

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift  
Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet  
(Proceedings from the Annual Transport Conference  
at Aalborg University)  
ISSN 1603-9696  
[www.trafikdage.dk/artikelarkiv](http://www.trafikdage.dk/artikelarkiv)

## Modellering af kø-opstuvning i en statisk rutevalgmodel

*Christian Overgård Hansen, COH ApS, [coh\\_aps@mail.dk](mailto:coh_aps@mail.dk)*

*Dorte Filges, Vejdirektoratet, [dorf@vd.dk](mailto:dorf@vd.dk)*

*HenningSørensen, Vejdirektoratet, [has@vd.dk](mailto:has@vd.dk)*

*Bjarke Brun, Rapidis ApS, [bb@rapidis.com](mailto:bb@rapidis.com)*

---

### Abstrakt

Artiklen beskriver forbedring til de statiske rutevalgmodeller, som anvendes i Landstrafikmodellen (LTM) og OTM, så de bedre kan håndtere trængsel i vejnettet. Trængsel opstår typisk som følge af flaskehalse i vejnettet eksempelvis ved tilkørselsrampe på motorvej eller kryds i byen. I takt med stigende trafik bliver det derfor mere påkrævet, at trafikmodellerne kan belyse konsekvenserne i forhold til eksisterende og fremtidige flaskehalse. Der foreslås en metode, som umiddelbart kan integreres med de nuværende rutevalgmodeller i LTM og OTM. De nuværende speed-flow kurver udbygges med kø-ventetidsfunktioner, som anvendes udover kapacitetsgrænsen. Kø-ventetidsfunktionerne, som beskriver middelventetid i kø pr. køretøj, er estimeret ved hjælp af kø-teori og verificeret mod aktuelle rejsetidsmålinger. Derudover introduceres reduktionsfaktorer for at kunne håndtere multiple flaskehalse i vejnettet, som er mere eller mindre indbyrdes afhængige. Metoden er succesfuldt testet i Hovedstadsområdet. Det er således muligt at identificere eksisterende flaksehalse og beregne køretider i myldertid svarende til rejsetidsmålinger. Det anbefales at arbejde videre med henblik på implementering i LTM.

---

### 1. Indledning

Trængsel opstår typisk som følge af flaskehalse i vejnettet eksempelvis ved tilkørselsrampe på motorvej eller kryds i byen. Betydningen af sådanne flaskehalse i forhold til trafikafvikling og trængsel er steget over de sidste 20 år, hvilket målinger af rejsetider og tidstab tydeligt viser. Flaskehalse i vejnettet kan således have stor betydning for valg af infrastrukturinvesteringer, idet eksisterende flaskehalse kan fjernes eller aflastes. Omvendt kan der også ved nye tiltag eller ved stigende trafik skabes flaskehalse andre steder i nettet. Det er derfor ved undersøgelse af eksempelvis nye vejanlæg i stigende grad vigtigt at kunne belyse konsekvenserne i forhold til eksisterende eller fremtidige flaskehalse.

Rutevalgmodellerne i OTM og Landstrafikmodellen (LTM) kan ikke beregne tilbagestuvning af trafik ved overbelastet vejstrækning, idet rejsetid på vejstrækningerne i modellerne beregnes ved hjælp af speed-flow kurver uafhængigt af trafikken på øvrige vejstrækninger. Artiklen præsenterer forslag til forbedring af de eksisterende statiske rutevalgmodeller til at kunne håndtere tilbagestuvninger af trafik tilstrækkeligt præcist til at kunne vurdere konsekvenser af flaskehalse på vejstrækninger. Artiklen beskriver et teoretisk grundlag, som demonstreres i et casestudy baseret på data fra Hovedstadsområdet. Artiklen fokuserer på flaskehalse, som opstår på vejstrækninger, idet forbedringer af krydsmodellerne ikke diskuteres nærmere.

## 2. Baggrund og formål

Wardrop's principper har traditionelt dannet grundlaget for statistisk trafikassignment. Det første princip om brugerligevægt siger:

*The journey times on all routes actually used are equal and are not greater than those which would be experienced by a single vehicle on any unused route (Wardrop, 1952)*

Brugerligevægten som beskrevet af Wardrop opnås typisk gennem en iterativ beregningsprocedure. Szeto og Wong (2011) lister forskellige udvidelser til den traditionelle statiske assignment, som er anvendt igennem tiden. Daganzo og Sheffi (1977) beskriver en udvidelse med stokastisk simulering, der tager hensyn til, at trafikanterne ikke kender rejsetiderne præcist eller opfatter ruterne forskelligt. Metoden med stokastisk brugerligevægt (SUE) anvendes eksempelvis i LTM og OTM. De statiske modeller har stor praktisk anvendelse og er dominerende på markedet. Da de normalt når en ligevægt eller tilnærmer en ligevægt, er de meget praktiske ved sammenligninger. Det kan f.eks. være i forbindelse med undersøgelse af et nyt vejanlæg sammenlignet med en basis uden denne vej.

Chiu et. al (2010) lister imidlertid en række mangler ved de statiske modeller:

- Speed-flow kurver har ingen trafikal mening over kapacitetsgrænsen
- Trafikstrøm ind og ud af strækning er ens
- Først-ind-først-ud princip
- Der differentieres ikke mellem kørespor på en strækning

De statiske assignmentmodeller er karakteriseret ved speed-flow kurver, der beskriver rejsetiden på en strækning som funktion af trafikmængden på strækningen. Trafikmængden på en strækning kan overstige den fysiske kapacitet, hvorfor speed-flow kurven ikke har nogen fysisk fortolkning over kapacitetsgrænsen. Det forudsættes samtidigt, at trafikken uanset trafikmængde bevæger sig frem med ens hastighed. Antallet af biler, som kommer ind på en vejstrækning er dermed lig med antallet af biler, som strømmer ud fra strækningen i et givet tidsbånd. Der kan således ikke opbygges køer. Begrænsningen om først-ind-og-først-ud medfører i princippet, at der ikke kan overhales i en statisk model. Det modificeres dog ofte ved opdeling i forskellige køretøjsklasser, som har forskellige tilladt kørehastighed.

