af trængselsomkostninger

Dette papir beskriver et afsluttet projekt for Trafikministeriet vedrørende metoder til opgørelse af omkostningerne ved trængsel. Trængsel i trafikken opstår, når trafikvolumen nærmer sig kapacitetsgrænsen, og den påvirker samtlige trafikanters rejsetid. På en given vejstrækning vil en ekstra bilists færdsel således ikke kun påvirke vedkommendes selv, men også alle øvrige trafikanter på den pågældende del af vejnettet, idet den gennemsnitlige rejsetid på vejstrækningen øges. Den enkelte trafikants rejsevalg vil derfor medføre negative eksternaliteter.

I forbindelse med Trafikministeriets projekt '*CO₂ reduktioner i transportsektoren*' blev der foretaget en første opgørelse over de marginale trængselsomkostninger pr. køretøjskilometer for vejsektorens transportmidler, dvs. de omkostninger, der er forbundet med nedsat rejsetid som følge af høj trafikintensitet på vejnettet. I denne opgørelse blev trængselsomkostningerne opgjort ud fra en alternativbetragtning. Opgørelsen var baseret på relativt grove skøn over forebyggelsesomkostningerne ud fra nyinvesteringer i forbedring og udvidelse af vejnettet. Denne metode bygger på den meget håndfaste antagelse om, at vejmyndighederne tilpasser infrastrukturen til det ændrede trafikomfang således, at trængselssituationen per kilometer er uændret. Omkostninger til udbygning af infrastrukturen betragtes dermed som det, det koster at undgå yderligere trængsel.

I nærværende projekt er trængselsomkostningerne i stedet forsøgt opgjort direkte ud fra trafikanternes øgede tidsforbrug ved en marginal forøgelse af trafikken. Arbejdet skal primært ses som et metodestudie, men for at sikre at projektets resultater så vidt muligt bliver anvendelsesorienterede, er inddraget et første forsøg på anvendelse af metoden i praksis baseret på eksisterende data. Som case studie er valgt København baseret på data fra Trafikministeriets Rejsevaneundersøgelse (TU) for 1995.

Metode

Vejnettet er et offentligt gode, som bortset fra Storebæltsforbindelsen kan benyttes gratis af alle borgere. Den enkelte trafikant står ikke over for nogen direkte omkostning ved at benytte vejnettet, og med moderate trafikomfang er der ikke nævneværdige meromkostninger ved, at den enkelte bilist benytter eksisterende strækninger. Men hvis efterspørgslen er betydelig i forhold til kapaciteten, oplever trafikanterne imidlertid en række ulemper i form af øget tidsforbrug, irritation over kødannelse mv. Disse ulemper betegnes som trængsel og kan karakteriseres som negative eksternaliteter, idet hver enkelt trafikant i sine overvejelser om sit kørselsomfang på vejnettet ikke tager hensyn til, at de øvrige trafikanters færden begrænses ved hans kørsel.

Trængsel i trafikken opstår altså, når trafikvolumen nærmer sig kapacitetsgrænsen, og den påvirker samtlige trafikanters rejsetid. Et særligt træk ved trængslen som eksternalitet er, at den kan siges udelukkende at påvirke den gruppe af borgere, trafikanterne, der selv bidrager til trængslen.

Opgørelsen af de samfundsøkonomiske omkostninger ved trængsel i trafikken sker i to trin:

1. Den marginale sammenhæng mellem trafikanternes samlede rejsetid og trafikvolumen (Ændringen i rejsetid ved en marginal forøgelse i det samlede trafikvolumen på et givet vejnet.).
2. Multiplikation med en tidsværdi (kroner per time/minut) for den (marginale) forøgelse af rejsetiden som følge af trængslen.

Første og vanskeligste skridt er at udlede sammenhængen mellem trafikvolumen og rejsetid, og andet skridt er værdisætningen af den negative eksternalitet (øget rejsetid). Ved at gange den øgede rejsetid per kilometer (time/km) med en tidsværdi (kr/time) fås et bud på de marginale trængselsomkostninger (kr./km). Forenklet antages det i det følgende, at den øgede rejsetid er den eneste omkostning ved trængsel. Trængsel kan herudover også medføre et irritationsmoment hos bilisterne. Dette kan tolkes

som, at trafikanternes tidsværdi, eller generaliserede rejseomkostninger per tidsenhed, er højere i trængselsituationer end ved uhindret kørsel. Dette aspekt vil der blive set bort fra, idet der fokuseres på at forsøge at kvantificere forøgelsen af rejsetiden. I omsætningen af disse omkostninger til kroner og øre vil der blive anvendt Vejdirektoratets eksisterende enhedspriser for sparet rejsetid, som anvendes i forbindelse med samfundsøkonomiske vurderinger af vejprojekter.

