



# LUND UNIVERSITY

## Framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler : en litteraturöversikt

Hagring, Ola

2000

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Hagring, O. (2000). *Framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler : en litteraturöversikt*. (Bulletin 190 / 3000; Vol. Bulletin 190). Lunds universitet, institutionen för teknik och samhälle, trafik och väg.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00



# Framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler

## En litteraturöversikt



Ola Hagring  
2000

## Ola Hagring

### Framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler – en litteraturöversikt

#### **Ämnesord:**

Framkomlighet, kapacitet, fördröjning, stopplikt, väjningsplikt, fyrvägsstopp, cirkulationsplatser.

#### **Referat:**

LTH har, tillsammans med KTH och VTI, med Vägverket och Kommunikationsforskningsberedningen som finansiärer, i uppdrag att utveckla nya modeller för effektberäkning av vägtrafikanläggningar. Som en del i detta arbete görs en inventering av kunskapsläge och kunskapsbrister. Redovisningen av detta avseende framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler görs i denna rapport. Ca 200 referenser har studerats och analyserats. På basis av detta och den svenska kapacitetsmodellen har kunskapsbrister identifierats och beskrivits. Dessa avses ligga till grund för fortsatt arbete.

### Accessibility in intersections without traffic signals – a literature survey.

#### **Keywords:**

Accessibility, Capacity, Delay, Two-Way Stop Control, Four-Way Stop Control, Roundabouts.

#### **Abstract:**

LTH has, together with KTH and VTI, a research project with the purpose of developing new performance models for road traffic facilities. The project is financed by Vägverket och Kommunikationsforskningsberedningen. A first step in this project is to make literature surveys. The result of such a survey, concerning accessibility in intersections without traffic signals is presented in this report. About 200 references have been studied and analysed. On the basis of this, work identification of areas with substantial lack of knowledge has been carried out.

#### **Citeringsanvisning:**

Hagring, Ola. Framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler – en litteraturöversikt. Lund, Institutionen för Teknik och samhälle, Trafikteknik, 2000. Bulletin - Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Teknik och samhälle, Lunds Universitet, 190.

#### **Med stöd från:**

KFB Dnr 1998-0559



Institutionen för Teknik och samhälle  
Lunds Tekniska Högskola  
Avdelning Trafikplanering  
Box 118, 221 00 LUND, Sverige

Department of Technology and Society  
Lund Institute of Technology  
Traffic Planning  
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

## Förord

Denna rapport ***Framkomlighet i korsningar utan trafiksinaler – en litteraturöversikt*** – har skrivits inom ramen för projektet ***Effektmodeller för vägtrafikanläggningar***. Detta projekt finansieras av Vägverket och Kommunikationsforskningsberedningen och har som syfte att utveckla nya effektmodeller för vägtrafikanläggningar. Projekt utförs av avdelningen för Trafikteknik vid Lunds Tekniska Högskola, avdelningen för Trafik och transportplanering vid Kungliga Tekniska Högskolan samt Väg- och transportforskningsinstitutet.

Ett tack till professor Karl Bång, KTH, för värdefulla synpunkter på rapporten och till Torsten Bergh, Vägverket, för värdefulla kontakter och tips på litteratur. Jag vill också tacka Birgitta Åkerud, bibliotekarie vid institutionen för Teknik och Samhälle, LTH, och hennes kolleger vid VTIs bibliotek för hjälp med såväl sökning som anskaffning av litteratur.

Lund oktober 2000

Ola Hagring

# Innehållsförteckning

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Sammanfattning.....</b>                               | <b>i</b>  |
| Inledning.....                                           | i         |
| Korsningar med stopp- eller väjningsplikt.....           | i         |
| Korsningar med fyrvägsstopp.....                         | ii        |
| Korsningar med högerregel.....                           | ii        |
| Cirkulationsplatser.....                                 | ii        |
| Framkomlighetsmått .....                                 | iv        |
| Slutsatser .....                                         | v         |
| <b>1. Inledning .....</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Bakgrund och syfte .....                             | 1         |
| 1.2 Metod .....                                          | 1         |
| 1.3 Avgränsningar.....                                   | 3         |
| <b>2. Modellbeskrivningar.....</b>                       | <b>5</b>  |
| 2.1 Inledning.....                                       | 5         |
| 2.2 Mikromodeller .....                                  | 5         |
| 2.3 Bestämning av tidsavstånd på överordnad led .....    | 6         |
| 2.3.1 Definitioner och mätning .....                     | 7         |
| 2.3.2 Tidsavståndsfördelningar .....                     | 7         |
| 2.3.3 Anpassning av tidsavståndsfördelningar .....       | 9         |
| 2.4 Skattning av kritiska tidsavstånd .....              | 11        |
| 2.5 Skattning av följdtider .....                        | 15        |
| 2.6 Beräkning av kapacitet och betjäningstider .....     | 15        |
| 2.7 Makromodeller.....                                   | 18        |
| <b>3. Korsningar med stopp- eller väjningsplikt.....</b> | <b>21</b> |
| 3.1 Inledning.....                                       | 21        |
| 3.2 Beräkningsmetoder baserade på mikromodeller .....    | 21        |
| 3.2.1 Sverige .....                                      | 21        |
| 3.2.2 Övriga nordiska länder .....                       | 24        |
| 3.2.3 Tyskland.....                                      | 24        |
| 3.2.5 USA .....                                          | 26        |
| 3.2.5 Australien .....                                   | 28        |
| 3.2.6 Polen .....                                        | 28        |
| 3.3 Övriga mikromodeller .....                           | 29        |
| 3.4 Makromodeller.....                                   | 34        |
| 3.4.1 England.....                                       | 34        |
| 3.4.2 Övriga .....                                       | 34        |
| 3.5 Modelljämförelser.....                               | 35        |
| 3.5.1 Jämförande studier .....                           | 35        |
| 3.5.2 Modelljämförelser.....                             | 35        |
| <b>4. Korsningar med fyrvägsstopp.....</b>               | <b>37</b> |
| <b>5. Korsningar med högerregel.....</b>                 | <b>39</b> |
| <b>6 Cirkulationsplatser .....</b>                       | <b>41</b> |
| 6.1 Inledning.....                                       | 41        |
| 6.2 Beräkningsmetoder baserade på mikromodeller .....    | 41        |
| 6.2.1 Sverige .....                                      | 41        |
| 6.2.2 Ny svensk modell .....                             | 42        |

|            |                                                                      |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2.3      | Australien .....                                                     | 44        |
| 6.2.4      | USA .....                                                            | 45        |
| 6.3        | Övriga mikromodeller .....                                           | 45        |
| 6.4        | Makromodeller .....                                                  | 47        |
| 6.4.1      | England .....                                                        | 47        |
| 6.4.2      | Tyskland .....                                                       | 48        |
| 6.4.3      | Frankrike .....                                                      | 49        |
| 6.4.4      | Schweiz .....                                                        | 49        |
| 6.4.5      | Nederländerna .....                                                  | 50        |
| 6.4.6      | Jordanien .....                                                      | 50        |
| 6.4.7      | Israel .....                                                         | 50        |
| 6.4.8      | USA .....                                                            | 50        |
| 6.5        | Modelljämförelser .....                                              | 50        |
| <b>7</b>   | <b>Modelljämförelser .....</b>                                       | <b>55</b> |
| 7.1        | Jämförande studier .....                                             | 55        |
| 7.2        | Mikro- eller makromodell? .....                                      | 55        |
| <b>8.</b>  | <b>Framkomlighetsmått .....</b>                                      | <b>59</b> |
| 8.1        | Inledning och definitioner .....                                     | 59        |
| 8.2        | Korsningen som ett kösystem .....                                    | 60        |
| 8.2.1      | Inledning .....                                                      | 60        |
| 8.2.2      | Olika ansatser .....                                                 | 61        |
| 8.3        | Beräkning av effektmått .....                                        | 62        |
| 8.3.1      | Väntetid och kölängd .....                                           | 62        |
| 8.3.2      | Andel fördröjda .....                                                | 64        |
| 8.3.3      | Geometrisk fördröjning .....                                         | 64        |
| 8.4        | Sammanfattning .....                                                 | 64        |
| <b>9.</b>  | <b>Simulering .....</b>                                              | <b>65</b> |
| <b>10.</b> | <b>Sammanställning av kunskapsbrister .....</b>                      | <b>67</b> |
| 10.1       | Korsningar med stopp- eller väjningsplikt .....                      | 67        |
| 10.2       | Korsningar med fyrvägsstopp .....                                    | 68        |
| 10.3       | Korsningar med högerregel .....                                      | 68        |
| 10.4       | Cirkulationsplatser .....                                            | 68        |
| 10.5       | Sammanfattning .....                                                 | 68        |
| <b>11.</b> | <b>Sammanfattning och rekommendationer för fortsatt arbete .....</b> | <b>69</b> |
|            | <b>Referenser .....</b>                                              | <b>71</b> |

# Sammanfattning

## Inledning

Vid samhällsekonomiska kalkyler är restidskostnaden en av de största posterna. Det är därför av stor vikt att restiden i ett väg- eller gatunät kan beräknas med god noggrannhet då kalkylerna i annat fall kan ge en felaktig skattning av ett vägprojekts kostnader. Också i andra sammanhang är det viktigt att kunna beräkna restiden, t.ex. vid val av korsningstyp i tätorter. De beräkningsmetoder som användes idag är 20 till 25 år gamla vilket reser frågan om hur pass tillförlitliga de är och vilka möjligheter det finns att utveckla nya och bättre modeller. Inom projektet Effektmodeller för vägtrafikanläggningar (EMV) utgör besvarandet av denna fråga en viktig uppgift. Som ett första led i detta har en förnyad litteraturinventering gjorts. En sådan inventering kan inte i sig själv utgöra grunden för en tillförlitlighetsbedömning – för detta krävs också någon form av kontroll mot faktiska förhållanden – men kan ge en underlag för en bedömning av hur väl de bakomliggande teorierna i de existerande modellerna stämmer med de forskningsresultat som finns idag. Ett annat syfte är att ge allmän kunskapsöverblick som underlag för en sammanställning av kunskapsbrister.

I denna rapport behandlas korsningar utan signalreglering. Tonvikten ligger på analytiska modeller, dvs. modeller med samband som kan uttryckas på slutna form.

Litteratur som behandlar detta har eftersökts i tidskrifter och forskningspublikationer som behandlar trafikflödesteori, olika konferensserier, nationella kapacitetsmanualer och olika nationella och internationella databaser

Vid framkomlighetsberäkningar kan ofta kapaciteten eller betjäningstiden (som under vissa förutsättningar exakt motsvaras av det inverterade värdet av kapaciteten) ses som en nyckelvariabel. Beräkningen fram till och med dessa nyckelvariabler kan ske på många olika sätt och med varierande grad av hänsyn till olika faktorer medan beräkningen av övriga framkomlighetsmått är mer likartad eftersom den oftast bygger på köteori. Beräkning av framkomlighetsmått behandlas därför i endast ett kapitel och oberoende av regleringsform. En utförligare rapport om framkomlighetsmått, särskilt fördröjning, kommer att utges separat.

I rapporten görs en förhållandevis noggrann genomgång av de två modelltyper som står till buds för analytiska kapacitetsberäkningsmetoder – mikro- respektive makromodeller.

## Korsningar med stopp- eller väjningsplikt

Den svenska metoden för beräkning av framkomlighet i korsningar med stopp- eller väjningsplikt bygger på ett arbete av Hansson (1975). Den första versionen av beräkningsmodellen är beskriven bl.a. av VBB (1975), Vägverket (1977) och Hansson (1980). Den nuvarande beräkningsmetoden, se Vägverket (1995a) och Hagring (1997b) är i stort sett densamma som beskrivs i dessa båda referenser. Beräkningarna i denna metod görs i följande steg:

- Bestämning av överordnat flöde
- Beräkning av kritiska tidsavstånd och följdtider
- Beräkning av betjäningstid
- Fördelning av trafikflöden på deltillfarter
- Korrigering av betjäningstider med avseende på korta körfält med flera faktorer.

Vid genomgången av beräkningsmetoden konstaterades följande oklarheter i modellen:

- pbe-värden för oskyddade trafikanter
- passage av korsning i två steg
- några mättnadsflödeskorrektioner
- antaganden om tidsavståndsfördelningar
- användande av bred vägren vid högersväng till överordnad led
- pbe-värden för olika fordonstyper

Utöver dessa oklarheter kan konstateras att mätningarna av bland annat de kritiska tidsavstånden är gjorda på 70-talet och att nya mätningar antagligen är behövliga. Huruvida de kritiska tidsavstånden ändrat sig eller ej kan inte avgöras utan nya mätningar. Särskilt intressant är att få en uppfattning om det finns något samband mellan de kritiska tidsavstånden, följdtiden och flödets storlek eller fördröjningen.

Under de senaste 20 åren har det bedrivits intensiv forskning inom detta område. Bland annat har uppdateringen av HCM inneburit stora forskningsinsatser. Insatserna har varit av såväl teoretisk som empirisk natur.

Vad gäller teoriutvecklingen har några problem fått en tillfredsställande lösning. Bland annat gäller detta passage av korsning i två steg, hantering av sekundärkonflikter samt korta körfält. Dessa modeller bör kunna användas i en ny svensk kapacitetsmanual.

Mätningar av kritiska tidsavstånd har gjorts på flera håll, bland annat i Tyskland och USA. Vid analysen av dessa har använts skattningsmetoder som är överlägsna de som användes vid analyserna av de svenska mätningarna.

Mikromodellerna är vanligare än makromodellerna. En orsak till detta kan vara svårigheten att mäta in makromodeller i fyrvägs-korsningar. I England, där makromodellen huvudsakligen används, förekommer ej nybyggnad av fyrvägs-korsningar.

## Korsningar med fyrvägsstopp

Korsningar med fyrvägsstopp är ovanliga i Sverige. De är desto vanligare i USA och därifrån stammar också tillgängliga beräkningsmodeller.

## Korsningar med högerregel

Korsningar med högerregel förekommer i allmänhet endast på lokalgator med låga trafikflöden varför såväl kapacitets- som fördröjningsberäkningar blir mindre intressanta. Vägverket (1977) anger två möjliga beräkningsmetoder. Den ena är en mikromodell som baseras på metoden för korsningar med stopp- eller väjningsplikt (enligt anvisningarna är den identisk förutom att alla tillfarter behandlas som underordnade), den andra en makromodell som ger kapaciteten för alla ingående flöden som en funktion av kvoten mellan flödena på de två korsande gatorna samt andelen vänstersvängande.

## Cirkulationsplatser

Den svenska metoden för beräkning av framkomlighet i cirkulationsplatser saknar i allmänhet referens till fältmätningar. Den första versionen av beräkningsmetoden är beskriven bl.a. av VBB (1975), Vägverket (1977) och Hansson (1980). Den nuvarande beräkningsmetoden, se Vägverket (1995b) och Hagring (1997b) är i stort sett densamma som beskrivs i dessa båda referenser

Beräkningarna görs i följande steg, dvs. i princip som för korsningar med stopp- eller väjningsplikt:

- Bestämning av överordnat flöde
- Beräkning av kritiska tidsavstånd och följdtider
- Beräkning av betjäningstid
- Fördelning av trafikflöden på deltillfarter
- Korrigering av betjäningstider med avseende på korta körfält med flera faktorer.

Bestämningen av det överordnade flödet avviker från alla andra cirkulationsplatsmodeller genom att det överordnade flödet viktas beroende på ursprung och destination samt på vilken underordnad trafikström som avses. Sammantaget innebär detta att det cirkulerande flödet blir mindre än det beräknade överordnade flödet.

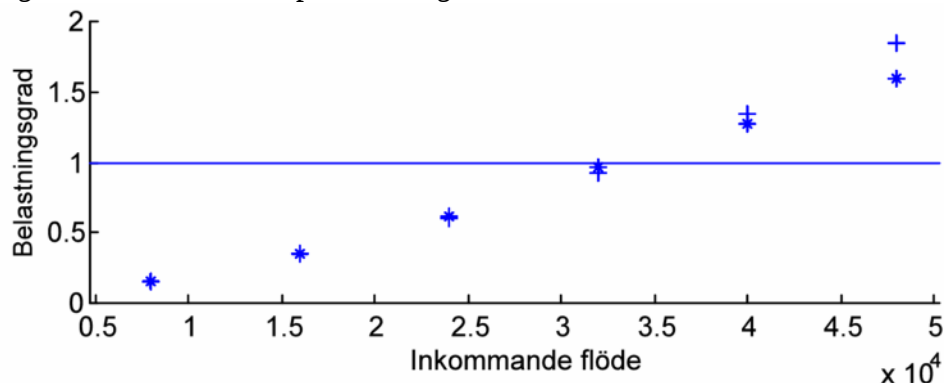
Det kritiska tidsavståndet beror av växlingssträckans längd och bredd så att det ökar med längden och minskar med bredden. Sambandet, som är olika för högersvängande fordon och övriga fordon, är utan källhänvisning.

Beräkningarna i övrigt skiljer sig inte från korsningar med stopp- eller väjningsplikt. En viktig restriktion är att växlingssträckans längd inte får vara mindre än 20 meter. Detta motsvarar en diameter på ca 30 meter.

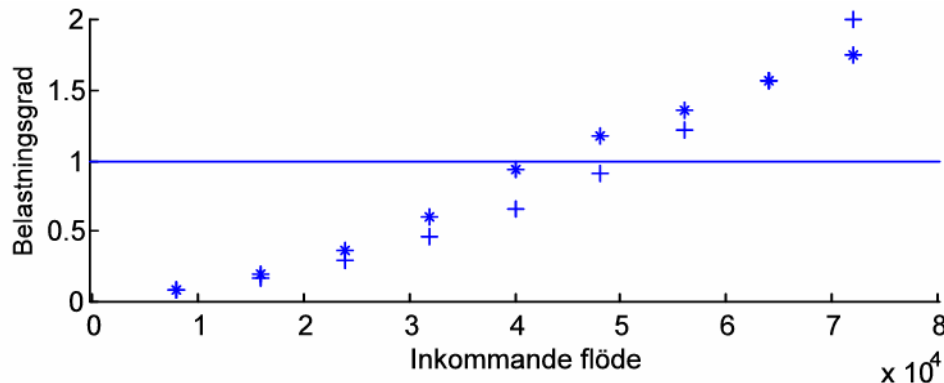
Hagring (1996a, 1998b) har genomfört fältmätningar av cirkulationsplatser i Sverige. Mätningarna har omfattat ca 12 cirkulationsplatser i tätorts- och förortsmiljö. Resultaten från dessa mätningar kan sammanfattas så här:

- Det kritiska tidsavståndet är olika för det högra och det vänstra körfältet i en tvåfältig tillfart. Skillnaden är ca 0.6 s. Dessutom är det kritiska tidsavståndet beroende av växlingssträckans längd och bredd, dvs. samma variabler som i CAPCAL även om sambandet här är helt linjärt.
- Tunga fordon har ca 1.1 s längre kritiskt tidsavstånd än personbilar.
- Hela det cirkulerande flödet kan betraktas som överordnat.