Begrænsningerne leder frem til udvikling af en ny type af assignmentmodeller, som benævnes dynamiske assignmentmodeller. Dynamiske assignmentmodeller er en forholdsvis bred betegnelse for modeller, der som minimum inkluderer en tidsvariation i efterspørgslen. Chiu et. al (2010) anvender begrebet dynamisk for at tilkendegive, at en ligevægt er baseret på erfaret rejsetid og omkostninger. I SUE forudsættes i princippet, at trafikanterne ændrer rutevalg undervejs, hvis rejsetiderne ændres. I praksis vil trafikanterne imidlertid i overvejende grad beslutte en rute inden de kører afhængig af deres erfaring med trafikken på det givne tidspunkt. Det kræver modelmæssigt en finere tidsmæssig opdeling af efterspørgslen og løbende opsamling af rejsetider på ruterne.

Dynamiske assignmentmodeller klassificeres traditionelt i mikroskopiske, meso-skopiske og makroskopiske modeller (Snelder, 2009). De varierer i detaljering af net (f.eks. med og uden modellering af kørespor) og i det omfang de dynamiske effekter modelleres. Der findes flere mikrosimuleringsmodeller af enkelt-køretøjer, som i praksis anvendes til undersøgelse af kryds eller mindre afgrænset vejnet. Der kan f.eks. nævnes VISSIM eller SATURN. Derimod findes kun få dynamiske modeller, som i praksis kan anvendes i beregning af større vejnet. Der kan nævnes INDY (Bliemer, 2004) og DYNAMEQ (Mahut, 2000). De er dog kun testet på net (Snelder, 2009), som er meget mindre end vejnet i LTM og OTM.

De statiske modeller har som nævnt mangler med hensyn til håndtering af kø og tilbagestuvninger. Omvendt har de dynamiske modeller endnu lille eller ingen praktisk anvendelse ved større modelarbejder. Det undersøges derfor, om de eksisterende statiske rutevalgsmodeller kan forbedres til at kunne håndtere tilbagestuvninger af trafik tilstrækkeligt præcist, så konsekvenser af flaskehalse kan beregnes.

### 3. Metodegrundlag

I LTM og OTM, udlægges timetrafikken i en iterativ proces (Means-of-Successive-Averages (MSA)) til ligevægt, hvilket vanskeliggør integrationen med køopstuvning af flere årsager. For det første foreligger der ingen tidsmæssig opdeling af trafikken indenfor timen, idet trafikken udlægges samlet. Dermed kan en tidsmæssig opbygning af kø ikke beskrives ud fra assignmentmodellens resultater. For det andet omfatter de beregnede ruter hele timen, så det er ikke muligt at korrigere rutevalg løbende på basis af blokering af strækninger eller kryds. For det tredje skal rejsetiden på en strækning være en funktion af trafikmængden på strækningen for at sikre konvergens. Det betyder, at rejsetiden på en strækning ikke må afhænge af belastningen på en anden strækning.

Bundschuh et al. (2006) foreslår ved integration af kø-opstuvning i SUE at justere speed-flow funktionen, således at rejsetiderne tilnærmelsesvis kommer til at svare til rejsetid inklusiv tid forårsaget af tilbagesuvninger på grund af kø. Det vil sige, at speed-flow kurverne udvides til at omfatte en ekstra parameter  $\theta$ , så speed-flow funktionen nu kan udtrykkes som  $f(N_a, \theta_a)$ . Den nye parameter kan eksempelvis være en korrektion til kapaciteten på strækningen eller tillæg for kø-ventetid. Det vælges her at anvende kø-ventetid, som kan bestemmes på basis af kø-teori (se afsnit 4).

SUE kan derfor umiddelbart udvides med en ydre løkke, hvor korrektioner til speed-flow kurverne  $\theta_a$  opdateres ved hjælp af MSA. Det vil sikre konvergens, men er meget beregningstungt. Der foreslås derfor en anden beregningsprocedure, hvor  $\theta$  opdateres samtidigt med trafik og rejsetid. Da de første iterationer giver meget usikre estimater for trafik og rejsetid, er det ikke hensigtsmæssigt at starte beregningen af  $\theta$ , før der er opnået en vis form af ligevægt. Hvis det initiale antal iterationer benævnes  $n_0$ , kan proceduren beskrives som følger:

For  $i = 1$  til  $n_0$

0. Trafikmængden på strækning  $a$  sættes til nul:  $N_a = 0$
1. Opdater rejsetid på sidst beregnede modellerede trafik vha. speed-flow kurve  $f(N_{a,i})$
2. Simulér præferencevægte og strækningstokastik og beregn strækningssomkostninger angivet ved (1)
3. Udlæg trafik ved hjælp af en alt-eller-intet beregning
4. MSA opdater trafikmængden på strækningen  $a$  på basis af den seneste alt-eller-intet beregning ( $N'_{a,i}$ ) og den forrige iteration ( $N_{a,i-1}$ ) for at få den nyeste modellerede trafik:  $N_{a,i} = \frac{1}{i}N'_{a,i} + \frac{i-1}{i}N_{a,i-1}$
5. Rejsetider- og omkostninger (LOS) opdateres tilsvarende ved hjælp af MSA som beskrevet i beregningstrin 4

Sæt  $i + 1$  og gå til 1

Hvis  $i + 1 > n_0$  sæt  $i = n_0 + 1$  og gå til 6

For  $i = n_0 + 1$  til  $n$

6. Opdater rejsetid på sidst beregnede modellerede trafik vha. speed-flow kurve  $f(N_{a,i}, \theta_{a,i})$
7. Simulér præferencevægte og strækningstokastik og beregn strækningssomkostninger angivet ved (1)
8. Udlæg trafik ved hjælp af en alt-eller-intet beregning
9. MSA opdater trafikmængden på strækningen  $a$  på basis af den seneste alt-eller-intet beregning ( $N'_{a,i}$ ) og den forrige iteration ( $N_{a,i-1}$ ) for at få den nyeste modellerede trafik:  $N_{a,i} = \frac{1}{i}N'_{a,i} + \frac{i-1}{i}N_{a,i-1}$
10. Rejsetider- og omkostninger (LOS) opdateres tilsvarende ved hjælp af MSA som beskrevet i beregningstrin 4
11. Beregn  $\theta'_{a,j}$
12. MSA opdater parameter:  $\theta_{a,j} = \frac{1}{j}\theta'_{a,j} + \frac{j-1}{j}\theta_{a,j-1}$

Sæt  $i + 1$  og gå til 6

Hvis  $i + 1 > n$  stoppes.