Teoretisk model

Den grundlæggende hypotese er, at en stigning i trafikintensiteten, målt som det samlede trafikarbejde pr. tidsenhed, giver anledning til en reduktion i den gennemsnitlige rejsehastighed, hvorved trafikanternes samlede tidsforbrug til kørsel stiger mere end forøgelsen af trafikarbejdet.

Der betragtes et givet udsnit af vejnettet, og det antages, at den trængselskabende tilvækst i trafikken fordeler sig svarende til den eksisterende trafik. I første omgang ses der forenkelt kun på personbiler. Efterfølgende diskuteres den forøgede kompleksitet, når busser, lastbiler og varebiler inddrages.

Sammenhængen mellem rejsetid og trafikvolumen kan illustreres på flere måder. Der tages udgangspunkt i nedenstående notation:

i	=	Trafikant nummer	[$i = 1 \dots N$]
k	=	Tidsrum (timeintervaller)	[$k = 1 \dots 24$]
N_k	=	Antal trafikanter i tidsrum k	
S_i	=	Trafikant i 's starttidspunkt for rejsen (klokkeslet)	
T_i	=	Trafikant i 's rejsetid (timer)	
V_i	=	Trafikant i 's hastighed (km/time)	
L_{ik}	=	Trafikant i 's kørte km i tidsrum k	

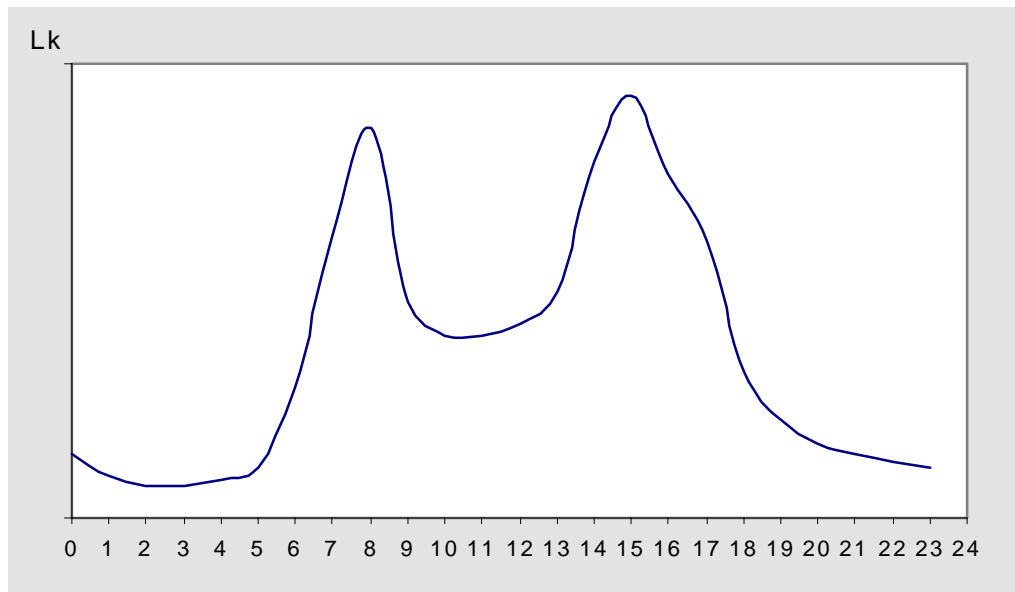
Trafikvolumen varierer over døgnet. Her opdeles et døgn i intervaller á 60 minutter, hvilket giver en døgnskala med 24 timer (k). I praksis bør inddelingen nok være mere finmasket.

Antag, at man observerer de enkelte individers ture, hvor hvert individ kører i alt L_i kilometer på T_i timer. Rejsen kan strække sig over et eller flere tidsintervaller, og dermed skal kilometrene deles ud over tidsintervaller. Dette gøres under antagelse af konstant rejsehastighed, så der køres L_{ik} kilometer i hvert timeinterval k .

For hver time k kan det totale trafikvolumen (kørte kilometer i alt) beregnes ved at summere over trafikanterne:

$$L_k = \sum_{i=1}^{N_k} L_{ik}$$

Der kan på basis heraf opstilles en kurve, som viser trafikarbejdet (kilometer i alt) L_k som funktion af døgntidspunktet (k). Trafikarbejdet per time betragtes som et udtryk for *trafikintensiteten*. A priori forventningen til kurven er illustreret i Figur 1 ud fra den *hypotese*, at trafikintensiteten varierer over døgnet og er størst i morgen- og eftermiddagsmyldretiden.