Resultaten kan användas till en beräkningsmodell för cirkulationsplatser. Vid jämförelse med den gällande beräkningsmodellen ger den nya modellen lägre kapacitet för tvåfältiga cirkulationsplatser och ungefär samma kapacitet för enfältiga cirkulationsplatser, se figur S1 och S2. Kapaciteten för en enfältig cirkulationsplats är ca 32 000 fordon/dygn vid lika belastning på alla ben. Vid verkliga förhållanden blir kapaciteten lägre.



**Figur S.1 Belastningsgrad för enfältig cirkulationsplats. \*: ny svensk modell, +:CAPCAL. Inkommande flöde i fordon/dygn.**



**Figur S.2 Belastningsgrad för tvåfältig cirkulationsplats. \*: ny svensk modell, +:CAPCAL. Inkommande flöde i fordon/dygn.**

Den mest utvecklade cirkulationsplatsmodellen återfinns i Australien där forskning och utveckling bedrivits av Troutbeck (1988, 1991) och Akçelik (1992). Kritiska tidsavstånd har dessutom mätts bland annat i Danmark och Finland. Överlag stämmer resultaten av dessa mätningar väl med de svenska.

Den första makromodellen utvecklades av Philbrick (1977). Denna gällde för äldre cirkulationsplatser, dvs. byggda då fordon som var på väg in i cirkulationsplatsen hade företräde (övergången till nu gällande reglering skedde 1966). Därefter utvecklades separata modeller för nyare cirkulationsplatser. Slutligen utvecklade Kimber (1980) en modell som kunde hantera cirkulationsplatser av såväl äldre som nyare typ. Denna modell var baserad på ett omfattande fältmaterial.

Därefter har makromodellen snabbt vunnit terräng. Orsaken till detta är att den är förhållandevis lätt att mäta in och att den inte ger upphov till några besvärliga matematiska problem. Den ger dessutom oftast statistiskt säkra samband mellan kapacitet och olika oberoende variabler. Sambanden mellan kritiska tidsavstånd olika oberoende variabler är oftast inte lika säkra.

## Framkomlighetsmått

Det viktigaste framkomlighetsmålet, och det som utgör underlag för samhällsekonomiska värderingar, är fördröjning. Fördröjning definieras som den mertid det tar att passera korsningen jämfört med att denna ej funnits. Då beräkning av fördröjning är förhållandevis komplicerad görs endast en översiktlig beskrivning och litteraturinventering. Det konstateras dock att man i allmänhet utgår från ett enkelt och idealiserat kösystem för att beräkna fördröjningen i en korsning. Avvikelserna mellan detta ideala system och de verkliga förhållandena är flera:

- Varken ankomster eller betjäningstider är normalt exponentialfördelade, åtminstone inte när trafikflödena är stora.
- Förutsättningen att den genomsnittliga betjäningstiden är kortare än det genomsnittliga tidsavståndet mellan successiva ankomster, dvs. att flödet är lägre än kapaciteten, är inte alltid uppfyllt.
- Ett vägtrafiksystem är inte tidskonstant (stationärt), trafikflödena ökar eller minskar mer eller mindre regelbundet.
- I korsningar med stopp- respektive väjningsplikt innebär företrädesreglerna att det enkla M/M/1-systemet ger en dålig beskrivning av vad som faktiskt sker. I själva verket är kösystemet sammansatt av flera köer vara några har förtur framför andra.

- Förekomsten av körfält med begränsad magasinslängd innebär att vissa betjäningsstationer kan vara blockerade under vissa perioder.

De två sista punkterna behandlas normalt inom ramen för kapacitetsberäkningen. Den tredje punkten kan delvis behandlas på detta vis men får också direkta implikationer på fördröjningen. Punkt två löses i allmänhet genom att korsningen betraktas som ett konstant överbelastat system. En sammanvägning av det enkla kösystemet utan överbelastning och det konstant överbelastade systemet ger ett sätt att beräkna fördröjning också då förutsättningen i punkt två ej är uppfylld.

I flera länder används begreppet servicenivå, som är en klassindelning av framkomlighet i korsningar, i huvudsak baserad på fördröjningen.

## Slutsatser

En möjlig fortsättning på detta arbete skulle kunna vara att ställa upp teoretiska modeller på mikronivå och i dessa inkludera de teoretiska landvinningar som gjorts under senare tid. Utifrån denna kan sedan behovet av fältmätningar och ytterligare teoriutveckling bedömas.

Ytterligare en ansats, som inte utesluter någon av de övriga, är att särskilt granska de modeller som finns för beräkning av olika effektmått. Som påpekats i kapitel 8 är dessa modeller ofta komplicerade och kräver en djupgående analys.

En viktig del i det fortsatta arbetet är modellvalidering. Särskilt gäller detta för fördröjning, som är det viktigaste framkomlighetsmåttet.

# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund och syfte

Vid samhällsekonomiska kalkyler är restidskostnaden en av de största posterna. Det är därför av stor vikt att restiden i ett väg- eller gatunät kan beräknas med god noggrannhet då kalkylerna i annat fall kan ge en felaktig skattning av ett vägprojekts kostnader. Också i andra sammanhang är det viktigt att kunna beräkna restiden, t.ex. vid val av korsningstyp i tätorter.

Vägverket noterade behovet av noggranna beräkningsmetoder under 70-talet då en kapacitetsutredning genomfördes. Denna resulterade bland annat i en litteraturstudie (Vägverket 1973) och en handbok för kapacitetsberäkningar (Vägverket 1977). Bakgrund och syfte till kapacitetsutredningen är given av Peterson (1978, 1980). Beräkningsmodellen för oreglerade korsningar är utvecklad av Hansson (1978, 1980).

Baserad på beräkningsmodellen utvecklades ett datorprogram för framkomlighetsberäkning i korsningar – CAPCAL (Hansson 1980). 1986 påbörjades en revidering av beräkningsmodellerna, med syfte dels att överföra CAPCAL till persondatormiljö, dels att uppdatera beräkningsmodellerna – en hel del forskningsresultat hade avsatts sedan den föregående litteraturinventeringen. Den litteraturstudie som gjordes kom aldrig att publiceras medan däremot beräkningsmetoderna (Vägverket 1995a, 1995b) och en reviderad version av datorprogrammet gavs ut. I allt väsentligt byggde dock beräkningsmetoderna på de tidigare använda metoderna.

Beräkningsmetoderna är således 20 till 25 år gamla vilket reser frågan om hur pass tillförlitliga de är och vilka möjligheter det finns att utveckla nya och bättre modeller. Inom projektet Effektm modeller för vägtrafikanläggningar (EMV) utgör besvarandet av denna fråga en viktig uppgift. Som ett första led i detta har en förnyad litteraturinventering gjorts. En sådan inventering kan inte i sig själv utgöra grunden för en tillförlitlighetsbedömning – för detta krävs också någon form av kontroll mot faktiska förhållanden – men kan ge en underlag för en bedömning av hur väl de bakomliggande teorierna i de existerande modellerna stämmer med de forskningsresultat som finns idag. Ett annat syfte är att ge allmän kunskapsöverblick som underlag för en sammanställning av kunskapsbrister.

I denna rapport behandlas korsningar utan signalreglering. Tonvikten ligger på analytiska modeller, dvs. modeller med samband som kan uttryckas på slutna form.

## 1.2 Metod

Litteratur om framkomlighet i ej signalreglerade korsningar har eftersökts på några olika sätt. Bland annat har följande källor använts:

- Tidskrifter som behandlar trafikflödesteori. I första hand har Transportation Research, Transportation Science, Journal of Transportation Engineering och Traffic Engineering & Control genomsköts. Det finns fler tidskrifter än dessa som kan vara av intresse men andelen artiklar av passande slag är låg och det har bedömts vara enklare att söka dessa genom olika databaser (se nedan).
- Transportation Research Records, utgiven av Transportation Research Board, USA.
- Olika konferensserier. Särskilt har serierna Intersections without Traffic Signals, International Symposium on Highway Capacity och International Symposium on Traffic and Transportation Theories granskats.

- Nationella kapacitetsmanualer.
- Litteratursökning i olika nationella och internationella databaser.

Utöver detta har några metasökningar – dvs. sökning i tidigare sökningar – gjorts. Bland annat har då den ovan refererade litteraturinventering som gjordes i slutet av 80-talet inför revideringen av beräkningsmodellerna och de inventeringar som gjorts av Hagring (1992, 1996a, 1998b) använts, liksom den inventering som gjordes vid utvecklingen av en ny kapacitetsmanual för Indonesien (SweRoad 1991).

En litteraturinventering kan sammanställas på flera olika sätt. Man kan välja att redovisa varje beräkningsmodell separat eller att koncentrera redovisningen kring olika delmodeller. När det gäller ej signalreglerade korsningar har följande struktur gjorts:

Först görs en beskrivning av de två modelltyper som finns för beräkning av framkomlighet i korsningar utan trafiksignaler – makro- respektive mikromodeller.

Därefter behandlas de olika korsningstyperna, indelade efter regleringsform, dvs.:

- Korsningar med stopp- eller väjningsplikt
- Korsningar med fyrvägsstopp
- Korsningar med högerregel
- Cirkulationsplatser

Detta innebär att under respektive korsningstyp behandlas såväl mikro- som makromodeller. Därefter görs en del jämförelser mellan olika modeller.

Vid framkomlighetsberäkningar kan ofta kapaciteten eller betjäningstiden (som under vissa förutsättningar exakt motsvaras av det inverterade värdet av kapaciteten) ses som en nyckelvariabel. Beräkningen fram till och med dessa nyckelvariabler kan ske på många olika sätt och med varierende grad av hänsyn till olika faktorer medan beräkningen av övriga framkomlighetsmått är mer likartad eftersom den oftast bygger på köteori. Beräkning av framkomlighetsmått behandlas därför i endast ett kapitel och oberoende av regleringsform. En utförligare rapport om framkomlighetsmått, särskilt fördröjning, kommer att utges separat.

Slutligen finns ett avsnitt som behandlar simulering, om än översiktligt.

För att lättare kunna utvärdera de svenska beräkningsmetoderna har det, då dessa befunnits vara bristfälligt dokumenterade, gjorts en marginalmarkering med symbolen ■. Metoder och mätvärden som är felaktiga eller föråldrade har ej markerats.

Referenser citeras enligt Harvardsystemet. I de fall då hänvisning görs till en referens via en annan referens anges året inom klammer. Detta gäller äldre referenser och hänvisningen görs i allmänhet för att göra en beskrivning fullständig. Totalt omfattar inventeringen ca 200 referenser, flertalet från 90-talet. Då antalet referenser är så stort har referaten fått bli kortfattade. Det har bedömts som mer naturligt att i kommande arbeten ta fasta på de viktigaste arbetena och penetrera dem mer noggrant. Särskilt gäller detta de referenser eller delar av referenser som behandlar den slutliga effektmåtsberäkningen.

### 1.3 Avgränsningar

Utöver de avgränsningar som nämnts ovan har en geografisk avgränsning till i huvudsak Europa och Nordamerika gjorts, motiverad med de stora skillnader i trafikantbeteende som finns. Bland andra Bergh och Dardak (1994) har beskrivit denna skillnad. Som ett exempel på skillnaden kan anges att – i Indonesien – mindre än 40% av förarna från underordnad ström väntar på tidluckor ("gaps") i överordnad ström. I Sverige torde andelen vara praktiskt taget 100%.

## 2. Modellbeskrivningar

### 2.1 Inledning

Kapaciteten för ett körfält i en korsning definieras som det största flöde som kan passera under stationära förhållanden. Kapacitetsrestriktioner kan uppstå på olika ställen i korsningen, i såväl tillfart som frångång beroende på överordnade trafikströmmar och geometrisk utformning. I allmänhet är det körfältsrelaterade värdet som man är intresserad av men också kapaciteten för en korsning kan vara av intresse. Denna definieras som det totala inkommande flödet då det mest belastade körfältet har belastningsgraden 1. Denna definition utgår ifrån en given situation då det mest belastade körfältet har en belastningsgrad som är mindre än 1. Trafikflödena ökas sedan med samma faktor tills något av körfälten får belastningsgraden 1.

Viktigt för kapacitetsdefinitionen är hur olika fordonstyper behandlas. En specifik fordonstyp inverkan kan anges som en personbilsäkvivalent (pbe), dvs. inverkan av fordonstypen relativt en personbil. I en korsning avses hur lång tid ett fordon av en viss typ behöver för avveckling relativt en personbil. Personbilsenhet (pbn) används för att beskriva ett flöde, uttryckt i personbilar, dvs. ett flöde där de olika fordonstyperna omvandlats till personbilsenheter genom utnyttjande av personbilsäkvivalenter.

### 2.2 Mikromodeller

Mikromodellerna är baserade på trafikanternas egenskaper på individnivå. De första systematiska ansatserna för beräkning av framkomlighet i gatukorsningar på denna nivå gjordes av Adams (1936) och Tanner (1951). Båda sysselsatte sig med fotgängare men de modeller som de utvecklade kom att bli användbara också för fordonstrafik. Den teori de lade grunden till kallas teorin för kritiska tidsavstånd och kan formuleras på följande sätt.

Betrakta en trafikant, fotgängare, cyklist eller bilist, som väntar på att korsa en väg. Trafikanten är, som en följd av gällande trafikregler, skyldig att lämna företräde åt de trafikanter som befinner sig på den väg han ska korsa. Vi definierar dessa trafikanter som överordnade och den betraktade trafikanten som underordnad. De överordnade trafikanterna anländer med – än så länge – ospecificerade tidsavstånd. Den underordnade trafikanten kan korsa vägen om, och endast om, tidsavståndet mellan två på varandra följande trafikanter är större än ett givet värde, det kritiska tidsavståndet. Är tidsavståndet mindre kan det ej utnyttjas.

Adams (1936) bidrag var att han härledde den genomsnittliga tid som en fotgängare får vänta innan han kan korsa den överordnade vägen. Ur denna ansats har det växt fram en teori för kritiska tidsavstånd. Några av de viktigaste delarna av denna ska kort beröras här.

Teorin bygger på några förenklade antaganden om trafikanters beteende. Den givna definitionen av kritiska tidsavstånd leder till en enkel beslutsregel: om tidsavståndet är mindre än det kritiska – fortsatt att vänta, i annat fall – kör (eller gå eller cykla). Orsaken till att ett kortare tidsavstånd ej kan accepteras, dvs. orsaken till att det kritiska tidsavståndet har ett visst värde beror, enligt teorin, på att de kortare tidsavstånden uppfattas som osäkra. Längre tidsavstånd är säkrare men leder å andra sidan till att man får vänta längre. Det kritiska tidsavståndet kan därför ses som en kompromiss mellan kraven på god säkerhet och låg fördröjning. Stöd för denna teori kan finnas genom olika mätningar. Bland annat har det visats att det kritiska tidsavståndet blir lägre då väntetiden ökar, dvs. man gör en ny avvägning mellan kraven på god säkerhet och låg fördröjning då fördröjningen ökar. Att de kritiska tidsavstånden är lägre då hastigheterna på den överordnade leden är lägre ger också stöd för teorin.

Med kunskap om det kritiska tidsavståndet kan man nu för en uppsättning av tidsavstånd – uppmätta eller givna av någon matematisk funktion – bestämma vilka av dessa tidsavstånd som kommer att accepteras. För att bestämma hur många fordon som kan utnyttja ett visst tidsavstånd måste man emellertid också veta det kritiska tidsavståndet för två, tre osv. fordon. I allmänhet brukar antas att det extra tidsavstånd som ett ytterligare fordon behöver är konstant och detta definieras som följdttid. Med beteckningarna  $T$  för kritiskt tidsavstånd,  $T_0$  för följdttid och  $h$  för ett givet tidsavstånd fås följande uppställning:

$h \leq T$  Tidsavståndet kan inte utnyttjas av något fordon

$T + T_0 \leq h \leq T + 1T_0$  Tidsavståndet kan utnyttjas av ett fordon

$T + T_0 \leq h \leq T + 2T_0$  Tidsavståndet kan utnyttjas av två fordon

$T + 2T_0 \leq h \leq T + 3T_0$  Tidsavståndet kan utnyttjas av tre fordon etc.

eller – mera generellt –  $i$  fordon kan utnyttja en tidlucka  $h$  om

$$T + (i - 1)T_0 \leq h \leq T + iT_0$$

Möjligheterna att avveckla en underordnad fordonsström beror således på egenskaper hos trafikanterna i denna ström. Vidare beror avvecklingsmöjligheterna på egenskaperna hos den överordnade strömmen, främst utbudet av tidsavstånd. Detta är beroende dels av flödet i den överordnade strömmen, dels av hur frekventa olika tidsavstånd är. Detta beskrivs lämpligen genom att ange en fördelningsfunktion för tidsavstånden.

Uppställningen ovan antyder att det kritiska tidsavståndet skulle vara en, för en given situation, konstant. Så är dock inte fallet. Förarbeteendet skiftar såväl inom som mellan trafikanter. Det första fallet, dvs. när en förare har ett variabelt kritiskt tidsavstånd i en viss situation – t.ex. i en särskild korsning – definieras som inkonsistent beteende. Det andra fallet, dvs. när olika individer har olika kritiska tidsavstånd i en given situation, definieras som inhomogenitet. Båda fallen kan förekomma samtidigt.

