

# DET VEJREGELFORBEREDENDE ARBEJDE OM BEREGNING AF RUNDKØRSLERS KAPACITET

**Pierre Aagaard  
Carl Bro as**

## 1. Indledning

I Vejdirektoratet pågår der et vejregelforberedende arbejde, ved navn KAFKA, om kapacitets- og trafikafviklingsforhold i Danmark. En del af KAFKA-projektet består i at få revurderet de anbefalede metoder i danske vejregler om beregning af rundkørslers kapacitet. Denne revurdering har udmøntet sig i et udkast til, hvordan fremtidens danske vejregler om kapacitetsberegningen i rundkørsler kan se ud. Dette paper præsenterer og beskriver baggrunden for metoderne som foreslås i udkastet, og på hvilke områder det adskiller sig fra retningslinierne i de eksisterende vejregler.

Skemaerne nedenfor giver en oversigt over metoderne til beregningen af det enkelte tilfartsspors kapacitet i de eksisterende vejregler og udkastet til fremtidige vejregler. Med eksisterende vejregler menes primært "Byernes trafikarealer", Vejdirektoratet(1991), og sekundært "Vejreglerne for vejkryds i åbent land", Vejdirektoratet(1983). "x" i skemaet angiver, at det pågældende element anvendes i de eksisterende vejregler eller i udkastet.

	Eksisterende vejregler	Udkast	Se afsnit
<b>Beregning af tilfartssporets kapacitet <math>N_{Max}</math> i enheden <math>pe/T</math></b>			
Tidsgabformlen anvendes til beregningen af $N_{Max}$	x	x	<b>2</b>
Som inputvariable i tidsgabformlen anvendes:			
intensiteten i den cirkulerende motortrafik foran tilfartssporet i enheden $pe/time$	x	x	
intensiteten i den cirkulerende cykeltrafik foran tilfartssporet i enheden $pe/time$ . 1 cykel regnes som 1 $pe$ .	x	x	
intensiteten i den krydsende fodgængertrafik foran tilfartssporet i enheden $pe/time$ . 1 fodgænger regnes som 1 $pe$ .	x	-	<b>3</b>
kritisk interval $\tau$ og passagetid $\delta$ for situationen bil-bil og bil-let trafik	x	x	
Der er oplyst kritiske intervaller og passagetider for :			
1-sporede tilfarter i byrundkørsler	x	x	
1-sporede tilfarter i landrundkørsler.	-	x	
2-sporede tilfarter i by- og landrundkørsler.	-	x	

fortsættes..

	Eksisterende vejregler	Udkast	Se afsnit
<b>Korrektion af <math>N_{Max}</math></b>			
Beregnet $N_{Max}$ korrigeres for:			
risiko for blokering af tilfartssporet p.g.a kødannelser i cirkulationsarealet.	x	-	<b>4</b>
mængden af udkørende motortrafik (i enheden pe/T) i tilfartssporets hosliggende frafart.	-	x	<b>5</b>
mængden af krydsende fodgængere (enheden fodgængere /T) foran tilfartssporet.	-	x	<b>6</b>
<b>Beregning af middelforsinkelsen i tilfartssporet</b>			
middelforsinkelsen beregnes med en formel baseret på klassisk køteori.	x	-	<b>7</b>
middelforsinkelsen beregnes med en formel baseret på tidsafhængig køteori.	-	x	
middelforsinkelsen regnes i enheden sekunder /pe.	x	-	
middelforsinkelsen regnes i enheden sekunder /køretøj.	-	x	
<b>Beregning af kølængderne i tilfartssporet</b>			
kølængderne beregnes med en formel baseret på klassisk køteori (se Vejdirektoratet(1983)).	x	-	<b>7</b>
kølængderne beregnes med en formel baseret på tidsafhængig køteori.	-	x	
kølængderne regnes i enheden pe.	x	-	
kølængderne regnes i enheden køretøjer.	-	x	

## 2. Formel til beregning af kapaciteten i rundkørlens tilfartsspor

I de eksisterende vejregler Vejdirektoratet(1991) og i udkastet til fremtidige vejregler anbefales nedenstående tidsgabformel til beregning af kapaciteten i det enkelte spor i rundkørlens tilfart.