Metoden forudsætter:

- At der ikke arves kø fra omgivende timer
- At rejsetiden på ruten ikke strækker sig udover kø-ventetiden
- At der kun er en flaskehals på ruten

Den første forudsætning er i overensstemmelse med udlægning af trafikken i isolerede tidsbånd, som anvendes i OTM<sup>1</sup>. Det kan ved massive overbelastninger af nettet medføre en underberegning af rejsetiderne ved at betragte tidsbåndene separat. Det kan dog grundlæggende kun løses ved hjælp af en dynamisk assignment. Hvis ruten er lang, kan køen være afviklet, før nogle af bilisterne når den

<sup>1</sup> Endnu ikke færdig implementeret i LTM

overbelastede strækning. OTM beskriver ture indenfor det tidligere Hovedstadsområde, så turens varighed vil derfor overvejende være væsentlig kortere end en time.

Hvis der på en rute er flere flaskehalse, er det ikke korrekt at beregne forsinkelsen for hver flaskehals og lægge dem sammen. Det vil typisk være den flaskehals, der har den størst beregnede belastningsgrad, der er afgørende for bilisternes forsinkelse. Det er derfor i et net nødvendigt at identificere, hvilke flaskehalse der kan anses som uafhængige.

Lad os forudsætte, at der findes et sæt af ruter  $R \in \{R_1, R_2, \dots\}$  med tilknyttede trafikmængder, som hver mindst indeholder en overbelastet strækning. I beskrivelse af uafhængighed mellem flaskehalsene kan der introduceres en doseringsfaktor  $D_a$ , som knyttes til hver beregnet flaskehals. Hvis en flaskehals er uafhængig af alle andre flaskehalse eksempelvis fordi der beregnes en meget stor overbelastning, så tildeles den værdien 0. Er flaskehalsen derimod i umiddelbar forlængelse af en større flaskehals, tildeles den værdien 1. Doseringsfaktoren kan derfor tolkes som en slags korrelationsfaktor, hvor værdien 1 angiver fuldstændig korrelation og værdien 0 ingen korrelation. Angiver  $t'_{k\phi,a}$  den beregnede tid på strækning a ifølge den anvendte kø-ventetidsfunktion, så indregnes følgende tid på strækningen:

$$(1) \quad t_{k\phi,a} = t'_{k\phi,a} (1 - D_a^\alpha)$$

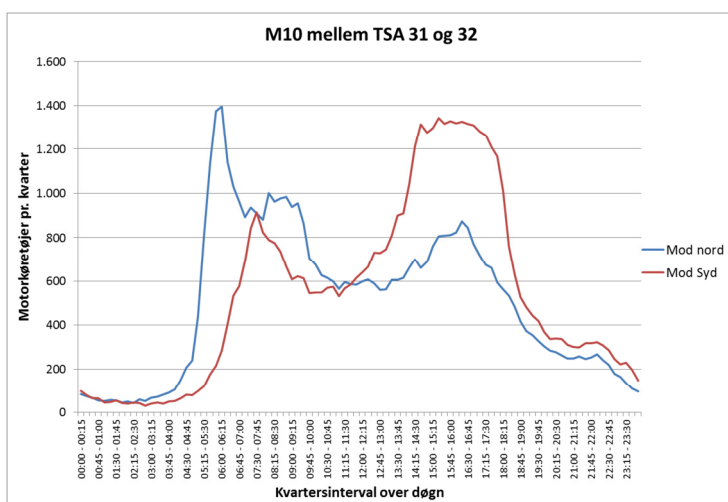
Der skal således opstilles regler for beregning af doseringsfaktoren, hvorefter beregning af kø-ventetiderne umiddelbart følger. Det kan eksempelvis være følgende fremgangsmåde:

1. Flaskehalsene sorteres efter belastningsgrad og tilknyttes hver en delmængde af ruterne i  $R$ , som passerer den pågældende flaskehals.
2. Flaskehals med størst belastningsgrad tillægges doseringsfaktor  $D_a = 0$ .
3. Dernæst gennemgås de øvrige flaskehalse i sorteret rækkefølge:
  - a. Hvis alle ruter knyttet til den betragtede flaskehals indgår i sæt af ruter for allerede behandlede flaskehals, sættes  $D_a = 1$ . Det vil typisk være strækninger, som ligger umiddelbart før eller efter en større belastet strækning.
  - b. Hvis ingen af ruterne knyttet til den betragtede flaskehals indgår i sæt af ruter for allerede behandlede flaskehals, sættes  $D_a = 0$ .
  - c. Hvis en del af ruterne knyttet til den betragtede flaskehals indgår i sæt af ruter for allerede behandlede flaskehals, beregnes  $D_a$  som en andel af de berørte trafikmængde. Passeres eksempelvis den betragtede flaskehals af 10 ruter med samlet 1000 biler, hvoraf 8 ruter med samlet 700 biler indeholder flaskehalse som allerede er behandlet, beregnes  $D_a = 0,7$  ( $700/1000$ ) ved  $\alpha=1$ . Således indregnes 30% af den beregnede kø-ventetid.

Den geografiske udbredelse af køopstuvning sikres igennem den iterative beregningsprocedure i SUE, hvor flaskehalsene vil flytte sig afhængig af den aktuelle kø-ventetid.

#### 4. Estimation af kø-ventetidsfunktion

I dette afsnit præsenteres metoden, der er anvendt til at udvikle de generaliserede kø-ventetidsfunktioner for flaskehalse på vejstrækninger. Ventetidsfunktioner anvendes til at estimere en middelveventetid i kø pr. køretøj som funktion af graden af overbelastning af flaskehalsen.