Ytterligare ett problem är att beskrivningen ovan ej tar hänsyn till skillnader mellan det första kritiska tidsavståndet ("lag") och de övriga kritiska tidsavstånden ("gap"). Ett "lag" kan definieras som tidsavståndet mellan ett fordon's ankomst till stopplinjen till nästa överordnade fordon's ankomst.

I det följande behandlas metoder för att bestämma tidsavståndsfördelningar samt kritiska tidsavstånd och följdtider. Därefter följer ett avsnitt om hur denna modell kan utnyttjas för att beräkna kapacitet. Tillämpningar och undersökningar redovisas under respektive korsningstyp.

## 2.3 Bestämning av tidsavstånd på överordnad led

Problemet att beräkna tidsavstånd på överordnad led kan indelas i definition och mätning samt anpassning av observerade tidsavstånd till en given fördelningsfunktion. Den senare uppgiften omfattar också undersökning av tillförlitligheten i anpassningen. Många av de resultat som presenteras här återfinns i Luttinen (1996). Denna referens kan användas som en handbok vid statistisk analys av tidsavstånd.

### 2.3.1 Definitioner och mätning

Med tidsavstånd mellan två på varandra följande fordon avses den tidrymd som förflyter från det att det ena fordonet passerar ett snitt i vägbanan till dess att nästa fordon passerar. För att få en korrekt definition krävs dessutom att mätpunkten på de båda fordonen är densamma, t.ex. fronten eller främre hjulparet. Teorin för kritiska tidsavstånd baseras på att ett underordnat fordon kan passera mellan två överordnade fordon om tidsavståndet mellan dessa är tillräckligt stort. Det är uppenbart att det avstånd som en underordnad förare beaktar måste vara det från det främre fordonets bakre del till det bakre fordonets främre del. För svenskt vidkommande används ibland begreppet tidlucka för detta tidsavstånd. I allmänhet approximerar man fordonet med en punkt varvid någon skillnad mellan de båda begreppen inte längre föreligger. En orsak till denna approximation är att det avsevärt förenklar beräkningarna, en annan att det är lättare att mäta tidsavstånd än tidluckor – tidsavstånd mätes ju enkelt med en slangdetektor. I fortsättningen kommer därför detta begrepp att användas.

### 2.3.2 Tidsavståndsfördelningar

#### Tidsavstånd för ett körfält

Ansatzerna för att bestämma vilken fördelningsfunktion som ska användas kan sägas vara två, en sannolikhetsteoretisk-beteendevetenskaplig ansats och en ad-hoc ansats.

Den sannolikhetsteoretiska ansatsen utgår från att fordons rörelser på en väg är resultatet av en Poisson-process, dvs. att antalet fordon som passerar under en tidsperiod är slumpmässigt. Detta medför att tidsavstånden mellan fordonen blir exponentialfördelade. Exponentialfördelningen har vissa brister ur ett beteendeperspektiv, nämligen att den tillåter att tidsavstånden är mycket nära noll och att kolonner ej kan modelleras. Ett vanligt sätt angripa detta är att skriva tidsavstånden  $t$  som  $t = V + U$  där  $V$  motsvarar det minsta tidsavståndet mellan två fordon och  $U$  är den "fria" delen. Utifrån denna ansats har Cowan (1975) definierat fyra tidsavståndsfördelningar med utgångspunkt från exponentialfördelningen:

#### **M1-fördelningen**

Denna fördelning motsvarar exponentialfördelningen, med fördelningsfunktionen

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - e^{-qt}, \quad t \geq 0 \\ F(t) &= 0, \quad t < 0 \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

där  $q$  är flödet (fordon/sekund). Denna fördelning kan användas vid låga flöden och när det finns goda omkörningsmöjligheter.

#### **M2-fördelningen**

Denna fördelning innebär att man förskjuter exponentialfördelningen. Den har fördelningsfunktionen

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - e^{-\lambda(t-\Delta)}, \quad t \geq \Delta \\ F(t) &= 0, \quad t < \Delta \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

$\Delta$  är en förskjutning av fördelningen till höger. Den andra parametern ges av

$$\lambda = \frac{q}{1 - q\Delta}. \quad (2.3.3)$$

Eftersom  $\Delta$  kan definieras som det minsta tidsavståndet mellan två fordon råder den bot på en av nackdelarna hos exponentialfördelningen.

### **M3-fördelningen**

Denna fördelning föreslogs först av Tanner (1962). Den innebär att man definierar två kategorier av förare, de som befinner sig i kolonn och de som är oberoende av andra förare. Den senare kategorin inkluderar kolonnledaren. M3-fördelningen har fördelningsfunktionen

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - \alpha e^{-\lambda(t-\Delta)}, \quad t \geq \Delta \\ F(t) &= 0, \quad t < \Delta \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

där  $\alpha$  är andelen fria fordon och

$$\lambda = \frac{q\alpha}{1 - q\Delta} \quad (2.3.5)$$

$\alpha$  och  $\Delta$  har en tydlig anknytning till egenskaper hos trafikflödet.

### **M4-fördelningen**

Om man också vill modellera den variation som finns i det minsta tidsavståndet mellan fordon behövs två fördelningar. Detta kan göras med M4-fördelningen som har fördelningsfunktionen

$$F(t) = (1 - \alpha)B(t) + \alpha \int_0^t B(t-x)\lambda e^{-\lambda x} dx \quad (2.3.6)$$

och  $\lambda$  definieras av

$$\lambda = \frac{q\alpha}{1 - qE(V)} \quad (2.3.7)$$

Branston (1976) presenterade, oberoende av Cowan (1975) samma fördelning. M4-fördelningen kan ses som ett resultat av ett M/G/1 kösystem: fordonen ankommer slumpmässigt och de resulterande tidsavstånden, dvs. tidsavstånd mellan successiva betjäningar får en M4-fördelning. Vid köbildning försvinner  $U$ -komponenten. Också M3-fördelningen kan betraktas på detta sätt, men med konstanta betjäningstider, dvs. ett M/D/1 kösystem. Buckley (1968), Wasielewski (1974) och Weiss (1975) utvecklade den s.k. semi-Poisson fördelningen, som karaktäriseras av att förarna antas vara bundna eller fria. De fria fordonen beskrivs av en exponentialfördelning. Detta innebär att istället för att skriva  $t = V+U$  så gäller antingen  $t = V$  eller  $t = U$ .

Ad-hoc-ansatsen innebär att man utgår från den observerade fördelningsfunktionen – eller snarare täthetsfunktionen – och väljer någon fördelningsfunktion vars täthetsfunktion överensstämmer med den observerade. Detta leder till två klasser av fördelningar.

Den första (May 1990) utgår den fördelning som kallas Pearson type III distribution

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(K)} [\lambda(t - \Delta)]^{K-1} e^{-\lambda(t-\Delta)} \quad (2.3.8)$$

där  $\Delta$  är det minsta tidsavståndet mellan två fordon,  $K$  är en skalparameter och  $\lambda$  är en parameter relaterad till trafikflödet. Denna fördelning kan sedan förenklas på olika sätt:

- När  $\Delta = 0$  övergår fördelningen i gamma-fördelningen.
- När skalparametern  $K$  är ett heltal övergår fördelningen i en förskjuten Erlang-fördelning (Simonsson 1996a).
- När  $\Delta = 0$  och  $K$  är ett heltal övergår fördelningen i en Erlang-fördelning (Simonsson 1996a).
- När  $K=1$  övergår fördelningen i en M2-fördelning.
- När  $\Delta = 0$  och  $K=1$  övergår fördelningen i en M1-fördelning.

Den andra klassen omfattar lognormalfördelningen, som kan fås att inkludera ett minsta tidsavstånd  $\Delta$  (Simonsson 1996b).

Slutligen kan man kombinera ad-hoc-ansatsen med beteendansatsen, t.ex. genom att generalisera M4-fördelningen genom att tillåta andra fördelningar för  $U$  än exponentialfördelningen och genom att bestämma andelarna, dvs.  $\alpha$ , utifrån andra utgångspunkter än att de ska motsvara fria respektive kolonnikörande fordon. Några exempel på denna kombinerade ansats ska ges här. Scuhl (1955) kombinerade två M2-fördelningar med olika  $\Delta$ -värden. Griffiths och Hunt (1991) kombinerade två M2-fördelningar med samma  $\Delta$ -värden. Schnabel (1991) kombinerade två M1-fördelningar vilket ger upphov till en fördelning som oftast kallas hyperexponentialfördelningen.

### Tidsavstånd för flera körfält

Om ett underordnat fordon måste korsa mer än en fordonsström uppkommer frågan om hur tidsavstånden mellan fordonen i de olika körfälten ser ut. Det enklaste angreppssättet är att betrakta fordonsströmmarna som vore det endast en ström och försöka anpassa en tidsavståndsfördelning till denna överlagrade ström. Vanligast är att anta att de överlagrade tidsavstånden är exponentialfördelade vilket också blir fallet om tidsavstånden i varje ström är exponentialfördelade. Också M3-fördelningen används för att beskriva överlagrade tidsavstånd direkt, se t.ex. Troutbeck (1989) och Akçelik och Chung (1994). Ofta sätts det minsta tidsavståndet,  $\Delta$ , proportionellt mot det inverterade värdet av antalet körfält som överlagras. På detta sätt får kapaciteten  $-\Delta^{-1}$  ett riktigt värde.

Mer komplicerat är att räkna ut vad tidsavståndsfördelningen blir genom att beakta de faktiska tidsavståndsfördelningarna i respektive körfält. Olika ansatser för detta har gjorts av Tanner (1967), Golias (1986), Fisk (1989) och Troutbeck (1984a, 1986, 1991). Hagring (1998a) utvecklade en generell metod för överlagring av M3-fördelningar. Denna metod, som bygger på resultat av Haight (1968) kan tillämpas på varje fördelning med analytiska uttryck för såväl täthets- som fördelningsfunktion.

### 2.3.3 Anpassning av tidsavståndsfördelningar

Att anpassa en statistisk fördelningsfunktion till observerade tidsavståndsdata är en process som inbegriper flera steg. Man kan dela in den i följande tre delar:

1. Kontroll av tidsavståndsdata
2. Identifiering av tidsavståndsfördelning
3. Skattning av parametrar
4. Tester av anpassning

### Kontroll av tidsavståndsdata

Anpassning av tidsavståndsfördelningar till observerade data kan göras på olika sätt. Innan en sådan anpassning kan göras måste det emellertid kontrolleras att de uppmätta tidsavstånden uppfyller vissa kriterier. Som exempel på sådana kriterier kan nämnas (se t.ex. Breiman et al. 1969 och Luttinen 1996) att datamaterialet inte ska uppvisa några trender och att tidsavstånden är oberoende och likafördelade, dvs. att de uppfyller villkoren för en förnyelseprocess. De båda anförda referenserna anger några olika statistiska tester för att kontrollera detta. I en undersökning av Hagring (1998b) användes några av dessa tester på ett datamaterial från cirkulationsplatser. Det kunde konstateras att flera av dataseten ej klarade testerna.

Detta är också vad man kan förvänta sig. Särskilt kravet på trendfria datamaterial torde vara svårt att uppfylla. Ofta är man intresserad av tidsperioder med höga flöden. Dessa perioder kännetecknas av trender med kort tidshorisont. Det är därför också troligt att successiva tidsavstånd är korrelerade och därför ej är oberoende.

På detta problem finns ingen tillfredsställande lösning. Om endast datamaterial med alla kriterier uppfyllda ska användas kommer det att bli svårt att finna några tillämpliga datamaterial överhuvudtaget, åtminstone under de högbelastade perioderna. Hur stora fel som uppstår av att tillämpa olika skattningsmetoder på datamaterial med olika avvikelser från förutsättningarna finns det inga uppgifter om. Det går naturligtvis att göra skattningar på mindre delar av datamaterialet för att på så vis få ett datamaterial som uppfyller kriterierna. Detta kan innebära svårigheter när skattning av parametrar i tidsavståndsfördelningarna ska göras.

### Identifiering av tidsavståndsfördelning

Luttinen (1996) har beskrivit en process i fyra steg vid identifiering av tidsavståndsfördelning.

1. Den empiriska täthetsfunktionen ger mer information än motsvarande fördelningsfunktion. Det är lämpligt att rita denna med hjälp av en kärnfunktion.
2. Intensitetsfunktionen är ofta enklare att tolka än motsvarande täthetsfunktion.
3. Undersökning av variationskoefficienten ger ytterligare värdefull information om lämplig fördelning.
4. Slutligen kan också de tredje och fjärde momenten (skevhet och kurtosis) användas.

Luttinen (1996) ger en del exempel på var i denna process som olika fördelningar kan förkastas.

Någon systematisk tillämpning av denna process har ej hittats i litteraturen. Hjorth (1995) använde sig av en generaliserad intensitetsfunktion som beskrev såväl kolonnkörande som fria fordon.

### Skattning av parametrar

Buckley (1968) använde momentmetoden för att skatta parametrar i semi-Poisson-modellen. Han konstaterade, liksom Cowan (1975) att momentmetoden har en brist, nämligen att tredje och fjärde ordningens moment varierar så mycket i data att skattningarna blir ologiska. Cowan (1975) noterar också att maximum likelihood-metoden inte fungerar för M4-fördelningen eftersom det resulterande ekvationssystemet inte är lösbart. Han använde sig istället av en kombinerad metod, nämligen att minimera avvikelsen mellan observerad och skattad fördelning (Kolmogorov-Smirnov-testets  $D_n$ -mått) med hjälp av momentmetoden. Troutbeck och Sullivan (1994) och

Troutbeck (1997) använde sig av en kombination av maximum likelihood-metoden och minsta kvadratmetoden för att skatta parametrarna i M3-fördelningen. Denna metod uppvisar, som påpekats av Hagring (1996b, 1998b), samma problem som de Cowan (1975) påtalade för momentmetoden. Detta visar sig i att det skattade värdet på  $\Delta$  varierar kraftigt. En sådan variation hade kunnat accepteras om den var korrelerad med flödet (minskande  $\Delta$  med ökande flöde) men så var ej fallet. De olika skattningsmetodernas användbarhet har undersökts av Hagring (1998b):

- Maximum likelihood-metoden.  $\lambda$  kan bestämmas direkt ur ML-uttrycket. För de övriga två parametrarna saknas ML-uttryck.  $\Delta$  sattes till ett fixt värde och  $\alpha$  bestämdes ur formel (2.3.5).
- Momentmetoden. När tredje ordningens moment användes blev resultatet ologiska skattningar av  $\Delta$ . Istället provades att sätta  $\Delta$  till ett fixt värde medan  $\alpha$  och  $\lambda$  gavs av momentmetoden.
- Minsta kvadratmetoden. Både linjär respektive icke-linjär minsta kvadratmetoden provades. Den icke-linjära metoden gav dålig skattning av  $\Delta$ . Den linjära metoden användes på ungefär samma sätt som i ML-metoden,  $\Delta$  sattes till ett fixt värde,  $\Delta$  bestämdes direkt ur MK-metoden och  $\lambda$  ur formel (2.3.5).

Ingen av metoderna gick således att tillämpa renodlat. De tre metoderna bedömdes efter några olika kriterier och befanns vara i stort sett lika bra. Det förefaller därför som om en ansats med ett fixt  $\Delta$  går att använda, eventuellt skulle ett samband där  $\Delta$  relateras till flödet gå att använda.

De stora svårigheterna med M3-fördelningen hänger förmodligen samman med att  $\Delta$  är en problematisk parameter – det är i data omöjligt att avgöra när ett tidsavstånd representerar ett fordon i kolonn och därmed ska modelleras av  $\Delta$ , gränstragningen blir godtycklig.

Hoogendoorn et al.. (1997) har utvecklat en metod som bygger på att det integrerade kvadratfelet (ISE) minimeras. Genom en Fouriertransformation av ISE fås förenklade beräkningar. Metoden användes för att skatta parametrar till en M4-fördelning och visade sig vara överlägsen bl.a. ML-metoden. Metoden kan generaliseras för alla fördelningar och har bland annat använts för att skatta fördelningar med olika fordonstyper (Hoogendoorn och Bovy 1998)

Luttinen (1996) beskriver momentmetoden, ML-metoden och  $\chi^2$ -metoden och tillämpar dem för olika fördelningar, bland annat på M3-fördelningen, M4-fördelningen och Semi-Poisson fördelningen.

## Tester av anpassning

Med detta avses testning av hypotesen att den skattade fördelningen är den (okända) fördelning som har genererat den observerade. Luttinen (1996) redogör för några olika sådana test. Archilla och Morrall (1994), som dessutom studerade kolonnstorlekens fördelning, använde Chi-2 test och Kolmogorov-Smirnovs test. I D'Agostino och Stephens (1986) redovisas ytterligare ett antal olika sådana tester.

## 2.4 Skattning av kritiska tidsavstånd

Det kritiska tidsavståndet för en förare har definierats i avsnitt 2.2. Innan en skattning kan göras måste en definition av det kritiska tidsavståndet för en population av förare göras. På denna nivå har det kritiska tidsavståndet definierats som det tidsavstånd som hälften av förarna kan acceptera, dvs. medianen. Man kan också tänka sig att definiera det kritiska tidsavståndet som motsvarande populationsmedelvärde eller dess typvärde. Miller (1972) lämnar frågan obesvarad. Brilon, Ko-

enig och Troutbeck (1997) och Tian et al. (1997) diskuterar ej frågan men anger implicit att det är medelvärde som bör användas. Enkla beräkningar (se Miller 1972) visar att betjäningstiden i huvudsak bestäms av medelvärde och variansen hos det kritiska tidsavståndet och att fördelningens form har mindre betydelse. Det är därför rimligt att definiera det kritiska tidsavståndet som populationsmedelvärde och denna definition kommer att användas härnäst.

Att skatta det kritiska tidsavståndet innebär flera svårigheter. Svårigheterna härrör från det faktum att det kritiska tidsavståndet ej kan observeras direkt, endast noll eller flera förkastade tidsavstånd samt ett accepterat tidsavstånd per förare kan observeras. Eftersom förarbeteendet kan vara inkonsistent inträffar det att det största förkastade tidsavståndet är större än det accepterade.