$$N_{Max} = \frac{(H_M + H_L) \cdot e^{- (H_M + H_L) \cdot t_{v\ddot{a}g\ddot{t}et} / T}}{1 - e^{- (H_M + H_L) \cdot d / T}} \quad (1)$$

- $N_{Max}$  = tilfartssporets kapacitet i enheden  $Pe/T$ .  
 $H_M$  = trafikintensiteten i den cirkulerende motortrafik i enheden  $Pe/T$  foran tilfartssporet.  
 $H_L$  = trafikintensiteten i den cirkulerende cykel trafik i enheden køretøjer/ $T$  foran tilfartssporet.  
 $t_{vægtet}$  = det kritiske interval i sekunder i tilfartssporet vægtes m.h.t. mængden af cirkulerende motortrafik og let trafik.  
 $d$  = passagetiden i sekunder mellem indkørende køretøjer fra tilfartssport.  
 $T$  = længden på beregningsperioden i sekunder. Beregningsperioden kan være spidsperioden, som f.eks. kan have en længde på en time (3600 sekunder) eller en halv time (1800 sekunder).

Formel (1) er baseret på den såkaldte tidsgabteori, hvor "tidsgab" henviser til tidsafstandene mellem cirkulerende køretøjer, som spærrer for trafikanters kørsel ud i rundkørslen. Tidsgabteorien går kort fortalt ud på matematisk at modellere den enkelte trafikants køreadfærd, for derefter at beregne tilfartssporets kapacitet "ved at summere" over alle trafikanternes køreadfærd i tilfartssporet.

Betragtes den udenlandske litteratur indses, at i lande som f.eks. England (Kimber & Hollis (1979)), Frankrig (Louah(1988)) og Tyskland (Brilon et. al (1993)) anvendes lineære formler, også kaldet empiriske formler, af typen nedenfor til beregning af tilfartssporets kapacitet i rundkørsler:

$$N_{Max} = A - b \cdot H_M \quad (2)$$

A og b er konstanter, og hvor  $b$  kan afhænge af tilfartssporets geometriske udformning (se f.eks. Kimber & Hollis(1979)).

Fordelen ved den empiriske formel er, at den rent beregningsteknisk er simplere at anvende end tidsgabsformlen (formel (1)). På trods af denne fordel er tidsgabformlen, som nævnt, fortsat anbefalet til kapacitetsberegningen i udkastet til fremtidige vejregler om beregning af rundkørslers kapacitet. Grunden til dette er bl.a, at der p.t. i Danmark er et for lille antal rundkørsler med høj trafikbelastning, som kan danne grundlaget for en empirisk kapacitetsformel for danske rundkørsler. Derudover er der den forskningsmæssige ulempe ved den empiriske formel, at denne formeltype ikke bidrager til en dybere forståelse af trafikanters køreadfærd i rundkørsler.

Selv om den empiriske formel er beregningsteknisk enklere at anvende, bør man afstå fra, at anvende empiriske formler fra andre lande til kapacitetsberegningen i danske rundkørsler. Dette skyldes, at kapaciteten er stærkt afhængig af køreadfærden i det enkelte land, og køreadfærden varierer typisk meget mellem landene. Køreadfærden er endvidere påvirket af landets design standard for rundkørsler. Således er f.eks. engelske og franske rundkørsler typiske udformet mere dynamisk end danske rundkørsler, og må bl.a derfor påregnes at have en større kapacitet end danske rundkørsler under de samme forhold m.h.t. trafik mængder, antal spor i tilfarterne og størrelse på ø-diameteren. Hvis man derfor anvender f.eks. en engelsk formel til beregningen af kapaciteten i en dansk rundkørsel, vil formelen højst sandsynligt overvurdere kapaciteten i rundkørslen.

### 3. Anbefalede kritiske intervaller og passagetider

Det kritiske interval og passagetiden er to parametre som beskriver trafikanternes køreadfærd og er derfor vigtige i kapacitetsberegning. I Vejdirektoratet(1991) anbefales kritiske intervaller og passagetider for byrundkørsler vist i nedenstående tabel.

	Tilfart	
	Bil-bil	Bil - let trafik
$\tau$ (sek)	3,5 - 4,0	2,5
$\delta$ (sek)	2,8	2,8

Tabel 1. Anbefalede kritiske intervaller og passagetider i Vejdirektoratet(1991)

Ved valg af bilers kritiske interval overfor biler anbefales i Vejdirektoratet(1991) at den største værdi anvendes, når den indkørende trafik fra tilfartssporet er lille i forhold til den cirkulerende trafik, når forsætningen er stor, og /eller når der er dårlig oversigt.