Figur 1 Forventet sammenhæng mellem trafikarbejde og døgntidspunkt for et givet område (vejnet)

(Figuren viser en kontinuert funktion, men i praksis deles der ind i tidsintervaller, eksempelvis af en times længde, så kurven bliver trappeformet).

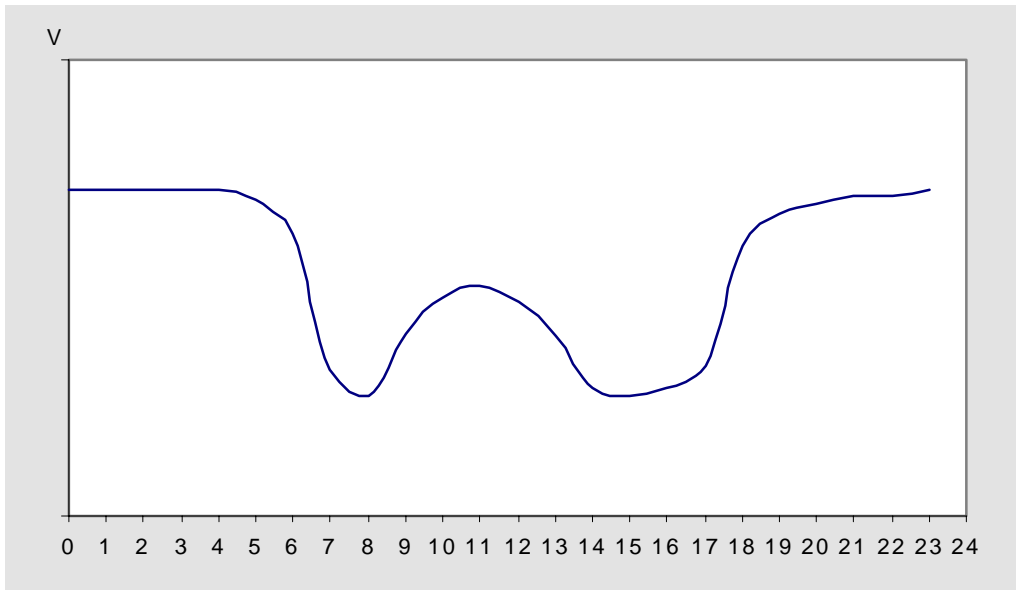
Som nævnt er den centrale hypotese, at rejsehastigheden ligeledes varierer over døgnet, idet den afhænger af trafikintensiteten. Den gennemsnitlige rejsehastighed kan beregnes for hver tur ved følgende:

$$V_i = L_i / T_i$$

Hver rejse kan som nævnt strække sig over flere timeintervaller og kan dermed indgå i beregningen af gennemsnit for flere timer. For hver time k beregnes den gennemsnitlige hastighed, idet hvert individs hastighed vægtes med det antal kilometer, bilisten kører i k :

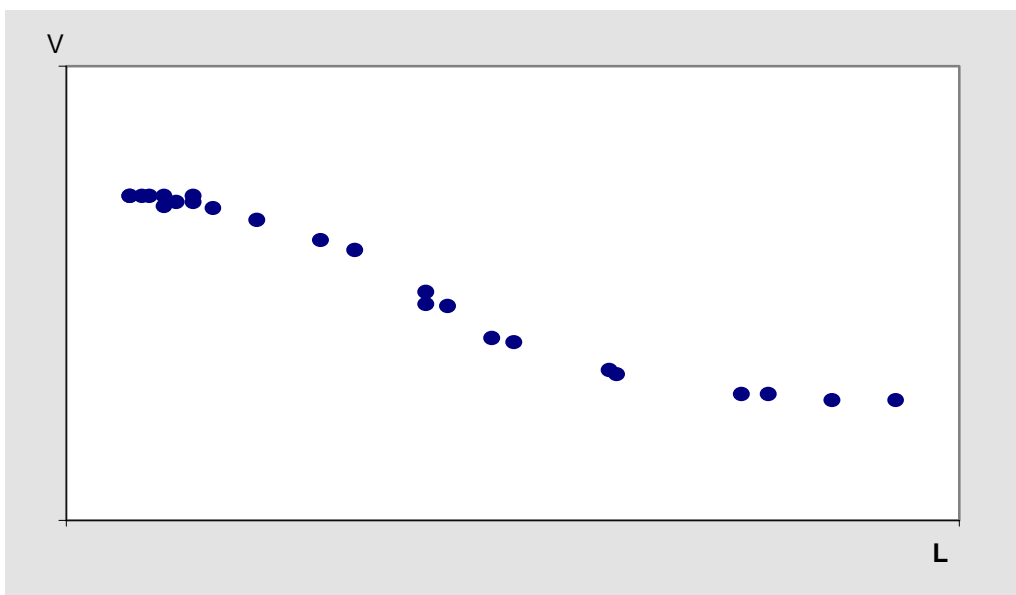
$$V_k = \sum_{i=1}^{N_k} \left(V_i * \frac{L_{ik}}{L_k} \right)$$

Der kan nu illustreres en kurve, som viser hastigheden V_k som funktion af døgntidspunktet, k . Med udgangspunkt i hypotesen om trafikintensitetens variation over døgnet forventes kurven for rejsehastigheden at have et udseende, der i princippet varierer modsat, jvf. nedenstående figur.