Det finns ett mycket stort antal metoder för att skatta det kritiska tidsavståndet. Miller (1972), Maher och Dowse (1983), Hewitt (1985), Aagaard (1995) och Brilon, Koenig och Troutbeck (1997) anger totalt ett tjugotal metoder. Maher och Dowse (1983) har särskilt undersökt metoder för simultan skattning av det kritiska tidsavståndet och följdtiden. Utöver dessa har Golias (1981) utvecklat en metod som bygger på EM-algoritmen. Flera av de ovan redovisade metoderna ger emellertid skattningar av låg kvalitet vilket visas i de angivna referenserna. Kvaliteten beskrivs bland annat genom avvikelse mellan skattat och sant värde och genom känsligheten för storleken på det överordnade flödet, dvs. utbudet av tidsavstånd. I den systematiska analys som gjorts av Brilon, Koenig och Troutbeck (1997) visar sig två metoder ge skattningar som har låga genomsnittliga avvikelser (bias) mellan skattat och sant värde och är oberoende av storleken på det överordnade flödet, nämligen en ML-metod utvecklad av Miller och Pretty (1968) och den metod som utvecklades av Hewitt (1985). Skattningar utförda av Kyte et al. (1994) stöder dessa resultat. Något förvånande är kanske att den metod som utvecklats av Ashworth (1968) anges som väl fungerande av Miller (1972) men som förkastlig av Brilon, Koenig och Troutbeck (1997). Texterna i de båda referenserna visar att de angett samma beräkningsförfarande men det är möjligt att skattningen gjorts på olika sätt. Harwood et al. (1997) har använt logistisk regression, en metod som ej undersökts närmare i detta sammanhang. Det är troligt att också denna metod ger skattningar med bias. Lan (1997) beskriver en metod för skattning av kritiska tidsavstånd baserade på aggregerade data (observationer av antal fordonspassager under korta tidsperioder). Den skattningsmetod som utvecklats bygger på att antalet fordon som genomför en underordnad korsningsmanöver under en tidsperiod är binominalfördelat. Detta leder till en ML-skattning som är beroende av de överordnade tidsavstånden. Beroendet är starkt – en ändring av skalparametern i en Pearson type III-fördelning från 1,29 till 1,00 (dvs. till en M2-fördelning) ökade det skattade kritiska tidsavståndet med 1,1 s. Detta tyder på att metoden är känslig för förändringar i det överordnade flödet.

Den ML-metod som utvecklats av Miller and Pretty (1968) kan beskrivas på följande sätt. Om det största förkastade tidsavståndet för en förare betecknas med  $r$  och det accepterade tidsavståndet med  $a$  så uttrycker  $G(a) - G(r)$ , där  $G$  är någon fördelning och  $a > r$ , sannolikheten för detta utfall. För hela populationen av förare fås sannolikheten för de observerade värdena som

$$\lambda = \prod_{i=1}^n (G(a_i) - G(r_i)). \quad (2.4.1)$$

Maximum av  $\lambda$  ger parametervärdena för  $G$ .

Den metod som utvecklats av Hewitt (1985) bygger på sambandet mellan observerade tidsavstånd i överordnad ström  $F$ , observerade förkastade och accepterade tidsavstånd  $H$  och fördelningen för det kritiska tidsavståndet,  $G$  (samtliga tre fördelningar är på diskret form, dvs. klassade i intervaller). Då  $G$  ej är känd måste en startfördelning  $G^*$  beräknas. Givet  $F$  och  $G^*$  kan nu  $H^*$  skattas. Avvikelsen mellan  $H$  och  $H^*$  kan användas för att korrigera  $G^*$  som efterhand konverge-

rar mot **G**. Denna metod har vissa likheter med en metod utvecklad av Thedéen (1979). Yahya (1997) har använt denna metod för att skatta kritiska tidsavstånd. Någon validering av metoden är dock ej gjord.

De metoder som utvecklas av Maher och Dowse (1983) och Golias (1981) ger också låg bias men har ej testats av Hewitt (1985) eller Brilon, Koenig och Troutbeck (1997).

Ovan har ej skiljts mellan det första kritiska tidsavståndet och det kritiska tidsavståndet ("critical lag" och "critical gap"). I allmänhet antas att fördelningarna för dessa skiljer sig åt, men vid skattningarna bortses ofta från detta. Miller (1972) anger att man kan sätta det förkastade tidsavståndet till 0 för accepterade "lags".

Golias och Kanellaidis (1988) utvecklade en modell för skattning av kritiska tidsavstånd, inkluderande såväl "critical gaps" som "critical lags", dels en modell för separat skattning dessa båda tidsavstånd. Den första modellen bygger på samband mellan fördelningen för de kritiska tidsavstånden, fördelningen för de tidsavstånd som följer efter ett "lag" samt fördelningen för de tidsavstånd som följer efter ett "lag" givet att detta "lag" förkastades. Den andra modellen bygger på den simultana fördelningsfunktionen för det första kritiska tidsavståndet och det kritiska tidsavståndet. Det antas att fördelningsfunktionerna för det första kritiska tidsavståndet och det kritiska tidsavståndet är relaterade så att om en förare har ett kritiskt tidsavstånd **T** så kommer det första kritiska tidsavståndet att vara **AT**, där **A** är en konstant.

ML- och EM-metoderna utgår från en given fördelning medan Hewitts metod utnyttjar den empiriska fördelningen. Samtliga metoder ger alltså en beskrivning av inhomogenitet (varians) hos förare. Miller och Prettys ML-metod kan ej hantera inkonsistens medan de övriga två behandlar den implicit, dvs. den skattade fördelningen **G\*** kommer att innehålla information om förarnas inkonsistens.

Miller och Prettys metod har på denna punkt diskuterats av Miller (1972). Han anger två olika ansatser för att behandla inkonsistens. Den ena bygger på att inkonsistens är en funktion av betjäningstidens längd. Denna kan uttryckas som en funktion av antalet förkastade tidsavstånd. Formel (2.4.1) kan skrivas om för att uttrycka detta och parametrarna i funktionen kan skattas. I allmänhet är antalet inkonsistenta förare litet och parameterskattningarna blir därför dåliga. Den andra bygger på att inkonsistens är en följd av en missbedömning av avståndet mellan de överordnade fordonen. Denna missbedömning kan modelleras som en felfunktion. Emellertid visar Miller (1972) att det går att låta **a** och **r** byta plats i formel (2.4.1) då **a < r**. Metoden ger, liksom de övriga refererade metoderna, endast ett implicit uttryck för inkonsistensen. Wang (2000) tillämpade Millers metod samt en metod beskriven av Troutbeck (1992a), där det förkastade tidsavståndet ersattes med det accepterade tidsavståndet minskat med en konstant (ca 0.01). Datamaterialet omfattade en stor andel inkonsistent beteende och relativt stora skillnader erhöles mellan de båda skattningsmetoderna – Millers metod gav ca 0.4 s större kritiska tidsavstånd.

Millers diskussion leder in på frågan om vad inkonsistens egentligen är. Den definition som angivits i avsnitt 2.2 är statisk då den utgår från att förändringar av förarnas beslutssituation inte har någon betydelse för valet av tidsavstånd. Detta har diskuterats av Hagring (1998b) som menar att inkonsistens egentligen består av två delar. Den ena speglar en anpassning till den förändrade beslutssituationen, den andra är "sann" inkonsistens. Ett exempel på den förra är att när betjäningstiden ökar så minskar det kritiska tidsavståndet. Detta förefaller att vara ett rationellt beteende i den meningen att kompromissen mellan säkerhet och fördröjning förändras efterhand som fördröjningen ökar. Den sanna inkonsistensen kan bero till exempel på missbedömning av avstånd. Det är troligt att det vid undersökningar upptäckts inkonsistens som skulle kunna bero på

ett rationellt beteende men som ej kan upptäckas av observatören. Ut mätningssynpunkt kan därför inkonsistens definieras som ej förklarad inkonsistens enligt den ursprungliga definitionen.

Inkonsistens som ett uttryck för ett rationellt beteende kan mätas på olika sätt. Ett är att direkt skatta inverkan, t.ex. genom en valmodell. Den sistnämnda leder, under vissa antaganden, till logit-modellen som använts av Madanat et al. (1994), Abou-Henaidy et al. (1994), se också Teply et al. (1997). Abou-Henaidy et al. (1994) använde denna modell bland annat för att skatta effekter av t.ex. lång betjäningstid. Tyvärr visar undersökningarna av Brilon, Koenig och Troutbeck (1997) att logit-modellen ger skattningar med bias.

Hamed et al. (1997) använde ytterligare en metod för att skatta kritiska tidsavstånd, baserad på intensitetsfunktionen. Här blir denna ekvivalent med tätheten för ett accepterande av ett tidsavstånd, givet den tid som fordonet väntat (dvs. överlevt). En intensitetsfunktion, beroende av ett antal oberoende parametrar, och proportionell mot en Weibull-fördelning användes.

För att undvika bias kan någon av de ovan refererade metoderna användas. Inverkan av olika faktorer kan skattas genom att datamaterialet klassas på olika sätt. På detta sätt studerades inkonsistens av Ashworth och Bottom (1977). Skattningen av de kritiska tidsavstånden gjordes med probitanalys, en metod som dock visat sig ge skattningar med bias (se Brilon, Koenig och Troutbeck 1997). Inget hindrar emellertid användandet av en bättre metod.

De olika skattningsmetoderna bygger på att det finns endast en överordnad fordonsström eller att de överordnade fordonsströmmarna överlagras så att de kan behandlas som en. Om separata kritiska tidsavstånd ska skattas för flera körfält tillkommer ytterligare en svårighet. Vid skattning för ett körfält användes förkastade och accepterade tidsavstånd som är exempel på det som kallas censurerade data (ingen direkt observation). Vid flera körfält förstärks denna censurering: vid ett förkastande går det nämligen ej att avgöra vilket tidsavstånd som ledde till att båda tidsavstånden förkastades. Den observerade valsituationen är ju ett förkastande av båda tidsavstånden eller ett accepterande av båda tidsavstånden. Observationen av förkastade tidsavstånd kommer därmed att bestå av två typer: båda är så små att de förkastas respektive att endast ett är för litet.

Några metoder har emellertid utvecklats för att skatta separata kritiska tidsavstånd för olika överordnade fordonsströmmar. Golias (1981) utvecklade EM-metoden också för två körfält och kunde då skatta separata kritiska tidsavstånd. McDowell et al. (1983) utnyttjade de observationer då avståndet till närmaste fordon i något av de två körfält som studerades var så långt att man kunde utesluta dess inverkan på det kritiska tidsavståndet. Kittelson och Vandehey (1991) hanterade detta problem på samma sätt men utan att kunna skatta några skillnader.

Hagring (1998b) utvecklade Miller och Prettys metod för skattningar av separata kritiska tidsavstånd i två körfält. Principerna bakom denna metod kan relativt enkelt beskrivas genom att ange det område som de kritiska tidsavstånden måste tillhöra. Denna metod gav dåliga resultat om flödet i något av körfälten var lågt och det är troligt att EM-metoden lider av samma problem. Egentligen är detta problem dock av mer allmän karaktär – vid låga överordnade flöden fungerar inte metoderna för ett körfält heller – men svårigheterna ökar om separata tidsavstånd ska skattas eftersom det överordnade flödet då fördelas på två körfält.

Hewitts metod bör också vara möjlig att generalisera till två eller flera körfält medan den ML-metod som utvecklats av Maher and Dowse ej är möjlig att generalisera. Skälet till detta är att den bygger på att samtliga överordnade tidsavstånd utnyttjas fullt ut, dvs. att tidsavståndet mellan det sista underordnade fordonet som utnyttjar det överordnade tidsavståndet och nästa överordnade tidsavstånd är så litet att ytterligare underordnade fordon ej får plats. Detta villkor kan inte upp-

fyllas för alla observationer och det går inte att avgöra när det inte är uppfyllt på grund av den begränsade information som observationerna ger.

Kritiska tidsavstånd har också skattats med neurala nätverk av Pant och Balakrishnan (1994). Metoden användes egentligen för prediktion – i en given situation med ett antal oberoende variabler kan denna metod användas för att prediktera om ett tidsavstånd förkastas eller accepteras.

Skattning med neurala nätverk och logitmodeller skiljer sig från övriga metoder genom att de fokuserar – implicit som med neurala nätverk eller explicit som med logitmodellen – på ett antal oberoende variabler som direkt påverkar förkastandet eller accepterandet av ett tidsavstånd. Till denna kategori av skattningsmodeller kan föras t.ex. regressionsanalys eller fuzzy logic. Övriga skattningsmodeller bygger på att det kritiska tidsavståndet skattas för en grupp av förare utan hänsyn till de oberoende variablerna. Ska dessa beaktas måste data klassas, t.ex. personbilar och tunga fordon för sig. Att utnyttja all information som finns i data blir därmed svårt.

Vad som ej diskuterats här ovan är innebörden av begreppet kritiskt tidsavstånd. Begreppet bygger på tidsavstånd mellan överordnade fordon, mätta efter konfliktpunkten. En alternativ definition bygger på ett projicerat tidsavstånd som erhålls som kvoten av sträckavstånd och hastighet för det överordnade fordonet vid sträckavståndets början. Denna definition ger möjlighet att ta hänsyn till hastighet och, framförallt, hastighetsförändringar hos det överordnade fordonet. Wang (1999) mätte projicerade tidsavstånd och fann att dessa bättre återspeglade trafikantbeteendet. En intressant fråga i sammanhanget är huruvida projicerat tidsavstånd är kompatibel med kapacitetsdefinitionen, dvs. hur tidsavståndsfördelningen ska hanteras.

## 2.5 Skattning av följdtider

Skattningen av följdtider kan göras på två olika sätt. Det enklaste är att göra skattningen på de observerade följdtiderna eftersom dessa direkt kan mätas och det är i allmänhet denna metod som tillämpas. Det finns dock flera metoder som bygger på en simultan skattning av det kritiska tidsavståndet och följdtiden. Dessa utgår från att observationerna består av längden på det utnyttjade tidsavståndet och antal fordon som använde det. En förutsättning är att det studerade körfältet är mättat så att det uppmätta antalet fordon är det största möjliga. Skattningen görs antingen genom att anpassa en regressionslinje till data eller med den ML-metod som utvecklats av Maher och Dowse (1983). Regressionsmetoderna ger skattningar med bias, vilket redovisats av såväl Maher och Dowse som Brilon, Koenig och Troutbeck (1997).

## 2.6 Beräkning av kapacitet och betjäningstider

För att kunna utnyttja den kritiska tidsavståndsmodellen för att beräkna kapaciteten är det nödvändigt att överföra den till en makromodell. Detta görs genom en medelvärdesberäkning. Kapaciteten kan beräknas som

antal tidluckor  $\cong$  det genomsnittliga antalet fordon som kan avvecklas per tidsavstånd

Den senare variabeln betecknas  $E(n)$  och antalet tidluckor blir detsamma som flödet. Vi får

$$K = qE(n) \quad (2.6.1)$$

Detta samband är ekvivalent med

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N(t)}{t} \quad (2.6.2)$$

där  $N(t)$  är antalet fordon som kan passera under tidsperioden  $t$ . Dessa samband är allmängiltiga och det överordnade flödet vållar i princip inga problem ur teoretisk synpunkt. Svårigheten ligger i att beräkna  $E(n)$ , särskilt under allmänna förutsättningar.

Medelvärde kan skrivas

$$E(n) = \int f(t)g(t)dt \quad (2.6.3)$$

Siegloch [1973] använde sig av (2.6.3) och utnyttjade ett kontinuerligt linjärt samband för  $g(t)$

$$g(t) = \frac{T_b}{t_f} \quad (2.6.4)$$

där  $T_b$  ges av

$$T_b = T - \frac{T_0}{2} \quad (2.6.5)$$

För en exponentialfördelade överordnade tidsavstånd fås

$$K = \frac{e^{-qT_b}}{T_0} \quad (2.6.6)$$

Wu (1997a) har vidareutvecklat denna ansats till att gälla cirkulationsplatser med flera separata överordnade strömmar och med tidsavstånden i varje ström Tanner-fördelade. Sambandet förutsätter att trafikflödet är symmetriskt fördelat på de olika överordnade fordonsströmmarna. Akçelik (1994) och Akçelik och Chung (1994) har utvecklat en liknande modell, baserad på en analogi med trafiksignaler. Precis som i trafiksignaler och övriga modeller av denna typ är det den icke-blockerade perioden (effektiva gröntiden) och följdtiden (mättnadsflödet) som är de viktigaste variablerna i modellen.

Lan (1997) redovisar också en vidareutveckling av formel (2.6.6). Tyvärr innehåller de redovisade sambanden en rad fel vilket gör att kapacitetsformlerna inte är korrekt skrivna.

Eftersom fordon avvecklas i diskreta enheter kan  $g(t)$  egentligen inte vara kontinuerlig utan är en stegfunktion. Medelvärde  $E(n)$  får då skrivas

$$E(n) = \sum_{k=0}^{\infty} n p(n) \quad (2.6.7)$$

[Harders 1968], där  $p(n)$  är sannolikheten för att  $n$  fordon kan avvecklas. Det resulterande kapacitetsuttrycket blir

$$K = \frac{qe^{-qT}}{1 - e^{-qT_0}} \quad (2.6.8)$$

Andra svårigheter dyker upp då  $T$  och  $T_0$  inte längre är konstanta. Antagandet om att förarna är såväl inkonsistenta som inhomogena leder till matematiskt besvärliga medelvärdesberäkningar som dock har lösts av Catchpole and Plank (1984, 1986) under vissa förutsättningar. Några av dessa förutsättningar är:

- Följdtiden ska vara konstant.
- Det minsta kritiska tidsavståndet får inte vara större än följdtiden.
- Skillnaden mellan det största och det minsta kritiska tidsavståndet får inte vara större än följdtiden.

Dessa förutsättningar är normalt inte fullständigt uppfyllda i data. Mätningar (se Hagring 1996) har visat att ett 95%-igt konfidensintervall för följdtiden är ca 2.5 sekunder. Följdtiden kan därmed inte sägas vara konstant. Den andra förutsättningen kommer att bero av fördelningarna för följdtiden och det kritiska tidsavståndet. Baserat på mätningarna av Hagring (1996) är sannolikheten för att följdtiden skulle vara större än det kritiska tidsavståndet ca 8% om det kritiska tidsavståndet är normalfördelat och 7% om det är lognormalfördelat. Om den första förutsättningen är uppfylld minskar sannolikheterna till ungefär hälften. Denna förutsättning kan därmed anses vara uppfylld. Den sista förutsättningen kan anses vara approximativt uppfylld, sannolikheten för att den inte är det är ca 5%.