Tabellen nedenfor viser de anbefalede kritiske intervaller og passagetider i udkastet til de fremtidige vejregler om kapacitetsberegning af rundkørsler. De kritiske intervaller og passagetider i tabellen, anbefales anvendt til både by- og landrundkørsler, idet målinger i bl.a Aagaard(1991) har vist, at der umiddelbart ikke er nogen forskel på størrelsesordenen på kritiske intervaller og passagetider målt i henholdsvis by- og landrundkørsler.

	1-sporet tilfart		2-sporet tilfart
	Bil-bil	Bil - cykel	Bil - bil
$\tau$ (sek)	4,5	2,5	4,0
$\delta$ (sek)	2,8	2,8	2,6

Tabel 2. Anbefalede kritiske intervaller og passagetider i det vejregelforberedende udkast.

Forskellen mellem de nye og gamle anbefalinger ses bl.a. at være, at der i de nye anbefalinger for 1-sporede tilfarter kun anbefales 1 kritisk interval for situationen bil-bil i stedet for kritiske intervaller i et interval på 3,5 - 4,0 sek. Årsagen til denne ændring skyldes bl.a det forhold, at det i en undersøgelse af 4 rundkørsler i Aagaard(1995) ikke har været muligt at opnå entydige resultater, som understøtter anbefalingerne i Vejdirektoratet(1991) for, hvornår der bør vælges et lavt henholdsvis højt kritisk interval til kapacitetsberegningen.

Undersøgelsen i Aagaard(1995) er endvidere den eneste undersøgelse af danske rundkørsler, der er foretaget med henblik på at belyse sammenhængen mellem det kritiske intervals størrelse og rundkørselens trafikmængder og geometri. På baggrund heraf er det vurderet, at det kan være lige så rigtigt at anvende den simple fremgangsmåde med kun at anbefale 1 kritisk interval frem for at anbefale forskellige kritiske intervaller, som alligevel ikke kan garantere bedre estimater på den faktiske kapacitet i rundkørsler.

Med et anbefalet kritisk interval på 4,5 sekunder opnås, at der i de fleste tilfælde regnes på "den sikre side" når kapaciteten i rundkørselens tilfartsspor fastsættes. D.v.s, at kapacitetsberegningen udført efter anbefalingerne i udkastet vil have en tendens til at undervurdere tilfartssporets kapacitet.

Det anbefalede kritiske interval og passagetid for 2-sporede tilfarter anvendes for hvert af de to spor i den 2-sporede tilfart. Således vil kapacitetsberegningen af en 2-sporet tilfart bestå i at beregne det enkelte spors kapacitet med formel (1) med et kritisk interval på 4,0 sekunder og en passagetid på 2,6 sekunder.

#### 4. Sandsynligheden for blokering af tilfarten

I rundkørsler med lette trafikanter er der risiko for at tilfartsspor blokeres af kødannelser i rundkørselens cirkulationsareal. Kødannelserne opstår p.g.a, at køretøjer, som skal forlade rundkørslen, har vigepligt ved frafarten for cirkulerende cyklister og krydsende fodgængere. I Vejdirektoratet(1991) tages der højde for denne risiko, ved at reducere kapaciteten beregnet ved formel (1) med  $100 \times p\%$ .  $p$  er sandsynligheden for, at den aktuelle tilfart blokeres p.g.a kødannelser i cirkulationsarealet foran tilfartssporet.

I Aagaard(1995) blev det ved simulation anskueliggjort, at der skal meget store trafikmængder til førend kødannelserne i cirkulationsarealet har en mærkbar kapacitetseffekt. Dette er i overensstemmelse med gjorte observationer i danske rundkørsler. Derfor tages der i udkastet til nye vejregler ikke højde for denne problematik. Denne fremgangsmåde anses ikke at være problematisk; bl.a. fordi trafikmængderne i den nærmeste fremtid i danske rundkørsler med blandet trafik forventes at være af en størrelsesorden, som gør problemstillingen mere eller mindre uaktuel. Derudover, vil tendensen til at overvurdere kapaciteten, ved at se bort fra fodgængerens kapacitetseffekt, blive opvejet af den modsatrettede tendens til at undervurdere kapaciteten, som følge af at anvende et kritisk interval på 4,5 sekunder til kapacitetsberegningen.