Figur 1. Trafikfordeling over døgn, begge retninger på sydlige del af Køge Bugt Motorvejen

Grundlaget for udvikling af ventetidsfunktionerne er trafikfordelinger over hverdagsdøgn, som er målt i snit på vejstrækninger, se eksempel figur 1. Fremgangsmåden ved brug af trafikdata og efterfølgende fastlæggelse af ventetidsfunktioner er:

1. Der er udvalgt en række repræsentative tællesnit på vejstrækninger. For vejstrækninger skelnes mellem tre vejtyper: motorveje, motortrafikveje og øvrige landeveje. Det skyldes, at LTM og OTM anvender disse vejtyper.
2. For alle udvalgte tællesnit på strækninger anvendes trafikdata over døgnet på kvartersniveau for gennemsnit af hverdage fra mandag – torsdag over en periode på to uger. Trafikdata for fredage anvendes ikke, fordi trafikfordelingen på denne ugedag ofte er meget anderledes end for øvrige hverdage.
3. Der fokuseres i analysen på trafik, der ankommer til flaskehalsen i spidstimen. Spidstimen kan enten forekomme om morgenen eller om eftermiddagen, og dette har givet anledning til udvikling af to ventetidsfunktioner pr. vejtype for hhv. morgen- og eftermiddagsspidstimer.
4. Kapaciteten for strækningen omkring tællesnittet beregnes i henhold til vejreglerne, og ved en given trafikintensitet kan der herefter beregnes en belastningsgrad, som er trafikintensiteten divideret med kapaciteten.
5. Der anvendes en simpel deterministisk kø-beregningsmodel til at beregne middelventetiden i kø for den trafik, som ankommer til kø-bagenden ved flaskehalsen i spidstimen. Hvis der ikke er kø, sættes ventetiden til nul. Ved at opskrive trafikken ved bibeholdelse af den aktuelle døgnetrafikfordeling for tællesnittet, kan der for hvert valgt tællesnit opnås forskellige belastningsgrader, som hver giver anledning til beregning af middelventetiden i kø.
6. Punkter, der repræsenterer samhörørende værdier af belastningsgrad og middelventetid i kø for hvert tællesnit, indlægges i et diagram som vist på figur 2. Der skelnes som nævnt mellem beregnede ventetider for hhv. morgen- og eftermiddagsspidstimer.
7. Den generelle ventetidsfunktion er udviklet som et anden grads polynomium som empirisk model på baggrund af de beregnede samhörørende værdier af belastningsgrad og ventetid for alle tællesnit på hver af vejtyperne. Der blev også forsøgt med andre typer af modeller, men disse var generelt set ikke mere repræsentative for punkterne end anden grads polynomiet.

Figur 2 viser resultatet af kø-beregninger for forskellige trafikfordelinger målt på motorvejsstrækninger. De forskellige belastningsgrader, som aflæses på den vandrette akse på figur 2, er fremkommet ved, at trafikken beregningsmæssigt er opskrevet med faktorer, som medfører de pågældende belastningsgrader i spidstimen, samtidig med at trafikfordelingen over døgnet er bibeholdt, se pkt. 5 og 6 ovenfor.

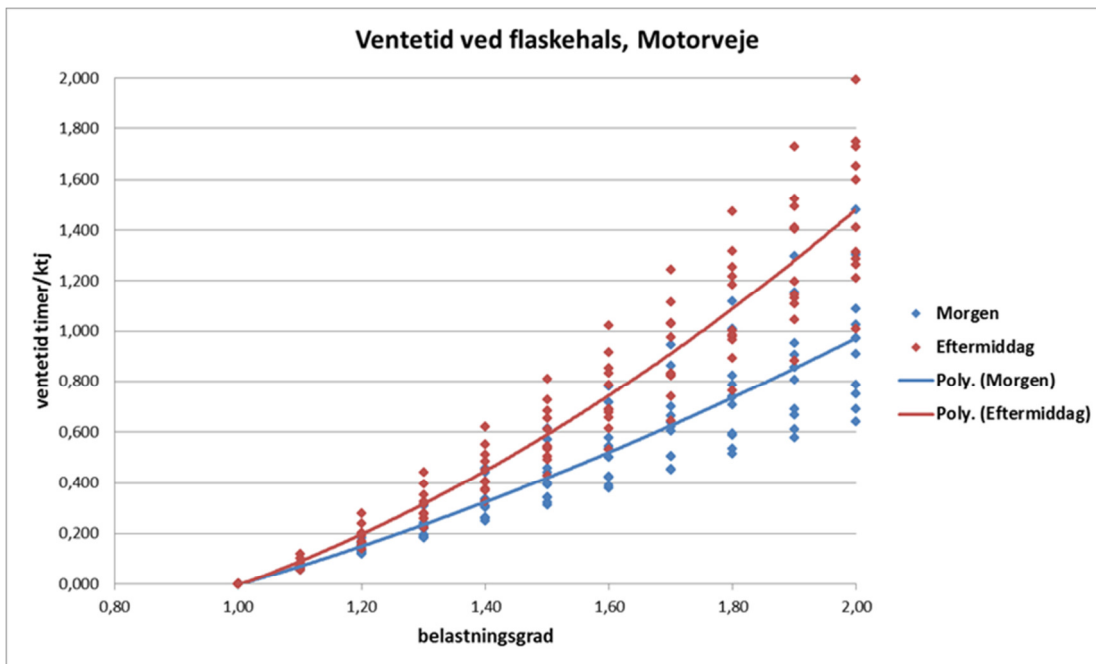
De blå punkter repræsenterer den beregnede ventetid ved pågældende belastningsgrad for trafik, der ankommer i en spidstime om morgenen og de røde om eftermiddagen. Den blå og røde kurve på figur 2 er tilsvarende de udviklede kø-ventetidsfunktioner fundet ud fra punkterne ved regression med et andengradspolynomium, se pkt. 7 ovenfor. De fundne funktioner for motorvejstrafik er:

$$y = 0,2611x^2 + 0,1920x - 0,4531 \text{ ved morgentrafik}$$

$$y = 0,5945x^2 - 0,2984x - 0,2961 \text{ ved eftermiddagstrafik}$$

hvor  $x$  er belastningsgraden, og  $y$  er middelventetiden i timer pr. køretøj.