Även om förutsättningarna inte är helt uppfyllda så är de mindre restriktiva än antagandet om konsistent och homogent beteende. Wegmann (1991) och särskilt Heidemann och Wegmann (1997) har ytterligare generaliserat detta problem. Den senare artikeln behandlar även fördröjning- och kökängdsberäkningar.

Vilka effekter har då inkonsistent och inhomogent beteende på kapaciteten? Inhomogent beteende minskar medan homogent beteende ökar kapaciteten (Catchpole och Plank 1984 och 1986, och Wegmann 1991). Om båda beteendena beaktas blir påverkan på kapaciteten förmodligen liten<sup>1</sup>. Skillnaden i kapacitet mellan homogent och inhomogent beteende visas bl.a. i Hagring (1998b)<sup>2</sup>. Vid höga överordnade flöden, dvs. när kapaciteten är låg, kan skillnaden i kapacitet uppgå till ca 10%, vilket kan ha avsevärd inverkan på fördröjningen, särskilt om belastningsgraden är hög. Catchpole och Plank (1986) har beräknat kapaciteten för olika trafikantbeteenden. Skillnaden är mindre mellan homogen och inhomogen än den som Hagring (1998b) redovisar, vilket beror på olika beräkningsförutsättningar. Det homogena och konsistenta beteendet ger 3,5% högre kapacitet än det inkonsistenta och inhomogena beteendet. Joubert och Van As (1994) korregerar för en överskattning av kapaciteten som antagandet om homogenitet ger genom att till det kritiska tidsavståndet lägga en faktor, proportionell mot standardavvikelsen för det kritiska tidsavståndet. Utvärdering visade att detta gav bättre överensstämmelse gentemot simulerade data men huruvida detta är rimligt eller inte beror på om förarbeteendet är inkonsistent.

Såväl inkonsistens som inhomogenitet kan beskrivas med en fördelningsfunktion. Catchpole and Plank (1986) förutsätter att inhomogeniteten kan beskrivas med en enkel fördelningsfunktion men det är rimligt att tänka sig att grupperna personbilar respektive tunga fordon (för att ta ett exempel) skiljer sig så pass mycket åt att dessa lämpligast beskrivs med varsin fördelning (dvs. olika fördelningar eller fördelningar med olika parametervärden). Den gemensamma fördelningen erhålls då som en viktning av de båda fördelningarna med fordonsflödet för respektive fordons-typ. Ett specialfall av detta, när det endast finns två fordons typer – personbilar och tunga fordon – och när det överordnade flödet är en Tanner-fördelning har härletts av Fisk (1990). Restriktionen att följdtiden ska vara lika för alla fordon är ej nödvändig i detta fall, dvs. det är möjligt att använda olika (men konstanta) kritiska tidsavstånd såväl som följdtider för de båda fordons typer-na.

<sup>1</sup> Detta diskuteras i Brlon och Troutbeck (1999) med angivande av Troutbeck (1988) som referens. Författaren har dock ej kunnat finna stöd för påståendet i denna referens.

<sup>2</sup> Observera att beteckningarna är skiftade i figur 9.7 i denna referens.

Formel (2.6.1) är giltig också då det finns flera överordnade strömmar. Medelvärdesberäkningen i detta fall har visats av Hagring (1998a).

## 2.7 Makromodeller

Makromodellerna är baserade på egenskaper hos de trafikströmmar som passerar en trafikanläggning. För korsningar är flödet den primära egenskapen även om andra egenskaper som t.ex. hastigheten för överordnat flöde kan ha en viss inverkan på samma sätt som hastigheten på överordnad led kan påverka det kritiska tidsavståndet i mikromodellerna. Det grundläggande antagandet för makromodellen är att kapaciteten för en underordnad ström är beroende av storleken på det överordnade flödet, förutom av den geometriska utformningen etc. Samband av denna typ brukar vanligtvis etableras med regressionsanalys med kapaciteten som beroende variabel och det överordnade flödet, utformning etc. som oberoende variabler. En sådan modell kan mätas in enbart när en korsning arbetar vid kapacitetsgränsen. Vid tillämpning extrapoleras modellen så att den kan användas även då det underordnade flödet underskrider kapaciteten.

Makromodellen är av senare datum än mikromodellen, de första referenserna är från slutet av 1970-talet: Kimber (1976), Philbrick (1977) och Glen, Summer och Kimber (1978).

Makromodellen på linjär form kan skrivas

$$K = K_0 - \sum_i \alpha_i q_i \quad (2.7.1)$$

där  $K_0$  är ett grundvärde på kapaciteten och  $\alpha_i$  beror av geometrisk utformning osv. Indexet anger olika överordnade strömmar. Uttrycket blir mer komplicerat om flera överordnade strömmar förekommer. Besvärligast blir uttrycket för en fyrvägs korsning. Å andra sidan innebär den addition av överordnade strömmar som görs i mikromodellen en förenklad beskrivning. Andra former av samband förekommer men de linjära är vanligast. Kimber och Coombe (1980) anger några skäl för att makromodellen skulle kunna vara icke-linjär (t.ex. genom att kvadratiske termer ingår i formel (2.7.1):

- Mikromodellen anger att kapacitetssambandet är icke-linjärt.
- Vid höga överordnade flöden är det rimligt att anta att åtminstone några underordnade fordon kan ta sig igenom korsningen, dvs. kapaciteten skulle aldrig bli noll.
- Inverkan av en överordnad ström kan bero på storleken av en annan överordnad ström.

Det finns dock inget som a priori säger att någon av dessa skäl måste gälla – det måste provas empiriskt. Konstanterna i formel (2.7.1) bestäms med regressionsanalys. Om observationer från flera korsningar finns tillgängliga är det möjligt att finna samband mellan konstanterna och den geometriska utformningen.

När kapaciteten är beräknad kan belastningsgraden enkelt beräknas. Betjäningstiden, som behövs för beräkning av resterande framkomlighetsmått, uttrycks som det inverterade värdet av kapaciteten.

Makromodellerna uppvisar ofta höga förklaringsgrader. Bl.a. anger Kimber (1980) en förklaringsgrad ( $R^2$ ) på 73%.

Makromodellen är avsevärt enklare än mikromodellen vad gäller den matematiska och statistiska teori som krävs men också i kravet på de mätningar som måste göras. Den ger däremot inte möj-

ligheter att studera t.ex. inkonsistens och inhomogenitet eftersom detta måste undersökas på for-donsnivå. För prediktion är detta oftast av mindre betydelse.

Makromodellen förekommer relativt ofta på en icke-linjär form

$$K = Ae^{-Bq} \tag{2.7.2}$$

som kan tolkas som formel (2.6.6) med  $\mathbf{B}/T_b$  och  $\mathbf{A}/T_0^{-1}$ .

### 3. Korsningar med stopp- eller väjningsplikt

#### 3.1 Inledning

Den svenska metoden för beräkning av framkomlighet i korsningar med stopp- eller väjningsplikt bygger på ett arbete av Hansson (1975). Den första versionen av beräkningsmodellen är beskriven bl.a. av VBB (1975), Vägverket (1977) och Hansson (1980). Den nuvarande beräkningsmetoden, se Vägverket (1995a) och Hagring (1997b) är i stort sett densamma som beskrivs i dessa båda referenser. Denna metod beskrivs inledningsvis. Därefter beskrivs andra nationella beräkningsmetoder, först de som baseras på mikromodeller såsom också den svenska modellen gör och därefter de som baseras på makromodeller. Sist följer en genomgång av forskningsinsatser som berör begränsade delar av framkomlighetsberäkningar för denna korsningstyp.

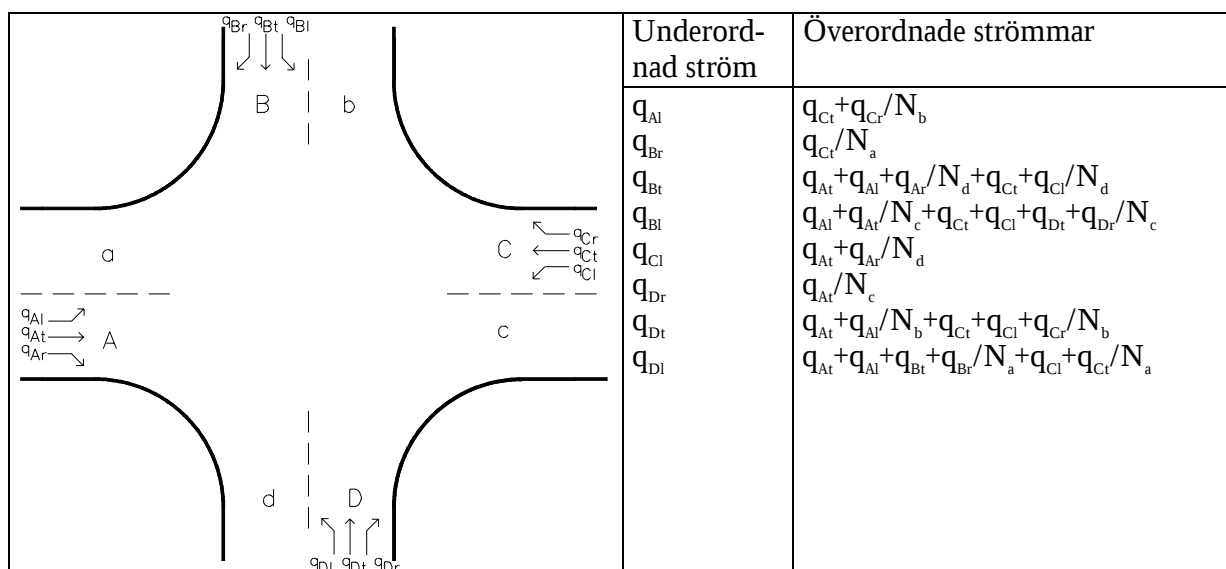
#### 3.2 Beräkningsmetoder baserade på mikromodeller

Förutom den svenska beräkningsmetoden har de amerikanska, australiensiska och tyska metoderna valts ut. Dessa tre har bedömts vara de bäst uppdaterade och de mest spridda. För övriga beräkningsmetoder har de intressantaste delarna valts ut. Dessa presenteras i avsnitt 3.3.

##### 3.2.1 Sverige

Beräkningarna i CAPCAL görs i följande steg:

- Bestämning av överordnat flöde
  - Beräkning av kritiska tidsavstånd och följdtider
  - Beräkning av betjäningstid
  - Fördelning av trafikflöden på deltillfarter
  - Korrigering av betjäningstider med avseende på korta körfält med flera faktorer.
- Bestämningen av det överordnade flödet baseras på gällande trafikregler, se figur 3.1. Det förutsättes att en underordnad förare kan avgöra till vilken ström ett överordnat fordon hör. Svårigheten för en underordnad förare att avgöra om en förare i det närmaste körfältet ska svänga höger beaktas ej. Hela det korsande flödet räknas till det överordnade flödet vid korsande konflikt. När två strömmar konvergerar inräknas endast en del av flödet – omvänt proportionell mot antalet körfält i frånfarten – till det överordnade flödet.
- Cyklister inräknas med ett pbe-värde på 0.5 vid korsande konflikt. Fotgängare inräknas om passagen av gatan sker på ett övergångsställe beläget mellan stopplinjen och den korsande gatan med ett pbe-värde på 0.5. Vägverket (1977) anger ett pbe-värde på 1 för såväl cyklister som fotgängare och det är oklart varför pbe-värdet ändrats.
- Om det förekommer en så bred mittremsa att ett underordnat fordon kan passera korsningen i två steg, dvs. först korsa körfälten med trafik från höger och därefter körfälten med trafik från vänster, korrigeras det överordnade flödet. Det saknas referens för denna korrigering. Det anges dock att den korrigering som görs i TV131 baseras på ett arbete av Tanner (1951). Då det rör sig om två olika typer av korrigering är detta en smula oklart.



**Figur 3.1.** Definition av överordnat flöde, CAPCAL. A, B, C och D är tillfarter. a, b, c och d är frånfarter.  $N_a$ ,  $N_b$ ,  $N_c$  och  $N_d$  är antalet körfält i frånfarten.

Beräkningen av kritiska tidsavstånd baseras på Hansson (1975). Viss modifiering är gjord i Vägverket (1995) för att åstadkomma konsistenta värden, dvs. så att inverkan av en faktor, t.ex. typ av fordonsmanöver, alltid har samma tecken och är av samma storleksordning. De värden som anges i Vägverket (1995) avviker således från de ursprungliga. Skattningarna av de kritiska tidsavstånden är gjorda med Ashworth's metod, en metod som visat sig ge dåliga skattningar (se avsnitt 2.4). Grundvärden för de kritiska tidsavstånden redovisas i tabell 3.1.

**Tabell 3.1.** Grundvärden på kritiskt tidsavstånd. 10% tunga fordon. Värden inom parentes avser Hansson (1975).

| Hastighet på överordnad led | 30/50 km/tim  |           | 70 km/tim     |           | 90 km/tim     |           |
|-----------------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| Reglering                   | Väjningsplikt | Stopp     | Väjningsplikt | Stopp     | Väjningsplikt | Stopp     |
| Ö.o. vänstersväng           | 4.8 (5.0)     | 4.8 (5.0) | 5.7 (5.8)     | 5.7 (5.8) | 6.7 (6.5)     | 6.7 (6.5) |
| U.o. högersväng             | 5.0 (4.8)     | 5.7 (5.5) | 5.9 (6.0)     | 6.6 (6.5) | 6.9 (6.7)     | 7.5 (7.2) |
| U.o. rakt fram              | 5.1 (5.2)     | 5.8 (5.8) | 6.0 (6.0)     | 6.7 (6.5) | 7.0 (6.5)     | 7.6 (7.0) |
| U.o. vänstersväng           | 5.3 (5.3)     | 6.0 (6.0) | 6.2 (6.2)     | 6.9 (6.8) | 7.2 (7.0)     | 7.8 (7.5) |

Det framgår att hastighet på överordnad led, regleringsform och typ av manöver bestämmer det kritiska tidsavståndets storlek. För grundvärdena gäller att andelen tung trafik är 10% och att utformningen motsvarar en typkorsning. Grundvärdena korrigeras därefter för avvikelser från detta, dvs. för

- andelen tung trafik,
- radie och anslutningsvinkel för högersvängande
- korsningsstorlek och möjlighet att passera korsningen i två steg
- enkelriktning

■ Ingen av dessa korrekationer är belagda i Hansson (1975)!

Korrektion för tätortsstorlek fanns i tidigare versioner av beräkningsmodellen, men har utgått i den senaste versionen beroende på avsaknad av enkla samband av denna typ. Enligt Hansson

(1975) kunde endast skillnader för Stockholmsområdet säkerställas. Tillägget för korsningar på landsbygd på 0.2 s har lagts direkt på de kritiska tidsavstånden för hastigheten 90 km/tim på överordnad led.

Följtiderna bestäms som 60% av det kritiska tidsavståndet. Detta bör basera sig på Hansson (1975) men anges också av Jessen [1968], se Brilon (1988).

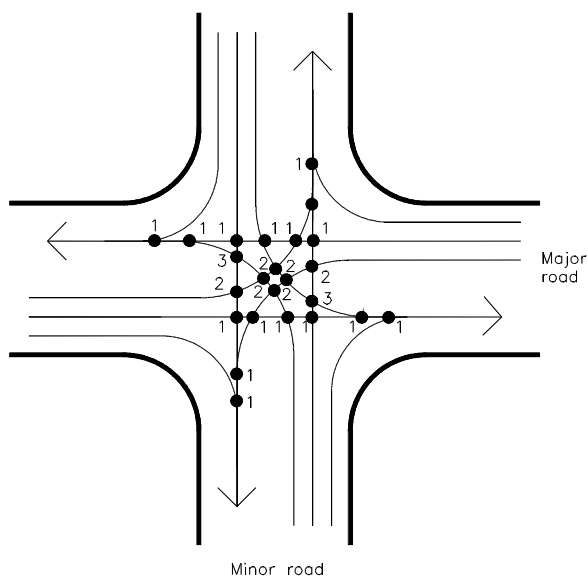
- Beräkningen av betjäningstider baseras på antaganden om hur de överordnade tidsavstånden är fördelade. Då endast en överordnad ström föreligger antas en Tanner-fördelning. För övriga fall antas tidsavstånden vara exponentialfördelade. Antagandena är inte orimliga men några fältmätningar av detta är ej gjorda.  $\Delta$ -värdet är satt till 1.8 s.

Betjäningstiderna beräknas för de två fallen när det finns en kö i den underordnade tillfarten respektive kö saknas. Då tidsavstånden är Tanner-fördelade beräknas emellertid endast betjäningstiden då det finns kö.

- Vid förekomst av bred vägren kan högersvängande fordon utnyttja denna som accelerationskörfält. Betjäningstiden antages vara linjärt beroende av det överordnade flödet.

Då belastningsgraden är under 1 blir den genomsnittliga betjäningstiden för ett fordon beroende av betjäningstiden vid kö respektive när det ej förekommer någon kö. Medelvärdet kan beräknas om belastningsgraden är känd. Ett approximativt uttryck för belastningsgraden ges av produkten av betjäningstiden när kö saknas och det underordnade flödet.

Ett särskilt problem för tre- och fyrvägs korsningar är att de underordnade strömmarna kommer att tillhöra olika prioritetsnivåer. Så är t.ex. en vänstersväng från underordnad led underordnad raktframkörande fordon från motstående tillfart, som i sin tur är underordnade vänstersvängande på överordnad led osv. Se figur 3.2 för en definition av ordningen på konflikterna. Denna hierarki ger upphov till ett besvärligt kösystem (köer med förtur). I CAPCAL görs en korrigering av betjäningstiden för en underordnad fordonsström som beror av belastningsgraden i de sekundärt överordnade strömmarna.