Figur 2 Forventet sammenhæng mellem hastighed og døgn tidspunkt for et givet område (vejnet)

I time k køres der i alt L_k kilometer med en gennemsnitshastighed på V_k . Med udgangspunkt i Figur 1 og Figur 2 er det muligt at afbilde den gennemsnitlige rejsehastighed V_k som funktion af det samlede trafikarbejde L_k i tidsperioden. Afhængig af antallet af tidsperioder vil der kunne plottes k punkter på den nye figur (L_1, V_1), (L_2, V_2) osv.



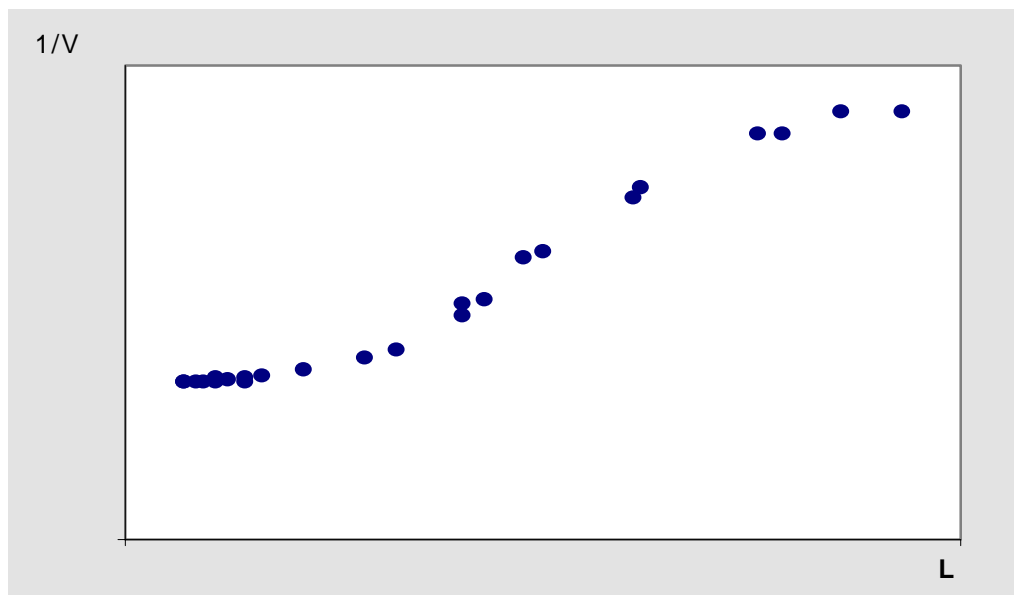
Figur 3 Hastigheden som funktion af trafikarbejdet for et givet område (vejnet)

Figuren illustrerer forventningen om, høj hastighed i perioder med lavt trafikarbejde og omvendt.

Tilsvarende kan rejsetiden som funktion af trafikarbejdet illustreres, idet dette blot svarer til den reciproke hastighedskurve ($1/(\text{km/time}) = \text{timer per kilometer}$). Rejsetiden målt i timer per kilometer kan beregnes som reciprok værdien til hastigheden:

V_k^{-1} = Rejsetiden pr. km i tidsrum k

Figur 4 illustrerer den forventede sammenhæng mellem rejsetid og trafikintensitet.



Figur 4 Rejsetiden som funktion af trafikarbejdet for et givet område (vejnet).

Ovenstående kurve illustrerer den grundlæggende hypotese om, at der bruges mere tid på at tilbagelægge en kilometer, når trafikintensiteten er høj, dvs. når der er mange bilister på vejnettet og dermed køres flere kilometer, hvorimod rejsetiden er lav, når trafikintensiteten er lav.

Så længe kurven er vandret, indebærer øget trafikintensitet ikke trængsel, dvs. rejsetiden pr. km øges ikke, hvilket kan tolkes som, at der stadig er overskudskapacitet i vejnettet ved dette trafikniveau.