Der er ligeledes udviklet kø-ventetidsfunktioner for motortrafikveje og landeveje.



Figur 2. Samhørende værdier af belastningsgrad og middelventetid for trafik, der ankommer i morgen- eller eftermiddagsspidstimen

Man skal være opmærksom på, at der både er trafik som får en større og en mindre ventetid end den, der beregnes for spidstimen. Trafikken, der ankommer tidligt i løbet af perioden med overbelastning, vil således have en mindre ventetid end trafik, der ankommer sent i perioden med overbelastning. Dette skyldes, at der i perioden med overbelastning dannes en stadig længere kø, som først skal afvikles, inden de sidst ankomne køretøjer kan passere flaskehalsen.

Som det ses i figur 2, er der forholdsvis stor variation i ventetiden, der beregnes for de forskellige tællesnit, især ved høj belastningsgrad. Dette skyldes forskelle i trafikfordeling mellem de indgående målesnit. Ved forskellige trafikfordelinger vil der således "være arvet" en forskellig kø, når spidstimen indtræffer, og denne initialkø har en særdeles stor virkning på ventetiden for trafik med ankomst i spidstimen.

For motorveje og øvrige landeveje ligger kurven for eftermiddagsspidstimen højere end for morgenspidstimen, hvilket vil sige at en given belastningsgrad for en eftermiddagsspidstime giver en længere ventetid end samme belastningsgrad for en morgenspidstime. Årsagen er, at trafikken normalt er mere fordelt over tid om eftermiddagen end om morgenen, hvor trafikken ofte topper i en forholdsvis smal spids, se eksemplet vist på figur 1. Den mere spredte trafik om eftermiddagen betyder, at der er et større potentiale for kødannelse allerede inden spidstimen, hvilket øger kølængde og ventetid for den trafik, der ankommer i spidstimen.

## 5. Beskrivelse af testcase

### 5.1. Datagrundlag

Det er valgt at teste metoden ved hjælp af data fra OTM, da tilstrækkelig detaljerede data endnu ikke foreligger fra LTM. For det første er tidsbåndopdelte matricer endnu ikke færdigkalibreret i LTM. Det er nødvendigt for at kunne belyse trængsel i myldertid. For det andet er krydsforsinkelsesmodellen endnu ikke implementeret i LTM, hvilket bl.a. er nødvendigt for at kunne sammenligne rejsetider med målinger.

OTM dækker det tidligere Hovedstadsområde (København og Frederiksberg kommuner samt tidligere København, Frederiksberg og Roskilde amter). Basisåret for OTM er 2004. Der er i anden sammenhæng beregnet en 2009-situation, som er sammenlignet med tællinger. Bilmatricerne fra den beregning er

benyttet her. Hverdagsdøgnet er opdelt i 7 tidsbånd, herunder myldertiderne kl. 7-8, kl. 8-9 og kl. 15-18. OTM omfatter også krydsforsinkelsesmodel, således at vejnettet indeholder kodning af kryds.

Det er i artiklen valgt at fokusere på resultater for morgenmyldertid kl. 7-8.

OTM-vejnet med tilhørende krydsdata er overført til Traffic Analyst formatet, der benyttes i LTM. Traffic Analyst anvender et GIS vejnet, der kan udnytte ArcGIS Network Dataset til at sikre topologien i netværket. Kryds data er overført ved en nyudviklet automatisk rutine fra OTM til krydsmodul, som anvendes i LTM. Efterfølgende er overførsel af data fra OTM til LTM-plattformen tjekket ved sammenligning af kørsler med Traffic Analyst og OTM.

## 5.2. Værktøj

Testværktøjet er implementeret i Traffic Analyst, så det vil være nemt at tage i brug i LTM på sigt. Testværktøjet indeholder i forhold til den nuværende version af LTM følgende udvidelser:

- Vejnettet er tilføjet parametre til beregning af flaskehalstid.
- For vejstrækninger, der har flaskehalsparametre, anvendes speed-flow kurverne kun op til belastningsgrad=1, hvorefter der suppleres med kø-ventetid.
- Flaskehalstiden doseres efter brugerens specifikation.
- Flaksehalstid opsamles i en matrix med rejsetider.

I LTM og OTM anvendes som tidligere omtalt SUE i udlægning af trafikken. Det er i testene valgt at udelade den stokastiske variation af præferencer og strækninger for i praksis at kunne gennemføre et tilstrækkeligt antal test. Metodikken kan simpelt udvides til SUE, det vil dog tage væsentlig længere tid at konvergere beregningerne.