### **5. Effekten fra udkørende køretøjer i den hosliggende frafart**

I Aagaard(1995) blev det i 1 rundkørsel med 1-sporede tilfarter vist, at den udkørende trafik i den hosliggende frafart muligvis havde en effekt på tilfartssporets kapacitet. En forklaring på denne effekt kan være, at nogle af de udkørende trafikanter ikke viser af inden de forlader rundkørslen. Dette bevirker, at trafikanter i den hosliggende tilfart afventer de udkørende bilers rutevalg inden de selv beslutter sig for at køre ud i rundkørslen. Denne afventende adfærd resulterer i en langsommere afvikling af køretøjerne og dermed den lavere kapacitet i tilfartssporet. De franske vejregler anvender

Det vides ikke på nuværende tidspunkt, hvorvidt om ovenstående er/var et særkende ved den undersøgte rundkørsel, eller om det er et forhold, der gælder generelt i danske rundkørsler. Derfor er der i udkastet givet mulighed for, at brugeren kan reducere 1-sporede tilfarters kapacitet, hvis brugeren mener, at de udkørende køretøjer i den hosliggende frafart vil have en kapacitetsreducerende effekt på tilfartssporet. I så tilfælde anbefales i udkastet, at reducere den beregnede kapacitet med 10%, hvis trafikintensiteten i den hosliggende frafart er på 400 køretøjer/time eller mere. Er trafikintensiteten under 400 køretøjer/time anbefales ikke at reducere den beregnede kapacitet.

Det skal understreges at fremgangsmåden ovenfor er meget grov og derfor ikke kan forventes altid at give et korrekt billede af den udkørende trafiks effekt på tilfartssporets kapacitet i alle 1-sporede tilfarter. Årsagen er bl.a, 1) at denne effekt nok i stor grad er bestemt af de lokale forhold og 2) at effekten kan tænkes at variere i takt med, at trafikanterne vender sig til kørsel i rundkørslen på lokaliteten.

### **6. Fodgængeres effekt på tilfartssporets kapacitet**

I byernes trafikarealer tages der højde for krydsende fodgængeres effekt på tilfartssporets kapacitet ved at lade fodgængerne indgå i den spærrende trafik  $H$  i tidsgabformlen. Samtidigt antages, at bilisters kritiske interval overfor fodgængere er det samme som bilisters kritiske interval overfor cirkulerende cyklister (d.v.s 2,5 sekunder). Denne fremgangsmåde formodes, at resultere i en ukorrekt beskrivelse af fodgængeres effekt på tilfartssporets kapacitet, men er blevet anvendt p.g.a en mangel på viden om fodgængeres kapacitetseffekt i danske rundkørsler (f.eks. eksisterer der ikke

danske målinger af bilers kritiske interval overfor fodgængere; de 2,5 sekunder anført i Vejdirektoratet(1991) er et taget fra Mathiasen(1990) som målte bilers kritiske interval overfor cykler! ).

I starten af 90'erne er der blevet foretaget analyser af fodgængeres effekt på kapaciteten i tyske rundkørsler (Brilon et al.(1993)). Resultatet af disse undersøgelser viser, at krydsende fodgængere reducerer tilfartssporets kapacitet med mellem 0 til ca. 20%. Størrelsen på reduktionen afhænger dels af antallet af krydsende fodgængere i perioden  $T$  og dels af antallet af cirkulerende motorkøretøjer foran tilfartssporet i samme periode. Relationen mellem krydsende fodgængere og cirkulerende motorkøretøjer foran tilfartssporet er, at fodgængernes effekt aftager med stigende cirkulerende motortrafik.

På trods af, at de tyske resultater er baseret på tysk køreadfærd, er det vurderet, at de tyske resultater vil give en bedre beskrivelse af fodgængeres effekt på kapaciteten i danske rundkørsler end den hidtidige fremgangsmåde i Vejdirektoratet(1991). Derfor anvendes de tyske resultater, når fodgængernes kapacitetseffekt skal fastsættes i udkastet til fremtidige vejregler om kapacitetsberegningen i rundkørsler.