Trængslen opstår på det tidspunkt, hvor yderligere trafik nedsætter hastigheden generelt i vejnettet således, at én bilists kørsel øger rejsetiden for de øvrige. En kilometers yderligere kørsel forøger derved den samlede rejsetid med mere end den tid, det tager at køre den pågældende kilometer. Denne ekstra forøgelse af den samlede rejsetid er de eksterne omkostninger, som bilisten påfører de øvrige trafikanter. Formelt kan dette udtrykkes som:

$$\Delta E = \Delta T - V^{-1} \cdot \Delta L, \quad (1)$$

ΔT er den samlede forøgelse af rejsetiden på hele nettet. $V^{-1} \Delta L$ er den ekstra rejsetid som bilisten selv skal bruge for at køre de ekstra kilometer (ΔL), hvilket jo ikke er eksterne omkostninger, idet bilisten må antages at kende den typiske rejsehastighed på forskellige tidspunkter og derfor har taget højde for denne rejsetid i sit valg af transportomfang.

Udtrykt som den marginale trængselseksternalitet pr. km fås:

$$\frac{\Delta E}{\Delta L} = \frac{\Delta T}{\Delta L} - V^{-1}, \quad (2)$$

Det totale tidsforbrug, T , på et givet tidspunkt kan udtrykkes som gennemsnitligt tidsforbrug pr. km (V^{-1}) gange det kørte antal kilometer L :

$$T = V^{-1} \cdot L, \quad (3)$$

Da V^{-1} jo afhænger af trafikomfanget L , fås ved differentiering:

$$\frac{\Delta T}{\Delta L} = \frac{\Delta V^{-1}}{\Delta L} \cdot L + V^{-1} . \quad (4)$$

Indsættes (4) i (2) fås

$$\frac{\Delta E}{\Delta L} = \frac{\Delta V^{-1}}{\Delta L} \cdot L + V^{-1} - V^{-1} = \frac{\Delta V^{-1}}{\Delta L / L}$$

eller

$$\frac{\Delta E}{\Delta L} = \frac{\Delta V^{-1}}{\Delta \% L} . \quad (2')$$

hvor $\Delta \% L$ betyder den *relative* ændring i L . Det ses altså, at det ikke er nødvendigt at kende det absolutte trafikomfang, men kun den relative ændring sammenholdt med den tilhørende hastighedsændring, for at kunne beregne de marginale eksterne omkostninger pr. km. Dette kan være nyttigt, fordi det ofte er sværere at måle det samlede trafikomfang i et givet geografisk område end at vurdere ændringen i en indikator for trafikintensiteten i området.

Har man oplysninger om trafikintensiteten fordelt på tidsintervaller kan eksterne omkostninger pr. km opgjort som øget rejsetid for de øvrige trafikanter beregnes ud fra (2') baseret på kendskab til den sammenhæng, som er illustreret i Figur 4. En gennemsnitsværdi for hele døgnet (eller delperioder) kan herefter beregnes gennem sammenvejning af værdierne for de enkelte tidsintervaller med vægte svarende til trafikomfanget i disse intervaller.

Eksempelberegning

Som illustration af metoden og test af eventuelle operationelle vanskeligheder er foretaget en foreløbig kvantificering af trængseffekten i København, afgrænset til Frederiksberg og Københavns kommuner (herefter: København).

Data

Analysen er baseret på Trafikministeriets Trafik Undersøgelse. Her indsamles hver måned oplysninger fra godt 1.000 interviewpersoner (IP) ved hjælp af telefoninterview. Interviewpersonerne udgør en tilfældig stikprøve af den 16 til 74 årige befolkning. Hver IP bliver spurgt om hver enkelt af de rejser/ture, som vedkommende foretog dagen før interviewet. De udspørges blandt andet om transportform, rejsens varighed, rejseafstand samt start- og slutsted for rejsen. Ud fra rejseafstand og varighed kan et mål for rejsehastigheden beregnes for en givet tur registreret i et givet tidsinterval.

Der er en række problemer med at anvende TU-data til nærværende analyser. Der kan være stor usikkerhed forbundet med besvarelse af rejsetid og rejse længde, da det er respondentens umiddelbare subjektive skøn, der ligger til grund. For ture der køres hver dag (f.eks. bolig-arbejdsstedsrejser) må det formodes, at respondenterne har en rimelig viden om rejse længde og rejsetid, mens øvrige ture kun kan angives med mere afrundede skøn. Det må dog formodes, at usikkerheden er jævnt fordelt, således at fordelingen af over- og underkantsskøn resulterer i et middelret estimat, om end usikkerheden er betydelig.