**Figur 3.2. Definition av konflikter. Siffrorna anger konflikternas ordning.**

- Betjäningstiden för högersvängande och raktframkörande på överordnad led beräknas som ett viktat medelvärde av betjäningstiden för personbilar och tunga fordon. Tunga fordon har därvid

åsatts en betjäningstid som är dubbelt så stor som den för personbilar. Denna är ekvivalent med  $\Delta$ -värdet. pbe-värdet för lastbilar är ej dokumenterat men överensstämmer med tillgängliga källor (se nedan).

Då en trafikström har mer än ett körfält till sitt förfogande måste denna fördelas på dessa körfält. Detta görs så att belastningsgraden i varje körfält inom en deltillfart blir lika<sup>3</sup>. Principen är således enkel men ger upphov till en rad specialfall beroende på trafikströmmarnas storlek och körfältsmarkeringarna. För beräkning av belastningsgraden utnyttjas de tidigare beräknade betjäningstiderna. Betjäningstider för fordon på överordnad led baseras på den ovan angivna betjäningstiden med tillägg för geometrisk fördröjning.

När trafikströmmarna är fördelade per körfält kan kapaciteten bestämmas – kapaciteten är nämligen beroende av betjäningstiderna och då dessa skiljer sig åt för de olika trafikströmmarna måste således fördelningen per körfält göras innan kapacitetsberäkningen. Kapaciteten påverkas också av utformning och trafikförhållandena i det aktuella körfältet. I detta steg korrigeras för inverkan av cyklisterna i körfältet, körfältsbredd och körfältsmarkering samt för lutning. Korrekctionerna är desamma som används för signalreglerade korsningar.

Om något av körfälten har begränsad magasinslängd kan detta innebära att kapaciteten blir reducerad på grund av att en trafikström blockerar en annan. Detta beräknas i ett särskilt steg. Den rutin som används är inte generell och klarar således ej alla fall.

Därefter beräknas framkomlighetsmått, se kapitel 8.

### 3.2.2 Övriga nordiska länder

De modeller som används i de övriga nordiska länderna (se Aakre 1997, Aagaardh 1997 och Pur-sula 1997) liknar i stor utsträckning CAPCAL och refereras ej närmare här.

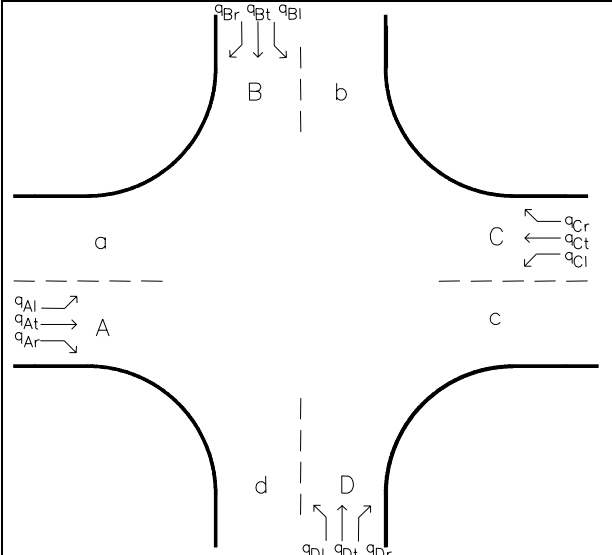
### 3.2.3 Tyskland

Den tyska manualen är dokumenterad av Brilon, Grossman och Blanke (1994). Manualen har stora likheter med TV131, sambanden ges genom diagram och tabeller motsvarande de som finns på sidan 7.5 i TV131. Manualen anger följande faktorer som de som har störst inverkan på kapaciteten:

- Reglering: företrädesregler, hastighetsgräns.
- Trafikförhållanden: trafikflöden för de olika fordonstyperna.
- Geometrisk utformning: lutning, korsningsvinkel, siktsträcka, antal körfält

Beräkningen av överordnat flöde görs relativt likartat CAPCAL, se figur 3.3. Kommentarer<sup>1)</sup>, <sup>2)</sup> och <sup>3)</sup> till figuren förefaller väl motiverade medan kommentar<sup>4)</sup> är något förvånande. Kommentaren innebär att företrädesreglerna skulle vara olika för stopp- respektive väjningsplikt.

<sup>3</sup> En deltillfart definieras som en grupp av körfält som har en körriktning gemensam. Se Vägverket (1995a) för en illustration av begreppet.

|  | Under-<br>ordnad<br>ström                                                                                            | Överordnade strömmar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | $q_{Ai}$<br>$q_{Br}$<br>$q_{Bt}$<br>$q_{Bi}$<br>$q_{Ci}$<br>$q_{Cl}$<br>$q_{Di}$<br>$q_{Dt}$<br>$q_{Dr}$<br>$q_{Di}$ | $q_{Ci} + q_{Cr}^{(3)}$<br>$q_{Ci}^{(2)} + 0,5q_{Cr}^{(1)}$<br>$0,5q_{Ar}^{(1)} + q_{At} + q_{Ai} + q_{Cr}^{(3)} + q_{Ci} + q_{Cl}$<br>$0,5q_{Ar}^{(1)} + q_{At} + q_{Ai} + 0,5q_{Cr}^{(1)} + q_{Ci} + q_{Cl} +$<br>$q_{Di}^{(3)} + q_{Dt}^{(4)}$<br>$q_{Ci}^{(2)} + q_{Ar}^{(3)}$<br>$q_{At} + 0,5q_{Ar}^{(1)}$<br>$0,5q_{Cr}^{(1)} + q_{Ci} + q_{Cl} + q_{Ar}^{(3)} + q_{At} + q_{Ai}$<br>$0,5q_{Cr}^{(1)} + q_{Ci} + q_{Cl} + 0,5q_{Ar}^{(1)} + q_{At} + q_{Ai} +$<br>$q_{Br}^{(3)} + q_{Bt}^{(4)}$ |

**Figur 3.3. Definition av överordnat flöde, tyska manualen.** A, B, C och D är tillfarter. a, b, c och d är frånfarter. <sup>1)</sup> Om denna ström har separat körfält inräknas den ej. <sup>2)</sup> Vid flera körfält för denna ström ingår endast flödet i det högra körfältet. <sup>3)</sup> Om denna ström är avskild med refug vid utfarten inräknas den ej. <sup>4)</sup> Vid stoppreglering inräknas ej denna ström.

Vid beräkningen av det överordnade flödet görs en konvertering till fordonsenheter. Tabell 3.2 ger en översikt av pbe-värden.

**Tabell 3.2. pbe-värden, tyska manualen. Medelvärde används då fördelningen på fordonstyper ej är känd.**

| Fordonstyp | MC  | Pb  | Lb  | Lbs | Medelvärde |
|------------|-----|-----|-----|-----|------------|
| Pbe-värde  | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 1.1        |

Inverkan av lutning görs genom att ändra de pbe-värden som anges i tabell 3.2. Ett grundvärde på kapaciteten kan därefter bestämmas genom diagram där flöde (fordonsenheter/timme) och hastighetsgräns utgör ingångsparametrar. Inverkan av anslutningsvinkel och siktsträcka görs genom ett tillägg till hastighetsgränsen. Vid siktsträcka över 120 meter respektive vid anslutningsvinkel 90° är tillägget 0 km/timme.

Grundvärdet måste därefter korrigeras med avseende på konflikter av olika ordning. Skillnaden mot CAPCAL består huvudsakligen i att korregeringsfaktorerna – exklusive de för andra ordningens konflikter (vänstersvängande från överordnad led respektive högersvängande från underordnad led) som beräknas med utgångspunkt från belastningsgraden – är baserade på simulering och ej på belastningsgrader. I den tyska manualen rangordnas de olika strömmarna istället för konflikterna vilket ger en enklare beskrivning.

Kapaciteten för ett körfält beräknas som ett vägt medelvärde av kapaciteten för de ingående strömmarna, dvs. på samma sätt som i CAPCAL. Endast ett körfält tillåts för underordnad led enligt manualen.

I en bilaga till manualen redovisas bakomliggande samband. En mer utförlig beskrivning är gjord av Brilon och Grossmann (1988) och Brilon (1991). De kritiska tidsavstånd som används vid hastighetsgränserna 50, 70 och 90 km/timme redovisas i tabell 3.3 (kritiska tidsavstånd för hastighetsgränserna 40, 60 och 80 km/timme förekommer också). Dessa kritiska tidsavstånd baseras

på en undersökning av Harders [1976], se Brilon (1988). Någon skillnad i kritiska tidsavstånd mellan väjningsplikt och stopplikt kunde ej finnas. De tyska kritiska tidsavstånden är större än de svenska även om de jämförs med de som gäller för stopplikt (se tabell 3.1). Dessutom är de svenska värdena normerade för 10% tung trafik medan de tyska enbart avser personbilar. Kritiska tidsavstånd för tunga fordon fås genom en korrigeringsfaktor. Även följdtiden korrigeras på detta sätt. Korrigeringsfaktorn är här 1.6 respektive 2.1 vilket ger avsevärt större följdtider än de svenska. För vissa kombinationer blir följdtiden lika stor som eller till och med större än det kritiska tidsavståndet. Det kritiska tidsavståndet och följdtiden uppges ej vara beroende av det över- och underordnade flödes storlek.

Kapacitetsberäkningen baseras på formel (2.6.6) till skillnad mot CAPCAL som baseras på formel (2.6.8). Det överordnade flödet antas vara exponentialfördelat.

**Tabell 3.3. Kritiska tidsavstånd enligt den tyska manualen (Brilon, Grossman och Blanke 1994). Inom parentes de svenska värdena vid företrädesreglering.**

| Hastighet på överordnad led | 50 km/tim | 70 km/tim | 90 km/tim |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ö.o. vänstersväng           | 5.2 (4.8) | 6.5 (5.7) | 7.8 (6.7) |
| U.o. högersväng             | 5.8 (5.0) | 7.2 (5.9) | 8.7 (6.9) |
| U.o. rakt fram              | 5.8 (5.1) | 7.3 (6.0) | 8.7 (7.0) |
| U.o. vänstersväng           | 6.4 (5.3) | 8.0 (6.2) | 9.6 (7.2) |

### 3.2.5 USA

Den amerikanska metoden finns beskriven i Highway Capacity Manual – HCM (Transportation Research Board 1994). Metoden är lik såväl den svenska som den tyska metoden.

Beräkningen av det överordnade flödet skiljer sig en del från den svenska. Hälften av det högersvängande överordnade flödet inberäknas i det överordnade flödet för de underordnade fordonen på samma sida av korsningen. Däremot inräknas endast hälften av flödet i högersvängande och raktframkörande strömmar i det överordnade flödet för vänstersvängande från underordnad led.

De kritiska tidsavstånden, som anges gälla för 30 mph, är i stort sett desamma som de som används i den tyska metoden vid 50 km/timme. Den beräknade kapaciteten korrigeras för sekundärkonflikter enligt den tyska metoden.

I den nya versionen av HCM (Transportation Research Board 1998) har en hel del ändringar gjorts

- Formel (2.6.8) används i stället för (2.6.6)
- Konvertering till personbilsenheter görs ej för överordnat flöde
- Korrigering av kritiskt tidsavstånd görs för tunga fordon, lutning och passage i två steg
- Inverkan av fotgängare behandlas genom att en blockeringsfaktor, svarande mot belastningsgraden, beräknas som funktion av fotgängarflöde, gånghastighet och körfältsbredd
- För underordnade strömmar blir både fotgängarströmmen i tillfarten och i frånfarten överordnade.
- Inverkan av trafiksignaler
- Passage i två steg (enligt Brilon, Wu och Lemke 1996, se nedan)
- Korta körfält

Kyte et al (1994) redovisar mätningar av kritiska tidsavstånd och följdtider i tre- och fyrvägs korsningar. Intressant är att de angivna värdena för de kritiska tidsavstånden är så låga, både jämfört med HCM 1985 och med CAPCAL. Värdena för högersvängande fordon i fyrvägs korsningar är i genomsnitt knappt 4 s. HCM 94 anger 5,5 s. Följdtiderna är mer i överensstämmelse med de som anges i HCM.

Kyte (1997) anger en rad förändringar i HCM 1997. Bland annat överges Sieglochs metod till förmån för formel (2.6.8). Vidare korrigeras det kritiska tidsavståndet för bland annat andel tung trafik och för lutning och följdtiden för andel tunga fordon.

Kyte och Tan (1998) redovisar inverkan av diverse förändringar i HCM 1997, bland annat effekter av trafiksignaler uppströms korsningen, passage av korsningen i två steg och breddökning i tillfarten (dvs. korta körfält).

Kyte et al. (1996a) redovisar en komplett beräkningsmodell för korsningar med stopplik (TWSC). I denna rapport går ett antal olika modeller för kapacitets- och fördröjningsberäkning igenom. Vidare görs en grundlig genomgång av hur mätdata samlats in och bearbetats. Slutligen föreslås en ny beräkningsmodell.

De kapacitetsmodeller som befanns vara bäst var de som baserades på exponentialfördelade tidsavstånd. Hur andelen fria fordon beräknades framgår ej och det bör noteras att hur bra en modell med fria fordon för en ström representerar en situation med flera överlagrade strömmar beror på skattningarna av de ingående parametrarna.

Ett stort antal faktorer undersöktes med avseende på deras inverkan på det kritiska tidsavståndet. De som befanns ge en signifikant inverkan var:

- antalet körfält på överordnad led
- andelen högersvängande på den överordnade tillfarten från höger
- antal tillfarter (tre eller fyra)
- lutning
- anslutningsvinkel
- fördröjning för det underordnade fordonet
- tunga fordon
- olika överordnade fordonsströmmar

Den sistnämnda faktorn kvantifierades dock ej. Följdtiderna sattes i relation till de kritiska tidsavstånden och det konstaterades att förhållande mellan följdtiden och det kritiska tidsavståndet var i storleksordningen 0.6. Följdtiderna för tunga fordon var ca 1 s längre än för personbilar. Rekommenderade kritiska tidsavstånd och följdtider återges i tabell 3.4.

De olika överordnade strömmarnas relativa inverkan diskuteras i rapporten. Undersökningarna koncentrerades på strömmarna på överordnad led. Ytterligare ett motiv för detta var att dessa strömmar är normalt de som har störst flöde. För högersvängande beräknades en korrigeringsfaktor på ca 0.5, dvs. ungefär samma som den som används i HCM. För raktframkörande strömmar bestämdes korrigeringsfaktorn till  $(\text{antal körfält})^{-1}$ . Också en korrigeringsfaktor baserad på körfältsfördelningen beräknades. Båda metoderna gav tillförlitliga resultat.

**Tabell 3.4. Rekommenderade kritiska tidsavstånd och följdtider från Kyte et al. (1996).**

| Trafikström                                | Ö.o. vsv. | U.o. hsv. | U.o. rfr | U.o. vsv. |
|--------------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Överordnad tillfart med ett körfält        |           |           |          |           |
| Kritiska tidsavstånd                       |           |           |          |           |
| Personbilar                                | 4.1       | 6.2       | 6.5      | 7.1       |
| Tunga fordon                               | 5.1       | 7.2       | 7.5      | 8.1       |
| Lutning %                                  | -         | 0.1       | 0.2      | 0.2       |
| Trevägs korsning                           | -         | -         | -        | -0.7      |
| Följdtider                                 |           |           |          |           |
| Personbilar                                | 2.2       | 3.3       | 4.0      | 3.5       |
| Tunga fordon                               | 3.1       | 4.2       | 4.9      | 3.4       |
| Överordnad tillfart med mer än ett körfält |           |           |          |           |
| Kritiska tidsavstånd                       |           |           |          |           |
| Personbilar                                | 4.1       | 6.9       | 6.5      | 7.5       |
| Tunga fordon                               | 6.1       | 8.9       | 8.5      | 9.5       |
| Lutning %                                  | -         | 0.1       | 0.2      | 0.2       |
| Trevägs korsning                           | -         | -         | -        | -0.7      |
| Följdtider                                 |           |           |          |           |
| Personbilar                                | 2.2       | 3.3       | 4.0      | 3.5       |
| Tunga fordon                               | 3.2       | 4.3       | 5.0      | 3.5       |

För sekundärkonflikter kunde konstateras att HCM hanterar vänstersvängande från överordnad led korrekt, dvs. det görs ingen dubbelräkning av denna ström. Den beräknade kapaciteten var i allmänhet högre än den observerade. Detta hanterades genom att korrigera den överordnad vänstersvängande strömmens storlek. Korrigeringsfaktorn för detta beräknades till 2.0.

Också fördröjningen undersöktes, redovisning och diskussion av denna behandlas ej i denna rapport.

### 3.2.5 Australien

Akçelik och Besley (1999) har beskrivit beräkningsprogrammet SIDRA. Beskrivningen är i huvudsak inriktad på att beskriva indata och utdata och saknar i princip uppgifter om beräkningsmetoden. Enstaka uppgifter ges om t.ex. kritiska tidsavstånd.

I AUSTROADS (1988) anges uppgifter om kritiska tidsavstånd och följdtider. Dessa är ej uppdelade på hastighetsklasser och ej heller fullt ut på körriktning, varför en jämförelse med svenska värden är svår att göra. Kapaciteten beräknas enligt formel (2.6.8) med exponentialfördelade tidsavstånd på överordnad led.

### 3.2.6 Polen

Den polska metoden har redovisats av Tracz (1991). Metoden bygger på tidigare, ej citerade arbeten samt på kompletterande studier (begränsade fältmätningar och simulering). Beräkningsstegen motsvarar de som finns i CAPCAL:

- Indatabeskrivning
- Beräkning av överordnat flöde
- Bestämning av kritiska tidsavstånd
- Beräkning av kapacitet
- Beräkning av framkomlighetsmått

Hälften av det högersvängande flödet på överordnad led räknas till det överordnade flödet, ett förfarande som bygger på fältmätningar. Tidsavståndsfördelning för det överordnade flödet anges ej. De korrigeringar som görs för olika utformning är hämtade från HCM 1985.

Den beräknade kapaciteten korrigeras för sekundärkonflikter, fotgängarflöde, körfältsbredd osv. Korrigeringen för fotgängare avviker från den svenska, som inräknar fotgängarna i det överordnade flödet. Senare studier av bland andra Gaca et al. (1998) refereras nedan.