## 7. Middelforsinkelsen og kølængderne i tilfartssporet

Formlerne til beregning af middelforsinkelsen i byernes trafikarealer er baseret på den såkaldte klassiske køteori. Det samme er tilfældet med formlen til beregning af kølængderne i tilfartsspor anført i "Vejreglerne for vejkryds i åbent land" (Vejdirektoratet(1983)).

Ulempen ved de to nævnte formler er, at de beregner urealistisk høje forsinkelser og kølængder, når afviklingen af trafikken enten foregår tæt på tilfartssporets kapacitet eller i situationer, hvor kapacitetsgrænsen er overskredet. Årsagen til dette er, at det i den klassiske køteori antages, at udgangssituationen - f.eks. spidstimen - i tilfartssporet er gældende i en uendelig lang tidsperiode. D.v.s, hvis et tilfartsspor er overbelastet med trafik i starten af spidstimen, antages i teorien bag formlerne, at denne situation også er gældende i tilfartssporet i uendeligt mange timer efter spidstimen.

I virkelighedens verden har spidsperioden en endelig varighed af f.eks. en time eller kortere. Derfor vil de faktiske middelforsinkelser og kølængder i tilfartsspor, med en trafikafvikling tæt på eller større end kapaciteten, typisk være mindre end de forsinkelser og kølængder som formlerne beregner.

Formler baseret på den såkaldte tidsafhængige køteori tager netop højde for længden  $T$  på spidsperioden, og disse formlers beregningsresultater er derfor mere realistiske. Derfor anvendes i udkastet formler baseret på tidsafhængig køteori til beregningen af middelforsinkelsen og kølængder i rundkørselens tilfartsspor. Dette er i tråd med udenlandske kapacitetsvejledninger af nyere dato som f.eks. Austroads(1993) og HCM(1995).

Formlerne baseret på tidsafhængig køteori (se formel 2 og formel 3) er betydeligt mere komplekse end de tilsvarende formler i Vejdirektoratet(1991) og i Vejdirektoratet(1983).

Middelforsinkelse: 
$$t = \frac{T}{N_{Max,Kt}} + \frac{T}{4} \cdot \left( (B-1) + \sqrt{(B-1)^2 + \frac{8 \cdot B}{N_{Max,Kt}}} \right) \quad (2)$$

$$\text{Kørlængde:} \quad B = \frac{2 \cdot n_{a\%}}{N_{Max,kt}} + \left( \frac{a}{100} \right)^{1/(n_{a\%}+1)} \quad (3)$$

$t$  = middelforsinkelsen i tilfartssporet i enheden sekunder/køretøj.

$T$  = længden i sekunder på den periode (f.eks. spidsperioden) i rundkørslen for hvilken kapacitetsberegningen foretages.

$B$  = tilfartssporets belastningsgrad, d.v.s forholdet mellem den indkørende trafikmængde fra tilfartssporet og tilfartssporets kapacitet i spidsperioden..

$N_{Max,kt}$  = tilfartssporets kapacitet i enheden køretøjer/ $T$ .  $N_{Max,kt}$  beregnes som  $N_{Max}$  of of er forholdet mellem den indkørende trafik fra tilfartssporet regnet i køretøjer henholdsvis i personbilenheder. Faktoren anvendes til at omregne tilfartssporets kapacitet fra enheden  $Pe/T$  til køretøjer/ $T$ .

$n_{a\%}$  = kørlængden der overskrides i  $a$  % af spidsperioden.

Udenlandske og hjemlige observationer indikerer, at venstre tilfartsspor (set ind mod rundkørslen) i 2-sporede tilfarer anvendes mindre af indkørende køretøjer end det højre tilfartsspor; også i situationer med mindre kødannelser i venstre end i højre tilfartsspor. For at tage højde for denne køreadfærd anbefales i udkastet, at den indkørende trafik i den 2-sporede tilfart fordeles med 2/3 på højre tilfartsspor og 1/3 på venstre tilfartsspor. Dette medfører, at den beregnede middelforsinkelse og de beregnede kørlængder bliver mindre i venstre tilfartsspor end middelforsinkelsen og kørlængderne i højre tilfartsspor. Brugeren har i udkastet mulighed for at anvende andre fordelinger af den indkørende trafik på de 2 tilfartsspor ved beregningen af middelforsinkelsen og kørlængderne i tilfartens 2 spor.