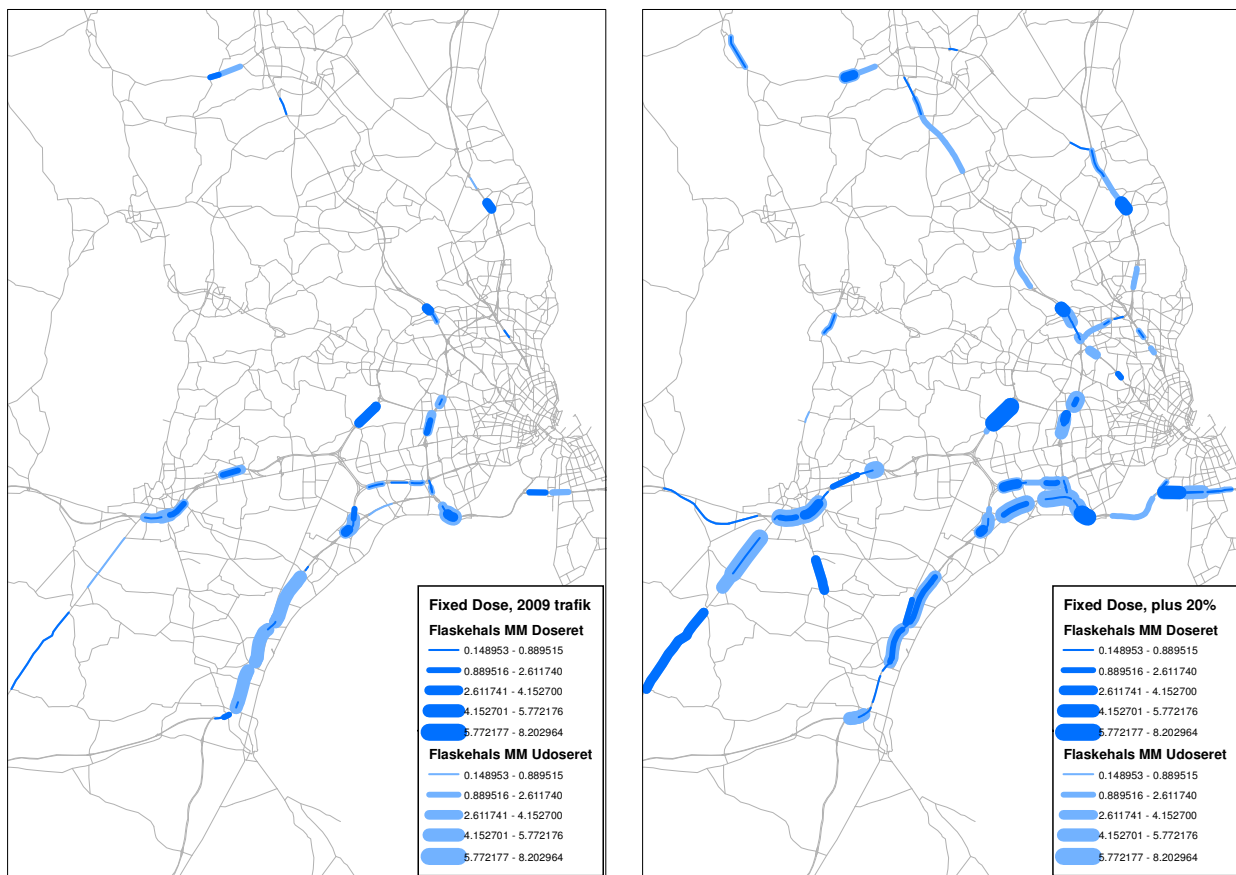
## 6. Resultater af testberegninger

### 6.1. Lokalisering af flaksehalse

Det er indledningsvis belyst, hvorvidt metoden er i stand til at finde de faktiske flaskehalse i vejnettet i og omkring København. Figur 3 viser i illustration til venstre en beregning baseret på OTM-data for 2009 for tidsrummet kl. 7-8. Vejnettet indeholder således ikke de gennemførte udvidelser af Køgebugt Motorvej, Holbæk Motorvej, M4 og motorvejstrækningen mellem M3 og M4. Det virker visuelt overbevisende, da de forventede flaskehalse stort set er fundet. Det noteres, at de gennemførte motorvejsudvidelser og de kommende udvidelser af Helsingør Motorvej og Køgebugt Motorvej søger at aflaste nogle af de beregnede flaksehalse.

Der er i illustration til højre i figur 3 gennemført en beregning, hvor trafikken i tidsrummet er opskrevet med 20%. Det kan illustrere det værste tidspunkt under myldertiden. Det kan også bruges til at give en ide om, hvor der vil opstå nye flaksehalse, hvis trafikken i fremtiden vokser i morgenmyldertiden.

Farven indikerer størrelsen af forsinkelsen i kø. Størrelsen af forsinkelse undersøges nærmere i afsnit 6.3 ved sammenligning med GPS-målinger.



Figur 3. Modelberegnete flaskehalse i Hovedstadsområdet i 2009 i tidsrummet kl. 7-8. I illustration til højre er trafikken opregnet med 20%

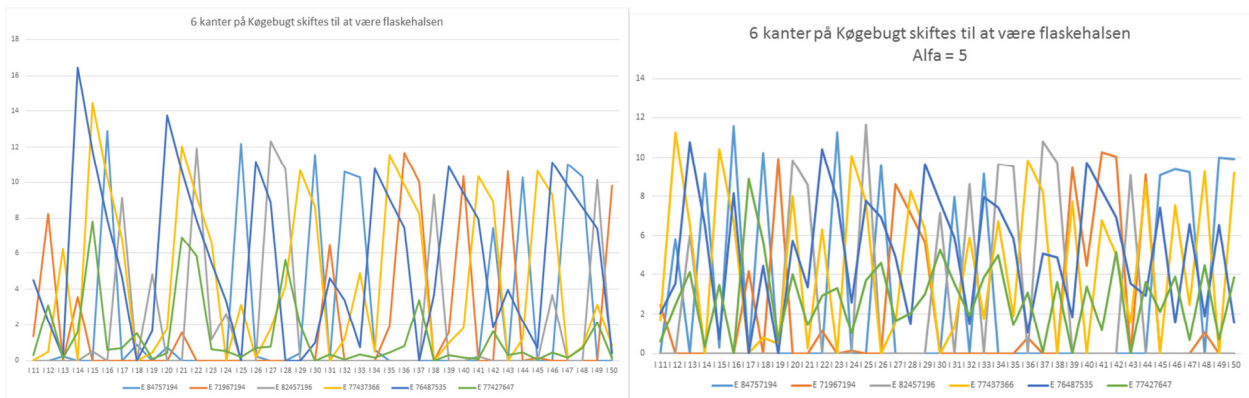
## 6.2. Undersøgelse af dosering

Hvis den samme bilist passerer flere potentielle flaskehalse, så vil det være den værste af dem, som primært skaber trængsel. Den afhængighed er forsøgt udtrykt ved hjælp af (1). Alfa angiver den funktionelle form af gensidig påvirkning mellem flaskehalsene. Hvis parameterværdien eksempelvis er 1, vil der være en lineær reduktion i den beregnede kø-ventetid i forhold i den del af trafikken, som passerer to flaskehalse. Hvis der forudsættes en parameterværdi, som er større end 1, så vil kø-ventetiden blive mindre reduceret i tilfælde, hvor der er lille korrelation mellem flaskehalsene. Omvendt vil der i tilfælde, hvor trafikken er næsten den samme ved to flaskehalse, være større reduktion i den beregnede kø-ventetid. Det synes derfor mest korrekt at forudsætte en parameterværdi større end 1. Det skyldes, at trafikken langs indfaldsveje primært forsinkes af en flaskehals på strækningen. Samtidig vil det være en undervurdering af forsinkelse for mange bilister at reducere kø-ventetid, hvis kun få bilister på strækningen passerer en værre flaskehals.