### 3.3 Övriga mikromodeller

I detta avsnitt redovisas studier av enskilda delar av en kapacitetsmodell för korsningar med stopp- eller väjningsplikt. Referenser som behandlar förändringar avseende den grundläggande interaktionen mellan under- och överordnade fordon redovisas i avsnitt 7.2.

#### Definition av överordnat flöde

Prevedouros (1988) anger en definition som avviker bland annat från den som används i CAPCAL. Det överordnade flödet anges vara detsamma för alla de underordnade strömmarna. Den högersvängande strömmen kompenseras för detta genom att den antas kunna köra ut i skydd av ett vänstersvängande fordon. Några empiriska resultat som stöder dessa antaganden redovisas ej.

#### Tidsavstånd i överordnat flöde

Prevedouros (1988) använde en Erlang-3 fördelning i sin kapacitetsmodell. Valet av fördelning baserades på en litteraturstudie.

Zhang (1988) modellerade ett icke-stationärt flöde som en sinusfunktion på intervallet  $[\pi/6; 4\pi/6]$ , dvs. så att det största flödet var dubbelt så stort som det minsta. Vid simulering med denna funktion slumpades flöden i intervaller om en minut genom att multiplicera det flöde som sinusfunktionen gav med ett rektangelfördelat slumptal i intervallet  $[0,5; 1,5]$ . Förfarandet förefaller att vara ganska godtyckligt men de erhållna tidsserierna liknar rätt väl faktiskt uppmätta förhållanden, jämför t.ex. figur 2 i Zhang (1988) med figur 6.3 i Hagring (1998b). Tidsavstånden inom intervallet angavs vara M2-fördelade. Icke-stationärt överordnat flöde gav större kapacitet än motsvarande stationära flöde. Detta resultat stämmer väl med enklare analytiska beräkningar. Icke-stationärt flöde innebär att flödet är större än medelvärdet under en del av tiden och mindre under en del av. Extremfallet, dvs. två perioder av lika längd med flödet 0 respektive  $2q$ , motsvarar en trafiksignal. Den kapacitetsökning som en trafiksignal ger kan därför sägas vara en effekt av att ett förhållandevis stationärt flöde omvandlas till ett extremt icke-stationärt flöde. Effekten av kolonnbildning i det överordnade flödet undersöktes också. Ökad kolonnbildning gav större kapacitet.

Gaca och Chodur (1988) har undersökt samma fenomen, också de med simulering, och fått motsvarande resultat. Den ökning i kapacitet som icke-stationärt flöde gav befanns vara proportionell mot standardavvikelsen för flödet beräknat på enminutersintervall.

Akçelik och Chung (1994) kalibrerade M3-fördelningen för ett dataset bestående av tidsavståndsmätningar i sex olika korsningar.  $\Delta$  skattades till 1.5 s och  $\alpha$  som exponentiellt beroende av flödet. Tyvärr anges varken skattningsmetoden eller några statistiska godhetstal i artikeln. Kalibreringar har också gjorts av Sullivan och Troutbeck (1994) och Hagring (1998b).

Fasching (1997) konstaterade att flödet i primärt överordnade strömmar adderas, t.ex. i HCM, men att inverkan på underordnad ström måste bli olika om flödet är lika fördelat på t.ex. två körfält än om flödet är snedfördelat. Om flödet är jämnt fördelat är sannolikheten större att mer än

ett fordon passerar samtidigt och kapaciteten borde därvid bli större än vid en ojämn fördelning. Fasching hanterar detta genom att reducera flödet i de olika primärt överordnade strömmarna med hänsyn till sannolikheten att de passerar konfliktpunkten samtidigt. Denna metod ger beräkningsmässigt ett resultat som liknar de som fås om man superpositionerar de olika strömmarna. Skillnaden mellan de båda angreppssätten blir stor om man antar att varje ström har exponentiellt fördelade tidsavstånd – superposition ger nämligen då det resultat som Fasching anger vara felaktigt och därför korrigerar för.

### Inverkan av trafiksignaler

Trafiksignaler ger upphov till brutna flöden. Inverkan på kapaciteten är densamma som av icke-stationärt flöde, dvs. en kapacitetsökning. Beroende på att antalet inverkanfaktorer är så stort blir härledningen av samband omständlig.

Virkler et al. (1991) har undersökt effekterna av signalreglering på kapaciteten i stopp- och väjningspliktiga korsningar. Huvuddelen av arbetet är koncentrerat på skattning av flödesvariationer under en signalcykel.

Robinson et al. (1997) redovisar en metod för beräkning av effekterna av trafiksignaler på överordnad led.

Gaca et al. (1998) skilde ut en rad olika flödesfall och studerade dessa genom simulering. Som väntat blev fördröjningen lägre då en trafiksignal påverkade det överordnade flödet. Lägst fördröjning uppstod där signalerna var synkroniserade i den meningen att kolonnerna anlände samtidigt till den ej signalreglerade korsningen. Tracz (1998) undersökte den modell som Robinson (1997) et al. utvecklat med simulering och fann relativt stora avvikelser. Modellen korrigerades på några punkter och gav därefter ett resultat som stämde bättre överens med simuleringsresultaten.

### Kritiska tidsavstånd och följdtider

Mätningar av kritiska tidsavstånd i Frankrike har gjorts av Lasarre et al. (1991). Storleken på de kritiska tidsavstånden är i nivå med de som används i CAPCAL. Inverkan av olika faktorer, t.ex. det överordnade flödets storlek diskuteras. Jirava och Karlicky (1988) anger kritiska tidsavstånd för Tjeckoslovakien. Ingen närmare redogörelse lämnas för hur dessa beräknats. Brilon, Troutbeck och Tracz (1997) har graderat reliabiliteten för olika mätningar och sammanställningar av kritiska tidsavstånd på landsnivå, men ej angivit något värde för de tjeckoslovakiska värdena!

Hamed et al. (1997) använde dels en probit-modell, dels en modell baserad på livslängdsfunktionen, för att skatta inverkan av en rad oberoende faktorer, bland annat vissa socio-demografiska faktorer som ålder, hushållsstorlek och inkomst. Detta gjordes genom att förarna stoppades och intervjuades. Inverkan av förarens ålder, kön, ändamål med resan, tid på dagen och fordonsålder befanns vara signifikanta i någon eller båda modellerna.

Aagaard (1995) har mätt kritiska tidsavstånd och följdtider i några danska korsningar. Resultaten överensstämmer ganska väl med de svenska värdena och också med de värden som anges i den danska beräkningshandledningen (se Aagaard 1995 för den senare jämförelsen). Inverkan av bland annat det överordnade flödets storlek och uppmätt hastighet på de kritiska tidsavstånden kunde konstateras.

Harwood et al. (1997) redovisar mätningar av kritiska tidsavstånd i korsningar med stopplikht. Analyserna är gjorda med Raff's metod och med logistisk regression, där åtminstone Raff's metod är flödeskänslig.

Gaca et al. (1998) redovisar resultat från mätningar av kritiska tidsavstånd i 32 korsningar i Polen. Totalt mättes 34 000 kritiska tidsavstånd! Skattningarna gjordes med maximum likelihood metoden. En del resultat stöder Hanssons (1975) mätningar eller de samband som finns i CAPCAL, bland annat att flera körfält på överordnad led ger större kritiska tidsavstånd, att ökad hastighet för överordnade strömmar ger större kritiska tidsavstånd (bortsett från vänstersvängande från överordnad led) och att tunga fordon har ca 1 sekunds längre kritiska tidsavstånd medan andra resultat avviker eller berör inverkan av faktorer som Hansson (1975) ej studerade. Till exempel erhöles ingen skillnad mellan stopp- och väjningsplikt. De kritiska tidsavstånden är av samma storleksordning som de svenska. Det samma gäller följdtiderna, med undantag för de tunga fordonen som ligger högre.

Tian et al. (2000) redovisar mätningar av kritiska tidsavstånd. De konstaterar att de faktorer som främst påverkar det kritiska tidsavståndets storlek är om korsningen har två eller flera körfält, lätning, fordonstyp, riktning samt fördröjning för den aktuella strömmen. Med ökad fördröjning minskar det kritiska tidsavståndet. Större korsningar ger ökat kritiskt tidsavstånd. Kritiska tidsavstånd för lastbilar är genomgående högre än för personbilar.

Weinert (2000) mätte kritiska tidsavstånd i korsningar på landsbygd i Tyskland. Samband mellan kritiska tidsavstånd och några utformningsvariabler kunde etableras i några fall, i huvudsak dessa: skillnad mellan stopp och väjning (högersvängande och vänstersvängande fordon, följdtime), tre- eller fyrvägs-korsning (högersvängande fordon, följdtime), tätort/landsbygd (vänstersvängande från överordnad led, raktframkörande samt vänstersvängande, kritiska tidsavstånd), antal körfält på underordnad led (raktframkörande, kritiska tidsavstånd) och det överordnade flödets storlek (vänstersvängande från överordnad led, raktframkörande samt vänstersvängande från underordnad led).

Wang (2000) mätte kritiska tidsavstånd och deras beroende av såväl det överordnade som det underordnade flödets storlek men fann inga signifikanta skillnader. Ur resultaten kan det utläsas att belastningsgraden var låg, ca 0.4 som högst, vilket kan vara en förklaring till att något samband ej hittades.

### Etappvis korsande av överordnad led

I CAPCAL tas hänsyn till om det finns en så bred mittrefug att korsande fordon kan magasineras tvärs denna och på så sätt passera korsningen i två steg. En mer generell ansats har utvecklats av Brilon, Wu och Lemke (1996). Denna bygger på en tillståndsbildning av magasinet och att flödet in = flödet ut. Om magasinet har plats för ett fordon följer lösningen direkt ur detta medan lösningen för ett magasin med flera platser är mer komplicerad.

### Sekundärkonflikter

Brilon och Grossmann (1991) åstadkom en lösning på detta problem genom simulering. Bonneson et al. (1997) har undersökt sekundärkonflikternas inverkan på fördröjningen. En exakt, analytisk lösning på detta problem gavs av Wu (1998). Lösningen bygger på antagandet om ett M/G/1-system och att de olika underordnade strömmarna samlas till en enda kö. Den exakta lösningen ges för ett M/M/1-system. Denna metod, den metod som användes i HCM 1997 samt den enkla metod som används bl.a. i CAPCAL har jämförts med de resultat som erhålls med simuleringsprogrammet KNOSIMO (Grossman 1991). Wus lösning kan då visas vara överlägsen de båda andra. Skillnaderna är emellertid ganska små, dvs. de approximativa lösningarna innebär i genomsnitt inga stora fel. Däremot så kan det för enskilda fall, exempel ges av Wu (1998), bli stora fel. Den analytiska lösningen är en gardering mot detta och däri ligger ett stort värde. Tracz och Gondek (2000) visade emellertid, med hjälp av simulering, att Wu's metod inte alltid ger tillfredsställande resultat. Avvikelserna är dock inte närmare angivna.

## Korta körfält

Robinson et al. (1997) redovisar ett enkelt samband för att beräkna kapaciteten för ett kort körfält. Kapaciteten i det korta körfältet ges av

$$C = C_N \frac{n}{N} \quad (3.3.1)$$

där  $C_N$  är kapaciteten för ett körfält av obegränsad längd, och  $n$  respektive  $N$  längd och kölängd för det korta körfältet (lämpligen beräknat som fordon eller fordonsenheter). Wu (1997b) har utvecklat en mer generell metod som bygger dels på en tillståndsbeskrivning i förgreningspunkten och dels på teorin för M/M/1-kösystem. Metoden är användbar också då systemet innehåller flera förgreningspunkter eller flera korta körfält, något som t.ex. inte CAPCAL kan hantera. En rimlig bedömning är att detta problem nu kan betraktas som teoretiskt löst, givet att de förutsättningar som angivits inte avviker för mycket från de faktiska. En sådan avvikelse är bland annat att modellen – liksom de flesta modeller – är en medelvärdesmodell. Modellen lämpar sig emellertid väl för kontroll genom simulering. En sådan kontroll har genomförts och visat att modellen ger en mycket god beskrivning av de simulerade situationerna.

Prevedouros (1988) har också utvecklat en modell för korta körfält. Av allt att döma är ovanstående modell av Wu (1997) mera generell.

## Fördelning av trafik på deltillfarter

Om en deltillfart har en fordonsström gemensam, vanligen raktframkörande trafik, så behövs en algoritm för fördelningen av den gemensamma fordonsströmmen på de olika körfälten. Fyra olika ansatser finns beskrivna i litteraturen:

1. Fördelning efter väntetid. Denna modell har föreslagits av Fisk (1991). Den kan motiveras med att väntetiden (eller snarare restiden eller fördröjningen) är ett mått direkt relaterat till trafikanternas värdering av trafiksystemet.
2. Fördelning efter belastningsgrad. Detta innebär att flödena fördelas så att belastningsgraderna i de olika körfälten i deltillfarten blir lika. Denna metod används bland annat i CAPCAL (Vägverket 1995a). Den kan motiveras med att om flödena i de olika körfälten är ungefär lika stora så kommer väntetiden också att bli ungefär lika stor.
3. Fördelning efter faktisk belastning. I svenska tvåfältiga cirkulationsplatser kan observeras att belastningen på det inte körfältet i en tillfart ofta är lägre än belastningen i det yttre. Detta kan vara en indikation på att trafikanterna gör en avvägning mellan säkerhet och framkomlighet, dvs. att en väg med längre restid kan föredras om den upplevs som säkrare. Denna möjlighet finns i SIDRA (Akçelik 1992).
4. En fjärde metod användes i SIDRA. Denna baseras egentligen på att belastningsgraden ska vara lika men kapaciteten i det så kallade subdominanta körfältet är beroende av kapaciteten i det så kallade dominanta körfältet (Akçelik 1992), se vidare avsnitt 6.2.3.

## Tunga fordon

Effekter av tunga fordon kan modelleras på flera sätt. Vad gäller kritiska tidsavstånd och följdtider så anges t.ex. i CAPCAL att tunga fordon har ett kritiskt tidsavstånd som är 1 sekund större än för en personbil. Följdtiden blir då 0.6 sekunder längre. Vid kapacitetsberäkningen används ett vägt medelvärde. Fisk (1990) har härlett ett samband där kapaciteten kan beräknas utan föregående medelvärdesberäkning och visat att den metod som används i CAPCAL kan ge ganska stora avvikelser beroende på trafiksammansättningen. Resultaten är inte direkt jämförbara med den modell som använts i CAPCAL eftersom de samband som härletts också explicit behandlar ande-

len tung trafik på överordnad led och det tidsavstånd i kolonn som är knutet till dem. Troutbeck (1993b) har utfört en liknande härledning men baserad på att inverkan av olika fordonstyper för underordnad ström kan beräknas genom det viktade harmoniska medelvärdet av kapaciteten för dessa fordonsslag. För överordnad fordonsström beräknas effekterna av motsvarande viktade aritmetiska medelvärde. Resultatet blir detsamma som det som härletts av Fisk (1990).

### Fotgängare och cyklister

Marlow och Maycock (1982) beräknade inverkan av ett oreglerat övergångsställe på kapaciteten för en underordnad tillfart till en korsning. Systemet kan betraktas som två seriekopplade kösystem pch inverkan på kapaciteten kunder beräknas under antagandet om exponentialfördelade betjäningstider för de båda kösystemen.

Hoppe och Krystek (1988) har undersökt inverkan av fotgängare på kapaciteten för en vänstersvängande överordnad trafikström. De konstaterar att denna inverkan är stor men dock väsentligt mindre än vad som anges i CAPCAL. Något pbe-värde anges ej. En beräkning baserad på den figur som redovisas ger ett pbe-värde som är lägre än 0.1. Detta kan jämföras med pbe-värdet 0.5 som används i CAPCAL. Beräkningsförutsättningarna är inte angivna varför resultatens användbarhet är begränsad.

Jørgensen (1991) anger en enkel korrekionsmetod där kapaciteten i tillfarten med hänsyn till fotgängare erhålls genom att kapaciteten utan hänsyn till fotgängare multipliceras med den tidsandel då det ej finns några fotgängare på övergångsstället. Förfarandet förutsätter att biltrafikanterna alltid lämnar företräde åt fotgängarna. För frånfarter beräknas kapaciteten med hjälp av kritiska tidsavstånd, där det kritiska tidsavståndet sätts till uppehållstiden på övergångsstället. För båda fallen är antagandet om att fotgängarna alltid ges prioritet tveksamt, åtminstone för svenska förhållanden. Det är rimligt att anta att företrädesförhållandena varierar med utformningen.

Hunt och Jabbar (1995) beräknade motsvarande inverkan då övergångsstället är signalreglerat. Beräkningen avsåg cirkulationsplatser. Någon principiell skillnad mot en underordnad tillfart i en korsning med stopp- eller väjningsplikt finns inte, annat än att signalreglerade övergångsställen knappast förekommer i denna miljö<sup>4</sup>.

Robinson et al. (1997) redovisar ett enkelt samband för att beräkna inverkan av fotgängare på kapaciteten för biltrafiken. Sambandet baseras på fotgängarflödet, körfältsbredden och gånghastigheten.

Gaca et al. (1998) har utvecklat en modell med samma syfte som Robinson et al. (1997). Sambandet har två huvudsakliga komponenter. Den ena beskriver hur stor andel av tiden som fotgängare blockerar korsningen, den andra komponenten korregerar för samtidig blockering av överordnade fordon. Som resultat fås en faktor som används för att korrigera den beräknade kapaciteten utan fotgängare. Oberoende variabler var bland annat fotgängarflödet, genomsnittlig storlek på fotgängargrupp, bredden på konfliktytan (normalt övergångsstället) och fotgängarnas gånghastighet.

### Överordnade fordons framkomlighet

Raktframkörande och högersvängande fordon på överordnad led är trafikströmmar av ordning ett och drabbas ej av interaktionsfördröjning. Raktframkörande drabbas av fördröjning endast i de fall då man antar att fordonet minskar hastigheten på grund av att framförvarande fordon retarderar och omkörnings- eller förbikörningsmöjligheter saknas. Effekterna på raktframkörande fordon av högersvängande fordon behandlas av Hasan och Stokes (1997). Såväl framkomlighet som sä-

<sup>4</sup> Däremot förekommer övergångsställe på överordnad led intill korsningar.

kerhet behandlas. Problemet har stora likheter med det som inträffar när ett fordon på en sträcka retarderar. Den största svårigheten torde gälla beräkningen av hur många fordon bakåt som en störning fortplantar sig. Detta är i den angivna referensen löst genom simulering.