I udkastet er begge formler repræsenteret ved grafer og tabeller så brugeren i mange tilfælde undgår at skulle foretage udregninger ved en direkte anvendelse af formlerne. De simple formler i Vejdirektoratet(1991) og Vejdirektoratet(19982) kan dog i visse situationer stadig anvendes i stedet for de mere komplekse formler ovenfor. Dette er tilfældet i situationer, hvor belastningsgraden i tilfartssporet er af størrelsesordenen 0,7 eller mindre. I de situationer er der ikke markante forskelle på beregningsresultat mellem formlerne baseret på henholdsvis klassisk og tidsafhængig køteori.

I udkastet beregnes middelforsinkelsen i enheden køretøjer/sekund i stedet for  $pe/sek$  som hidtil anvendt i Vejdirektoratet(1991) og Vejdirektoratet(1983). Tilsvarende beregnes kørlængden i køretøjer i stedet for  $pe$ . I både den klassiske og tidsafhængige køteori forudsættes, at trafikmængderne indgår i enheden køretøjer, hvilket er årsagen til at denne enhed bruges i udkastet i stedet for  $pe$ .

Den praktiske betydning af at regne i køretøjer i stedet for  $pe$  afhænger meget af køretøjssammensætningen i den indkørende trafik fra tilfartssporet. Består al trafikken af personbiler er der ingen forskel på, om der regnes i køretøjer eller  $pe$ . Er der derimod en stor andel af tung trafik, med personbilækvivalenter større end 1, vil den beregnede middelforsinkelse være større og de kritiske kørlængder mindre, når der regnes i køretøjer i stedet for  $pe$ . Derfor bør middelforsinkelsen og kørlængderne regnes i enheden køretøjer.

## 8. Konsekvenserne af de nye retningslinier

Hvorvidt udkastets retningslinier for kapacitetsberegningen af rundkørsler med 1-sporede tilfarer resulterer i middelforsinkelser, som afviger væsentligt fra middelforsinkelser beregnet efter Vejdirektoratet(1991), afhænger meget af trafiksammensætningen og trafikmængderne i den aktuelle

rundkørsel. Den overordnede tendens er dog, at udkastets retningslinier vil resultere i beregnede middelforsinkelser, der er noget større end middelforsinkelser beregnet efter retningslinierne i Vejdirektoratet(1991). Således kan en beregnet middelforsinkelse, efter Vejdirektoratet(1991), på 13 sekunder/pe i et tilfartsspor blive til 25 sekunder/køretøj efter udkastets retningslinier. Denne markante forskel skyldes primært anvendelsen af et kritisk interval i de udkastets retningslinier på 4,5 sekunder, som er 0,5 sekunder større end det største anbefalede kritiske interval (4,0 sekunder) i Vejdirektoratet(1991).

Ovennævnte gælder kun for situationer, hvor trafikmængden i tilfartssporet ikke er tæt på eller over tilfartssporets kapacitet  $N_{Max}$ ; d.v.s i situationer hvor belastningsgraden i tilfartssporet er mindre end ca. 0,70 . Er trafikmængden i tilfartssporet tæt på men under tilfartssporets kapacitet  $N_{Max}$  beregnes middelforsinkelser med udkastets retningslinier som er betydeligt mindre end middelforsinkelser beregnet efter retningslinierne i Vejdirektoratet(1991). Er trafikmængden i tilfartssporet større end tilfartssporets kapacitet, er det kun udkastets retningslinier, som giver mulighed for at beregne middelforsinkelsen i tilfartssporet; idet retningslinierne i Vejdirektoratet(1991) ikke anvendes i denne situation.

## 9. Eksempel på kapacitetsberegning af en 2-sporet tilfart

I 2 cirkulationsspor foran en 2-sporet tilfart cirkulerer der i spidsperioden samlet 600 pe. Spidsperioden har en længde på en halv time, d.v.s, 1800 sekunder. Til beregningen af kapaciteten for det højre tilfartsspor (set ind mod rundkørslen) anvendes fra tabel 2 et kritisk interval på 4,0 sekunder og en passagetid på 2,6 sekunder. Det højre tilfartsspors kapacitet,  $N_{Max,H}$ , i spidsperioden - af en halv times varighed - beregnes således til:

$$N_{Max,H} = \frac{600e^{-4,0 \cdot 600/1800}}{1-e^{-2,6 \cdot 600/1800}} = 273pe/1800sek.$$