Doseringen betyder, at flaskehalse og forsinkelser flytter mellem iterationer i udlægning af trafikken. Figur 4 viser den beregnede kø-ventetid inklusiv reduktion (1) for 6 strækninger langs Køgebugt Motorvejen afbildet som funktion af iterationsnummer (her iteration 11 til 50). Det ses, at kø-ventetiderne (i minutter) "hopper" mellem iterationer og kun dæmpes lidt. I den venstre figur er benyttet alfa = 1, mens der i den højre figur er benyttet alfa = 5. Det ses, at nogle af de største udsving reduceres ved at gå over til alfa = 5. Derimod ses der i eksemplet ikke nogen tydelig forskel i forhold til konvergens.

Køgebugt Motorvejen er formodentlig er en af de værste strækninger at modellere, da trafikken på strækningen er stor og meget korreleret. Figuren er derfor ikke repræsentativ for konvergens i vejnettet, det er nærmere "worst case".



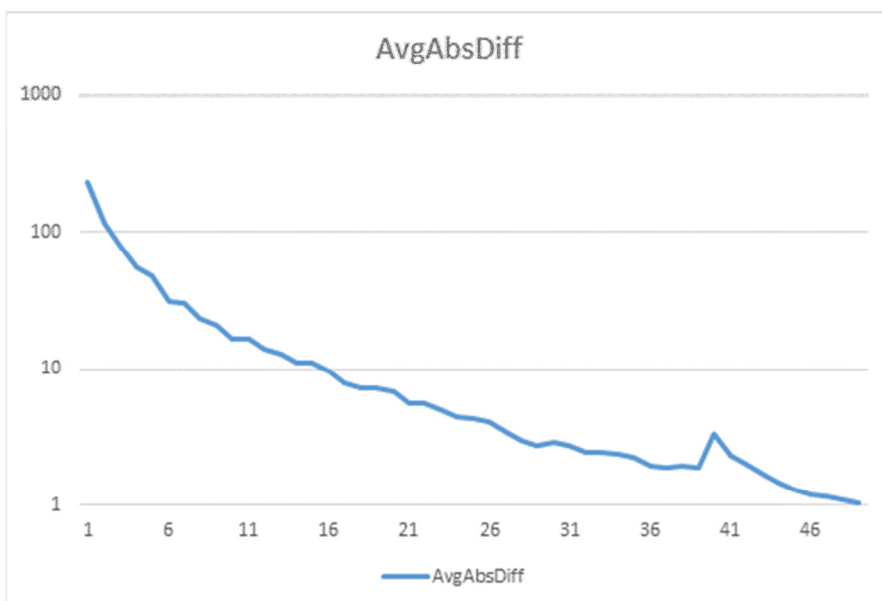


Figur 4. Stabilitet i lokalisering af flaskehalse langs Køgebugt motorvej ved anvendelse af  $\alpha = 1$  og  $\alpha = 5$

Beregningstiden ved fremgangsmåden beskrevet i afsnit 3 er forholdsvis lang, da der udtrækkes og behandles rutebundter i hver iteration større end  $n_0$ . Der er derfor undersøgt metoder til at reducere regnetid og samtidig reducere fluktuation i lokalisering af flaskehalse mellem iterationer. En mulighed er at modificere beregningsrutinen beskrevet i afsnit 3, således at doseringsfaktorerne fastlåses efter iteration  $n$ . De efterfølgende iterationer gennemføres helt almindeligt uden udskrivning af rutebundter indtil konvergens. En sådan fremgangsmåde er testet, idet rutebundterne er bestemt på basis af iterationsnummer  $n = n_0 + 1$ . Det reducerer beregningstiden meget kun at udskrive og behandle rutebundter for en enkelt iteration. Det kræver, at antallet af iterationer  $n_0$  er tilstrækkelig til at opnå en tilfredsstillende ligevægt, som kan danne grundlag for rutebundterne.

Figur 5 viser den gennemsnitlige afvigelse i den udlagte trafik i forhold til den foregående iteration. Figuren antyder en forholdsvis hurtig konvergens i den modificerede metode. Der er i beregningen anvendt  $n_0 = 39$  og beregning af rutebundter i iteration  $n = 40$ . Der ses i figuren et lille spring efter, at doseringsfaktorerne er blevet fastlåste.

Metoden med fastlåsning af doseringsfaktorer synes derfor beregningsmæssigt at have fordele fremfor metoden beskrevet i afsnit 3.



Figur 5. Gennemsnitlig forskel i udlagt trafik mellem successive iterationer i metode med fastlåsning af doseringsfaktorer

### 6.3. Sammenligning af rejsetid med målinger

Figur 6 sammenligner beregnet og målt rejsetid for 12 udvalgte relationer. Beregningen er baseret på den modificerede metode beskrevet ovenfor. Rejsetiderne er beregnet med og uden 20% opregning af trafik. Der er ikke fuldstændig konsistens mellem måling og beregning, da nogle af målingerne stammer fra 2010, og beregningen er baseret på data fra 2009.