Det skal endvidere nævnes, at der i de efterfølgende empiriske analyser er set bort fra de store køretøjer, busser og lastbiler. Dette er begrundet i tre forhold:

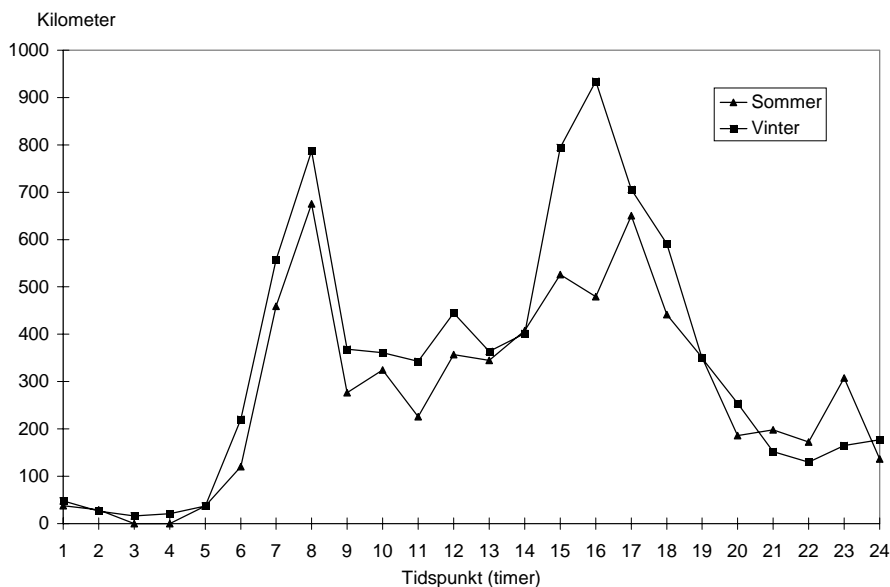
- For det første indgår disse ikke på brugbar vis i TU-datamaterialet. TU-data er umiddelbart anvendelige for personbiler, men for varebiler og lastbiler er der meget få anvendelige observationer. Antallet af observationer, der er anvendelige i relation til denne analyse, er 1.883 personbilture, 59 varebilture og kun 3 lastbilture. Varebilobservationerne anvendes i analysen sammen med personbilsobservationerne.
- For det andet skal nærværende notat primært ses som et metodenotat, hvor præcisionen af de endelige resultater ikke er det afgørende, men først og fremmest tjener til at sikre metodens anvendelighed i praksis.
- For det tredje påvirkes resultaterne kun af denne forsimplede udeladelse i det omfang, de udeladte køretøjer fordeler sig anderledes over døgnet end de medtagne personbiler (idet metodeopstillingen ovenfor jo har vist, at det er tilstrækkeligt at se på de relative ændringer i trafikintensiteten). Dette gør sig dog i et vist omfang gældende.

Beregningen af eksternalitetseffekter er baseret på *transportarbejdet* (personkilometer), idet interviews med både førere og passagerer indgår for at udnytte datamaterialet fuldt ud. I relation til trængsel er det imidlertid *trafikarbejdet* (bilkilometer), der er relevant som mål for trafikintensiteten. Hvis belægningsgraden er konstant over døgnet og ugen har det ingen indflydelse på beregningerne, idet det er tilstrækkeligt at kende de relative ændringer i trafikintensiteten, jvf. ovenfor.

Analyse

Der er i analysen skelnet mellem sommer (1.4-31.9) og vinter (1.10-31.3), da det formodes, at vejrliget kan have indflydelse på sammenhængen mellem trafikbelastning og trængslen. Noget tilsvarende kunne tænkes at gøre sig gældende med hensyn til skelnen mellem kørsel i dagslys og mørke. Sidstnævnte aspekt er dog ignoreret i det følgende.

Nedenstående figur viser fordelingen over døgnet af trafikarbejdet for de godt 1900 person- og varebiler fra TU-materialet. Denne stikprøve antages at udgøre et repræsentativt udsnit for trafikken i København som helhed, hvorfor deres trafikarbejde kan benyttes som indikator for trafikintensiteten i vejnettet.