Det venstre tilfartsspors kapacitet i spidsperioden er identisk med  $N_{Max,H}$  , idet der 1) ikke er forskel på det kritiske interval og passagetiden, som anvendes til beregning af  $N_{Max,V}$ , henholdsvis  $N_{Max,H}$ . Og 2) der anvendes samme cirkulerende trafikstrøm (600 pe) som blokerende strøm i beregningen af  $N_{Max,V}$ , henholdsvis  $N_{Max,H}$  . Altså,  $N_{Max,V} = 273 pe/1800 sek.$

For at kunne beregne middelforsinkelsen i det enkelte af tilfartssporene, er det nødvendigt, at fordele den indkørende trafik fra den 2-sporede tilfart ud på de 2 tilfartsspor. I den betragtede spidsperiode er den samlede indkørende trafikmængde fra den 2-sporede tilfart på 405 køretøjer. De 405 køretøjer antages i denne beregning alle at være personbiler.

De 405 personbiler fordeles sig med 1/3 i venstre tilfartsspor og med 2/3 i højre tilfartsspor. Dette betyder, at belastningsgraden i venstre tilfartsspor over spidsperioden er  $135/273 = 0,49$  og  $270/273 = 0,99$  i højre tilfartsspor. Med disse belastningsgrader er det nu muligt at beregne middelforsinkelsen i hvert af sporene i den 2-sporede tilfart ved anvendelsen af formlen baseret på tidsafhængig køteori.

Middelforsinkelsen i højre tilfartsspor:

$$t_H = \frac{1800}{273} + \frac{1800}{4} \left( (0,99-1) + \sqrt{\frac{8,0,99}{273} + (0,99-1)^2} \right) = 78 \text{ sekunder/køretøj}$$

Middelforsinkelsen i venstre tilfartsspor:

$$t_V = \frac{1800}{273} + \frac{1800}{4} \left( (0,49-1) + \sqrt{\frac{8,0,49}{273} + (0,49-1)^2} \right) = 13 \text{ sekunder/køretøj}$$



Beregnes middelforsinkelserne med formlen i Vejdirektoratet(1991) vil resultatet blive følgende:

Middelforsinkelsen i højre tilfartsspor

$$t_H = \frac{1800}{273-270} = 600 \text{ sekunder/køretøj}$$

Middelforsinkelsen i venstre tilfartsspor

$$t_V = \frac{1800}{273-135} = 13 \text{ sekunder/køretøj}$$

Sammenlignes de beregnede middelforsinkelser i højre tilfartsspor ses, at middelforsinkelsen beregnet med formlen i Vejdirektoratet (1991) er betydeligt højere end middelforsinkelsen beregnet med formlen baseret på den tidsafhængige køteori. Den store forskel på de to middelforsinkelser skyldes, at formlen i Vejdirektoratet(1991) ikke tager højde for, at spidsperioden har end begrænset varighed, og beregner derfor en middelforsinkelse, som er for høj. Sammenlignes de beregnede middelforsinkelser i venstre tilfartsspor ses, at der ikke er forskel på de to middelforsinkelser. Dette skyldes, at ved lave belastningsgrader spiller spidsperiodens begrænsede varighed ikke nogen markant rolle i teorien bag de to formler til beregning af middelforsinkelsen. Der opnås derfor den samme middelforsinkelse uanset om formlen i Vejdirektoratet(1991) eller formlen baseret på tidsafhængig køteori anvendes til beregningen. Belastningsgraden i tilfartssporet skal være af størrelsesordenen 0,7 eller større, førend det tidsafhængige element i middelforsinkelsen slår markant igennem. D.v.s, at ved belastningsgrader større end eller lig med ca.0,7 bør formlen baseret på tidsafhængig køteori anvendes til beregning af middelforsinkelsen.

## 10. Sammenfatning

Det vejregelforberedende arbejdes udkast til fremtidige vejregler om kapacitetsberegningen af rundkørsler indeholder en del nye elementer set i forhold til "Byernes trafikarealer" (Vejdirektoratet(1991)) og "Vejregler for vejkryds i åbent land" (Vejdirektoratet(1983)). Nogle af beregningsgangene i udkastet er gjort mere simple mens andre er blevet mere komplicerede. Et væsentligt eksempel på det sidste, er de teoretiske formler til beregning af middelforsinkelser og kølængder. Formlerne er i udkastet blevet forbedret, så de giver en mere realistisk beskrivelse af trafikforholdene i tilfartssporet i spidsperioden. Formlerne er i samme åndedræt blevet mere komplicerede, hvilket delvist afhjælpes med grafer og tabeller i udkastet.