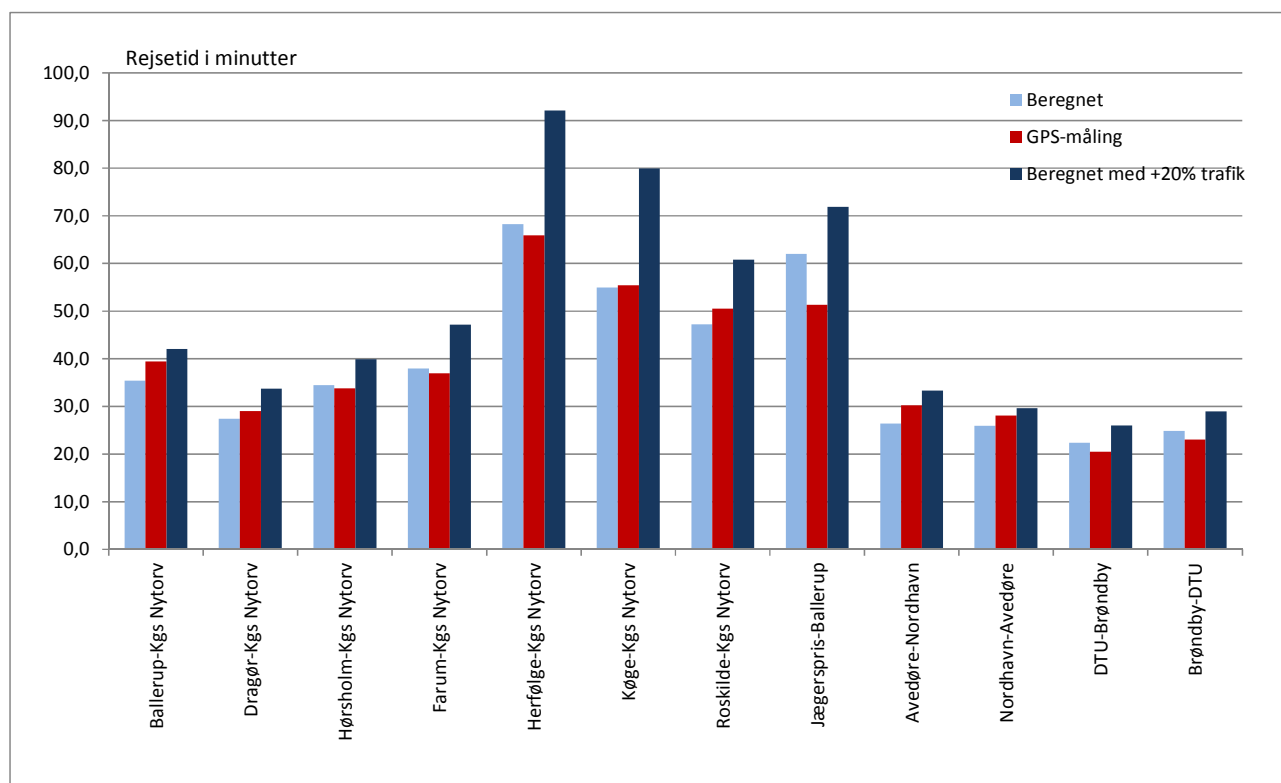
Der konstateres en fin overensstemmelse mellem målt og beregnet rejsetid, og en statistisk analyse bekræfter, at der ikke er nogen signifikant forskel mellem de to sæt af rejsetider.

Forskellen mellem beregning og måling skyldes ikke alene usikkerhed i beregning af rejsetid ved hjælp af kø-ventetidsfunktion og krydsmodel. Det skyldes også usikkerhed i modellens trafikstrømme, som ligger til grund for udlægning af trafikken i vejnettet.

Det er formodentlig således, at trafikken i tidsrummet kl. 7-8 generelt er størst tæt på kl. 8. En større trafik omkring kl. 8 vil ikke forsinke bilisterne tidligere i timen. En ujævn fordeling af trafikken i tidsrummet kl. 7-8 vil derfor kun i ringe grad påvirke kø-opstuvning og rejsetid. Det kan være en medforklaring på den gode overensstemmelse med målinger.

Der må forventes dårligere overensstemmelse for myldertid kl. 8-9, da trafik i begyndelsen af perioden kan være med til at opbygge kø senere i tidsrummet. Det kan i givet fald imødegås ved eksempelvis at underopdele tidsbåndet. Der er i kø-ventetidsfunktion for eftermiddagsmyldertid jf. afsnit 4 i højere grad taget hensyn til, at kø opbygges i den første del af myldertiden. Det kan muligvis fjerne behov for underopdeling af eftermiddagsmyldertid.

Figuren antyder ved opskrivning af trafikken med 20%, at vil der komme store forsinkelser på specielt Køgebugt Motorvejen og Frederikssundsvejen. Det falder således i god tråd med de igangværende udbygninger af motorvejsnettet omkring København.



Figur 6. Rejsetid kl. 7-8 mellem udvalgte relation i Hovedstadsområdet

## 7. Det videre arbejde

Der er i nærværende artikel beskrevet og testet en metode til bedre beregning af trængsel i vejnet. Metoden afspejler eksisterende flaskehalse og rejsetidsmålinger i Hovedstadsområdet. Det antyder, at forslaget kan tilføje de statiske rutevalgsmodeller forbedringer. Værktøjet, som er benyttet i test, er udviklet således, at det umiddelbart kan implementeres i LTM. Der anbefales dog et antal yderligere analyser og optimering af beregningstid og konvergens, før det implementeres i praksis. Desuden bør der foretages en nærmere vurdering og justering af krydsmodellerne, så de bedre afspejler forsinkelser over kapacitetsgrænsen.

## 8. Referencer

- Bliemer, M.C.J. (2004). INDY 2.0. – Model Specifications. Delft University of Technology
- Bundschuh, M., Vortich, P. og Van Vuren, T. (2006). Modelling queues in static traffic assignment. Association for European Transport and contributors.
- Chiu et .al (2010). A Primer for Dynamic Traffic Assignment. Transportation Network Modeling Committee, TRB
- Daganzo, C.F. og Sheffi, Y. (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. Transportation Science No. 11(3), pp. 253-274
- Mahut, M. (2000). Discrete flow model for dynamic network loading. Ph.D. Thesis, Universitet af Montreal. Udgivet af Cnter for research on Transportation (CRT), University of Montreal
- Snelder, M. (2009). A comparison Between Dynameq and Indy. CIRRELT-2009-48
- Szeto W.Y. og Wong, S.C. (2011). Dynamic traffic assignment: Model classifications and rev´cent advances in travel choice principles. Central European Journal of Engineering, side 1-18
- Wardrop J. (1952), Some theoretical aspects of road traffic research, ICE proceedings: Part II Engineering Division, 1, side 325-362