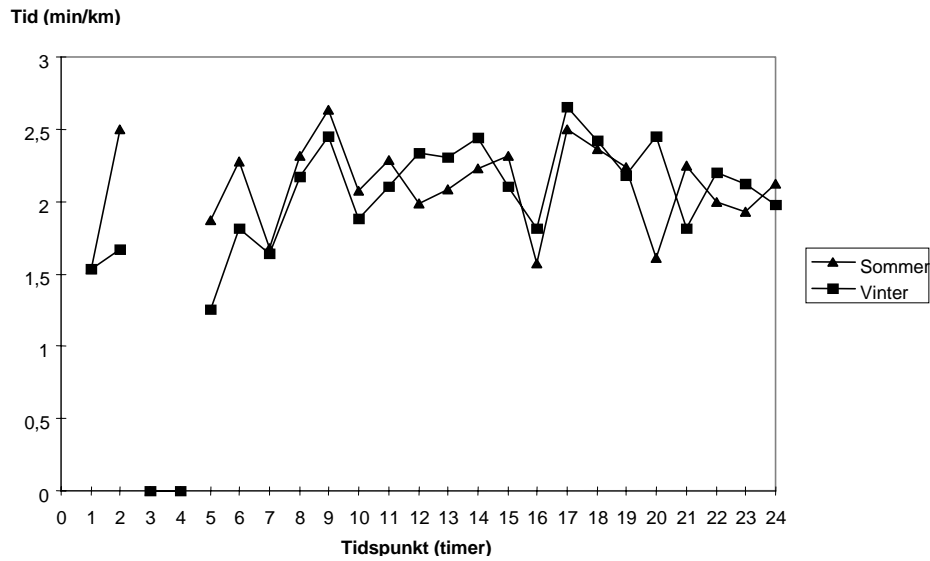


Figur 5 Person- og varebilers^{a)} trafikarbejde som funktion af døgntidspunktet - København

Note: Der er anvendt 1.942 observationer til at beregning af kurverne.

Tilsvarende viser Figur 6 den gennemsnitlige rejsetid pr. kilometer på forskellige tider af døgnet. Hastigheden forventes at være lav (og rejsetiden dermed høj) i perioder med stor trafikintensitet.

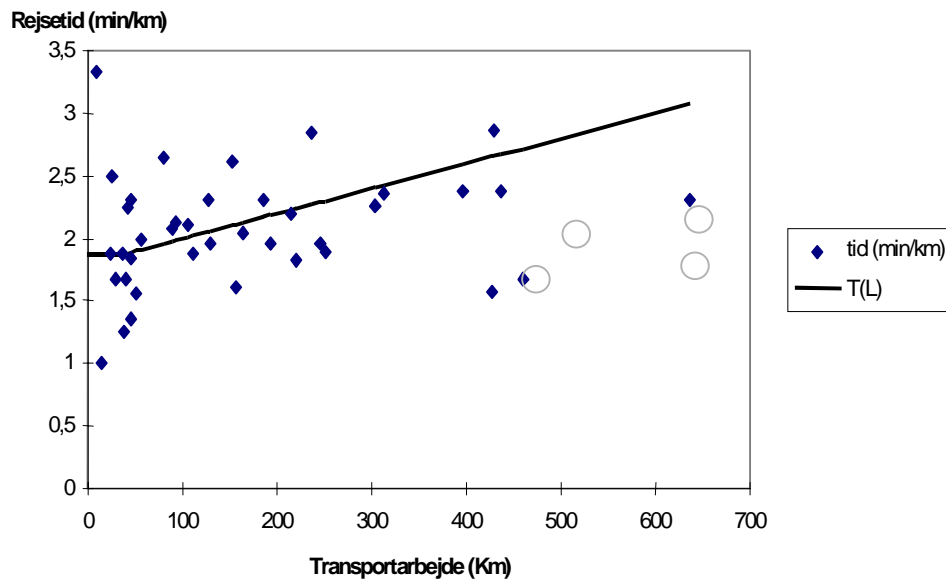
Rejsetidens variation forventes derfor at udvise nogenlunde det samme mønster som trafikarbejdet i Figur 5.



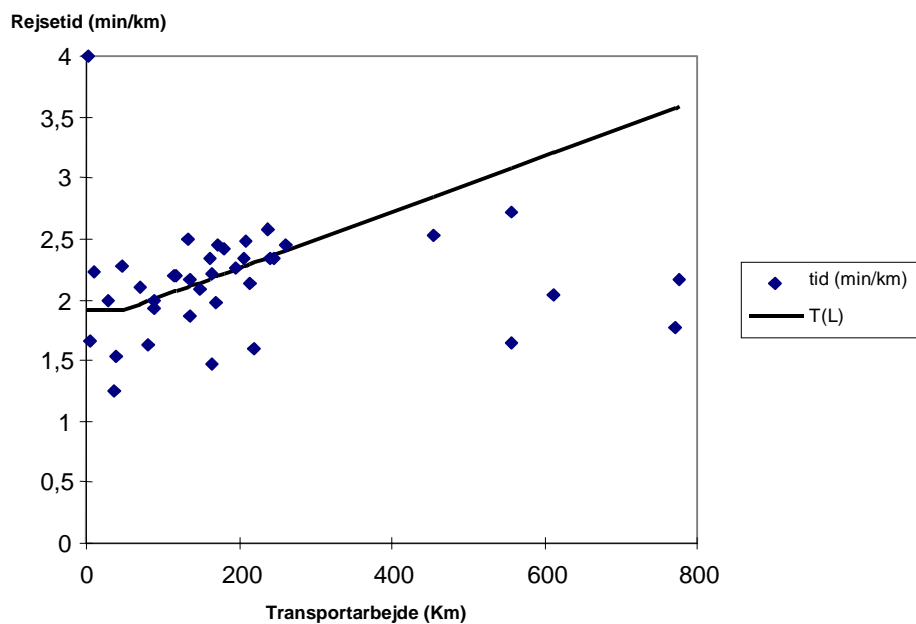
Figur 6 Rejsetid per kilometer som funktion af døgn tidspunktet - København