Forsimplingen i udkastet ligger primært i, at intervallet af anbefalede kritiske intervaller i Vejdirektoratet(1991) er reduceret til kun 1 anbefalet kritisk interval, nemlig 4,5 sekunder. Denne anbefaling har udgangspunkt i, at danske undersøgelser ikke entydigt har kunnet understøtte vejledningen i Vejdirektoratet(1991) for, hvornår der bør vælges et lille henholdsvis stort kritisk interval til kapacitetsberegningerne. Derfor blev det vurderet lige så korrekt, kun at anbefale 1 kritisk interval til beregningerne.

Anvendelsen af kun 1 kritisk interval på 4,5 sekunder til kapacitetsberegningen vil medføre en tendens til, at tilfartsspors kapacitet undervurderes i beregningerne. D.v.s, at der i praksis kan forekomme markante afvigelser mellem de beregnede og faktiske kapaciteter i rundkørslers tilfartsspor. Beregningsresultaterne efter de nye retningslinier vil derfor typisk ikke udtrykke det sande billede af kapacitetsforholdene i rundkørsler, men kun et billede, som viser størrelsesordenen

af middelforsinkelser og kølængder i rundkørsler. I et forsøg på at tilpasse beregningsresultaterne til de faktiske kapacitetsforhold har brugeren i udkastet dog mulighed for selv at leverer kritiske intervaller og passagetider til beregningerne, som brugeren formoder bedre passer til de lokale forhold.

På nuværende tidspunkt anses usikkerhederne i udkastets beregningsresultater som værende mindre kritiske for den praktiske kapacitetsvurdering. Dette skyldes, at trafikbelastningen i hovedparten af danske rundkørsler i dag er på et niveau, som ikke giver anledning til større kapacitetsproblemer. Det er dog klart, at i takt med at rundkørsler i Danmark overvejes anvendt i knudepunkter med større og større trafikmængder, vil der opstå et behov for en bedre kvalitet i vejreglernes anbefalinger om kapacitetsberegning af rundkørsler.

## REFERENCER

Aagaard P.E., 1995

“Metoder til valg af reguleringsform for vejkryds”, Ph.D-afhandling, ATV, Carl Bro Anlæg, Vejdirektoratet og IVTB, DTU, 1995.

Aagaard P.E., 1991

‘Måling af kapacitetsparametrene  $\tau$  og  $\delta$  i rundkørsler’, notat 1991-6, Institut for Veje, Trafik og Byplan, Danmarks Tekniske Højskole, 1991.

Austroroads, 1993

‘Roundabouts; A guide to Traffic Engineering Practice’, Austroroads, Australia, 1993.

Brilon et al, 1993

“Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Strassen, Entwurf eines Handbuchs, Teil B”, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum.

Hagring 1996.

‘Roundabout Entry Capacity’, Institutionen för trafikteknik, Lunds Tekniske Højskole.

HCM, 1995

‘Highway Capacity Manual’, Special Report 209, third edition, TRB, 1995

Kimber R.M. & Hollis E, 1979

‘Traffic queues and delays at road junctions’, Transport Research and Road Research Laboratory, Laboratory Report 909, 1979

Louah G., 1988

‘Recent French Studies on Capacity and Waiting Time at Unsignalised Rural Intersections’, i Intersections without Traffic Signals (Ed Brilon W.), Springer-Verlag, 1988, 248-262.

Mathiasen P.B, 1990

‘Rundkørsler under byforhold’, Eksamensprojekt fra Institut for Veje, Trafik og Byplan, Danmarks Tekniske Højskole, 1990.

Vejdirektoratet, 1983.

‘Vejregler for vejkryds i åbent land’, Vejregeludvalget, Vejdirektoratet, 1983.

Vejdirektoratet, 1991.

‘Byernes trafikarealer - Forudsætninger for den geometriske udformning’, hæfte 1, Vejregeludvalget, Vejdirektoratet, 1991.