Note: Der er anvendt 1.942 observationer til beregning af kurverne.

Som det ses af Figur 6, er der ikke umiddelbart er en klar sammenhæng mellem døgn tidspunkt og rejsetid per kilometer, der modsvarer variationen i trafikintensiteten, hvilket da også bekræftes, hvis man med udgangspunkt i Figur 5 og Figur 6 i stedet plotter sammenhængen mellem rejsetid og trafikarbejde.



Figur 7 Rejsetiden som funktion af trafikarbejdet i København i sommerperioden



Figur 8 Rejsetiden som funktion af trafikarbejdet i København i vinterperioden¹⁾.

Det fremgår af de to figurer, at rejsetiden (min/km) er lav ved meget høje trafikintensiteter. Ses der bort fra disse punkter (med ring om i figurerne) tegner der sig imidlertid en nogenlunde klar, om end usikker, stigende sammenhæng mellem trafikintensitet og rejsetid pr. kilometer for både sommer- og vintertrafik. Den indtegnede "bedste rette linie" er anvendt som sammenhæng mellem trafikintensitet og rejsetid pr. kilometer til at bestemme de marginale eksterne trængselsomkostninger.

Resultater

Hvis man accepterer den meget usikre funktionelle sammenhæng der tegner sig i de to ovenstående figurer, kan man ud fra formel (2') beregne et samlet tidstab for de øvrige bilister for hhv. sommer og vinter på 0,61 og 0,90 minutter pr. ekstra kørt kilometer. Dette tal er vel at mærke et gennemsnitstal over hele døgnet, men formodes i praksis at være væsentligt højere i myldretidstrafikken og tilsvarende lavere for de øvrige tidspunkter.

Med anvendelse af en tidsværdi på 38 DKK/time eller 0,63 kr./minut fra Vejdirektoratets Trafikøkonomiske Enhedspriser 1994 kan tidstabet omregnes til monetære omkostninger jvf. nedenstående tabel.

*Tabel 1 Marginale eksterne trængselsomkostninger for trafikken i København
Gennemsnit over døgnet i 1995, 1994-priser*

	Sommer	Vinter	Samlet
Andel af trafikarbejde	49,6%	50,4%	100%
Ekstern effekt (bilmin./bilkm)	0,61	0,90	0,76
Belægningsfaktor (pers./bil)	1,5		
Rejsetidstab (personmin./bilkm)	0,92	1,35	1,14
Tidsværdi (kr./minut)	0,63		
Trængselsomk. (kr/bilkm)	0,57	0,85	0,71

Tabel 1 viser, at de marginale trængselsomkostninger er estimeret til 0,57 kroner per kilometer i sommerperioden og 0,86 kroner per kilometer i vinterperioden. Desuden er der beregnet et vægtet årgennemsnit, hvor de marginale trængselsomkostninger vægtes med den andel af trafikarbejdet, der køres i henholdsvis sommer- og vinterperioden. *De marginale trængselsomkostninger for København bliver dermed estimeret til 0,71 kroner per bilkilometer.*

Konklusioner

Resultaterne af analysen giver et foreløbigt bud på størrelsesordenen af de pågældende eksternalitetsomkostninger, målt som kr. per km opdelt på kørsel i København. Det bør dog understreges, at der stadig er tale om meget usikre opgørelser, som alene er tænkt som illustration af metoden. Datagrundlaget for beregningerne har klart vist sig at være utilstrækkeligt til at producere robuste resultater, som kan anbefales anvendt generelt i forbindelse med samfundsøkonomiske vurderinger fremover.

Det vurderes dog, at den opstillede metode er anvendelig til at opnå mere præcise resultater ved inddragelse af nye mere omfattende målinger af trafikomfang og rejsehastighed på vejnettet i København til estimation af sammenhængen mellem trafikintensitet og rejsetid pr. kilometer.