Bonneson (1997) har undersökt motsvarande problem orsakat av vänstersvägande fordon. Fördröjningen per fordon anges som liten.

### 3.4 Makromodeller

#### 3.4.1 England

Den första ansatsen till utveckling av makromodeller gjordes av Kimber (1976). Genom studier av avvecklingsförhållandena i fem trevägskorsningar<sup>5</sup> kunde han fastställa ett samband mellan kapaciteten för underordnade körfält och storleken på de överordnade trafikflödena. Denna ansats vidareutvecklades av Kimber och Coombe (1980). De skattade en modell enligt formel (2.7.1), där flödet anges i personbilsekvivalenter. Inverkande geometriska parametrar var (något olika samband beroende på vilken av de tre underordnade strömmarna som avses):

- Bredd på underordnat körfält.
- Siktsträcka.
- Bredd på överordnad led.

Definitionerna på dessa framgår av Kimber och Coombe (1980). För högersvägande ström ger vänstersvägande från överordnad led en signifikant påverkan på kapaciteten (observera att detta gäller vänstertrafik). Kapaciteten då det överordnade flödet är noll är ca 700 fordon/timme, dvs. mycket under det som gäller för t.ex. CAPCAL<sup>6</sup>.

Övriga faktorer som undersöktes men som ej befanns inverka på kapaciteten var:

- Lutningar.
- Radier för svängande underordnade fordon.
- Anslutningsvinkel.
- Accelerationskörfält för högersvägande underordnade fordon.
- Trafikmiljö (tätort/landsbygd)
- Trafikflödeskaraktistika.

Ett intressant resultat från denna studie är att konstanterna  $\alpha_i$  i formel (2.7.1) anger en rangordning mellan de olika överordnade strömmarna med avseende på den inverkan de har på den underordnade strömmens kapacitet. Bland annat har strömmen i det borte överordnade körfältet större inverkan än strömmen i det närmre körfältet.

En fyrvägs korsning kan beräknas genom att betrakta den som två förskjutna trevägs korsningar. Inverkan av fotgängare anges som liten.

#### 3.4.2 Övriga

Kyte et al. (1992) har anpassat den engelska makromodellen till amerikanska förhållanden genom mätningar i 12 fyrvägs korsningar med stopplikt. En modell anpassad till fyrvägs korsningar, dvs. då också de överordnade strömmar som saknas i en trevägs korsning inkluderas, gav endast margi-

<sup>5</sup> Fyrvägs korsningar av denna typ anläggs normalt inte längre i England.

<sup>6</sup> Kapaciteten för en ström då samtliga överordnade strömmar är noll fås som  $T_0^{-1}$ .

nett ökad förklaringsgrad. Uppdelning av korsningarna i två hastighetsklasser gav starkare samband för den ena klassen och svagare för den andra. Några andra faktorer undersöktes ej.

Masaeid (1995) utvecklade en modell för beräkning av kapacitet i enkelriktade korsningar med företrädesreglering. Förutom av de överordnade flödena befanns kapaciteten vara beroende av bredden på över- respektive underordnad led samt av hastighet på överordnad led och siktsträcka. Det som gör studien intressant är emellertid att det samtidigt gjordes en skattning av kritiska tidsavstånd och följdtider. Se vidare i avsnitten 3.5.1 och 7.1.

### 3.5 Modelljämförelser

I detta avsnitt görs dels en jämförelse av de i detta kapitel redovisade modelltyperna, dels en genomgång av de referenser där specifika modelljämförelser utförts.

#### 3.5.1 Jämförande studier

Tracz (1988) har gjort en jämförelse mellan den engelska kapacitetsmodellen (PICADY) och en simuleringsmodell, den senare baserad på dels engelska data beträffande kritiska tidsavstånd m.m., dels på polska undersökningar av icke-stationära flöden. Resultaten bekräftar andra studier (se även under cirkulationsplatser), att makromodeller ger högre kapacitet vid höga överordnade flöden och vice versa.

Al-Maseid (1995) har utvecklat en mikro- och en makromodell samt jämfört dessa. Han konstaterade att mikromodellen överskattade kapaciteten kraftigt vid låga överordnade flöden och underskattade kapaciteten måttligt vid höga överordnade flöden. Den direkta orsaken till detta, vilket dock inte kommenteras i artikeln, var att kritiska tidsavstånd och följdtider skattades på hela datamaterialet. Förändringar i dessa båda parametrar beroende på det överordnade flödets storlek beaktades inte.

#### 3.5.2 Modelljämförelser

Det kan konstateras att de svenska, tyska och amerikanska mikromodellerna är förhållandevis lika till sin uppbyggnad. Den svenska metodbeskrivningen är dock mer detaljerad än motsvarande tyska och amerikanska beskrivningar i vissa avseenden. Några viktiga skillnader är följande:

- Överordnat flöde. Definitionerna skiljer sig något åt, bland annat inkluderas i den tyska och amerikanska manualen en del av överordnad högersvängande fordonsström i överordnat flöde trots att konflikt ej föreligger. I Tyskland och USA konverteras överordnat flöde till personbilsenheter (i USA dock ändrat i senaste versionen av HCM) medan oskyddade trafikanter ej inberäknas.
- Kritiska tidsavstånd. Dessa skiljer sig i vissa fall ganska mycket vilket framgår av tabell 3.3. De inbördes förhållandet är dock likartat, t.ex. att de kritiska tidsavstånden ökar med hastighet på överordnad led.
- Följdtider. De tyska följdtiderna är större än de svenska.

I övrigt finns skillnader i t.ex. korrigering av det kritiska tidsavståndet med avseende på geometrisk utformning eller hur sekundärkonflikter hanteras. De skillnader som finns avseende viktiga parametrar som kritiska tidsavstånd och följdtider återspeglar i första hand en skillnad i förarbete-ende och är ur modellsynpunkt av mindre intresse. Möjligen kan en del av skillnaden förklaras med de skattningsmetoder som använts. Mer intressant är de olika modellansatser som förekommer, t.ex. hur tunga fordon behandlas.

Vissa skillnader föreligger också i hur den geometriska utformningen med flera faktorer påverkar kapaciteten. Den svenska metoden är den mest utförliga medan det i den amerikanska knappast finns någon parameter som kan relateras till olikheter i utformning eller trafiksammansättning. Detta behöver inte innebära att den amerikanska metoden är mindre avancerad utan kan avspegla en mindre variation i utformningen än vad som finns i Sverige – anvisningarna för hur anläggningarna utformas och hur de sedan faktiskt byggs kan alltså vara av stor betydelse vid modelljämförelser. Vid undersökning av olika samband bör anläggningar med varierande utformning ingå. Slutsatsen av detta är att det bör vara möjligt att vidareutveckla eller revidera den svenska modellen.

Slutligen kan här nämnas att arbete av Silcock och Borzym (1991) som behandlar optimering av kapaciteten genom förändring av den geometriska utformningen. Optimeringen bygger på kapaciteten, dvs. problemet är linjärt – författarna anger simplex-algoritmen som lösningsmetod. Om fördröjningen ska minimeras eller om optimeringen sker med en objektfunktion baserad på teorin för kritiska tidsavstånd blir problemet besvärligare.

## 4. Korsningar med fyrvägsstopp

Korsningar med fyrvägsstopp är ovanliga och detta gäller också beräkningsmodeller för dessa. Några studier finns dock gjorda.

I en sådan, Salter och Ismail (1991), har kapaciteten i korsningar med två- respektive fyrvägsstopp jämförts genom simulering. De fann att korsningar med fyrvägsstopp hade högre kapacitet än korsningar med tvåvägsstopp, ca 1650 fordon/timme mot 1400 fordon/timme. Fördelningen av flödena per tillfart anges dock inte.

Kyte (1990) har gjort mätningar i ett tjugotal överbelastade korsningar och därefter skattat en makromodell. De faktorer som befanns vara signifikanta i kapacitetssambandet för en tillfart var antal körfält i tillfarten och i motstående tillfart, flödesandelen i tillfarten och motstående tillfart samt andelen vänster- respektive högersvängande för de övriga tillfarterna. I några exempel visas att kapaciteten för en korsning varierar mellan 1950 och 2350 fordon/timme, beroende på andelen svängande och antal körfält i tillfarten. En ökning av antal körfält i varje tillfart från ett till två förändrar kapaciteten måttligt, ökningen är ca 15%. En jämförelse med två äldre metoder visar på en ganska god överensstämmelse. En rimlig bedömning av kapaciteten för denna korsningstyp skulle därmed vara 20 000 fordon/dygn vid ett körfält per tillfart. Som jämförelse kan nämnas att CAPCAL beräknar kapaciteten till 1800 fordon/timme för en stoppliktig korsning vid lika fördelning, ingen svängande trafik och lika fördelning av flödena per tillfart. Detta är ca 200 fordon/timme lägre än för fyrvägsstopp.

Den metod som redovisas i HCM 1994 är i stort sett identisk med den som Kyte (1990) redovisar vad avser inverkan av faktorer. Enda skillnaden, förutom smärre skillnader i konstanternas storlek, är att i HCM anges separata konstanter för andelen svängande från motstående och konflikterande strömmar. Hänsyn till olika utformning tas endast genom att antalet körfält beaktas för den tillfart som beräknas och den motstående tillfarten.

Kyte et al. (1996b) redovisar en komplett beräkningsmodell för korsningar med fyrvägsstopp (AWSC). I denna rapport går ett antal olika modeller för kapacitets- och fördröjningsberäkning igenom. Vidare görs en grundlig genomgång av hur mätdata samlats in och bearbetats. Slutligen föreslås en ny beräkningsmodell.

En helt annan ansats har använts av Wu (2000). Denna bygger på grafteori och på att det finns en konfliktyta i korsningen som används växelvis av de olika strömmarna. Kapaciteten för en viss ström blir då beroende av den tid som ett fordon i de konflikterande strömmarna behöver för att passera konfliktytan samt storleken på dessa. När fotgängare inkorporeras i modellen görs detta på samma sätt som för motorfordon vilket inte är riktigt då sambandet här ej är linjärt. Den tid som ett fordon belägger konfliktytan bestämdes med utgångspunkt från fältmätningar till 3.5 s för enfältiga tillfarter. Kapaciteten för ett körfält kan beräknas som ett viktat medelvärde över de ingående strömmarna. Jämförelser av med denna metod med andra metoder visar på förhållandevis god överensstämmelse. För beräkning av kölängd och fördröjning används traditionell köteori (M/M/1 system).

## 5. Korsningar med högerregel

Korsningar med högerregel förekommer i allmänhet endast på lokalgator med låga trafikflöden varför såväl kapacitets- som fördröjningsberäkningar blir mindre intressanta.

Vägverket (1977) anger två möjliga beräkningsmetoder. Den ena är en mikromodell som baseras på metoden för korsningar med stopp- eller väjningsplikt (enligt anvisningarna är den identisk förutom att alla tillfarter behandlas som underordnade), den andra en makromodell som ger kapaciteten för alla ingående flöden som en funktion av kvoten mellan flödena på de två korsande gatorna samt andelen vänstersvängande. Kapaciteten varierar mellan 1500 och 2000 fordon/timme.

## 6 Cirkulationsplatser

### 6.1 Inledning

Den svenska metoden för beräkning av framkomlighet i cirkulationsplatser saknar i allmänhet referens till fältmätningar. Den första versionen av beräkningsmetoden är beskriven bl.a. av VBB (1975), Vägverket (1977) och Hansson (1980). Den nuvarande beräkningsmetoden, se Vägverket (1995b) och Hagring (1997b) är i stort sett densamma som beskrivs i dessa båda referenser. Denna metod beskrivs inledningsvis. Därefter beskrivs andra nationella beräkningsmetoder, först de som baseras på mikromodeller och därefter de som baseras på makromodeller. Sist följer en genomgång av forskningsinsatser som berör begränsade delar av framkomlighetsberäkningar för denna korsningstyp.

Makromodellerna har blivit allt vanligare för beräkning av kapacitet i cirkulationsplatser eftersom de är enkla att mäta in. Trots att interaktionerna mellan fordonen i en cirkulationsplats kan förefalla enklare än i en tre- eller fyrvägs-korsning är det inte enkelt att beskriva dessa. Olika ansatser har gjorts för att beskriva en del av dessa interaktioner, t.ex. mellan underordnade fordon och de olika överordnade strömmarna i tvåfältiga cirkulationsplatser (Hunt och Jabbar 1979 och Hagring 1998b). Utkörande fordons inverkan på de underordnade fordonens kapacitet har tidigare inte kunnat beräknas med hjälp av mikromodeller. Hagring (2000b) har dock utvecklat en modell för hantering av denna inverkan men den praktiska tillämpningen kräver förnyade fältmätningar.

### 6.2 Beräkningsmetoder baserade på mikromodeller

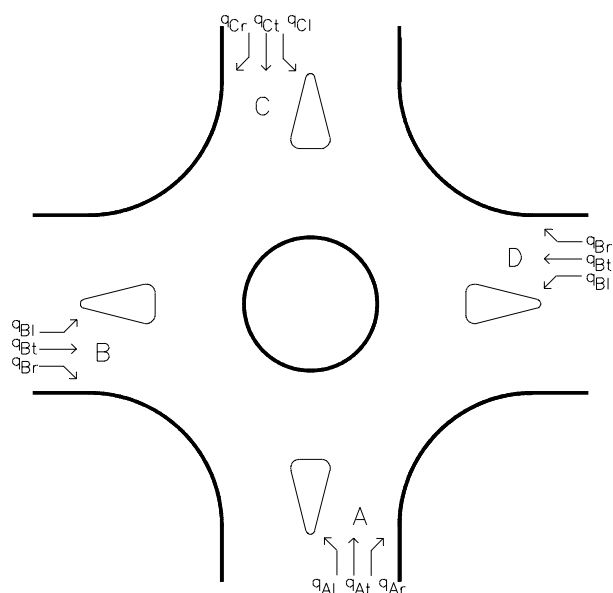
För svenskt vidkommande finns det en del som behandlar cirkulationsplatser. Utöver detta finns det nyligen genomförda studier av cirkulationsplatser i Sverige. För att göra farmställningen komplett redovisas såväl den nu gällande modellen som de nyare mätningarna.

#### 6.2.1 Sverige

Beräkningarna i CAPCAL (Vägverket 1995b) och Hagring (1997b) görs i följande steg, dvs. i princip som för korsningar med stopp- eller väjningsplikt:

- Bestämning av överordnat flöde
- Beräkning av kritiska tidsavstånd och följdtider
- Beräkning av betjäningstid
- Fördelning av trafikflöden på deltillfarter
- Korrigering av betjäningstider med avseende på korta körfält med flera faktorer.

- Bestämningen av det överordnade flödet görs enligt figur 6.1 och tabell 6.1. Notera att man i CAPCAL skiljer mellan cirkulerande och överordnat flöde. Korrektionsfaktorerna  $x_1$  och  $x_2$  är beroende av utformningen av växlingssträckan samt dess till- och frånfarter. Ursprunget till dessa faktorer är ej känt.



**Figur 6.1.** Definition av fordonsströmmar i en cirkulationsplats.

**Tabell 6.1** Definition av överordnat flöde.

| Fordonsström | Cirkulerande flöde         | Överordnat flöde               |
|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| $q_{Di}$     | $q_{Ai} + q_{At} + q_{Bi}$ | $q_{Ai} + q_{At} + q_{Bi}$     |
| $q_{Dt}$     | $q_{Ai} + q_{At} + q_{Bi}$ | $x_1 q_{Ai} + q_{At} + q_{Bi}$ |
| $q_{Dr}$     | $q_{Ai} + q_{At} + q_{Bi}$ | $x_2 q_{At} + x_2 q_{Bi}$      |

- Fotgängare och cyklister som korsar ett övergångsställe, beläget efter väjningslinjen, inräknas i det överordnade flödet med ett pbe-värde på 0.5. Cyklister som färdas med fordonstrafiken ges ett pbe-värde på 0.5 vid beräkning av överordnat flöde.
- Det kritiska tidsavståndet beror av växlingssträckans längd och bredd så att det ökar med längden och minskar med bredden. Sambandet, som är olika för högersvängande fordon och övriga fordon, är utan källhänvisning. Det kritiska tidsavståndet korrigeras för andel tunga fordon på samma sätt som görs för korsningar med stopp- eller väjningsplikt. Följdtiden sättes till 60 % av det kritiska tidsavståndet. I TV131 finns en korrigering för hastighet (50 respektive 70 km/tim) som har utgått.
- Betjäningstiderna vid kö beräknas som ett viktat medelvärde av en betjäningstid härledd från antagandet om exponentialfördelade överordnade tidsavstånd och en betjäningstid vars ursprung är oklart. Vikten är beroende av det överordnade flödet.

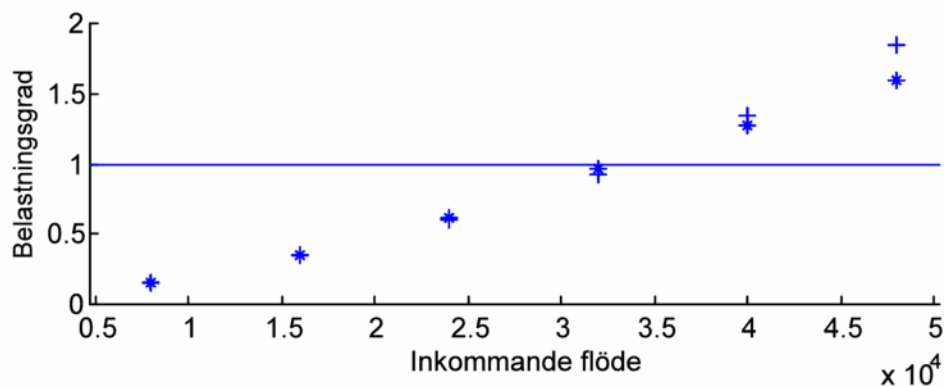
Beräkningarna i övrigt skiljer sig inte från korsningar med stopp- eller väjningsplikt. En viktig restriktion är att växlingssträckans längd inte får vara mindre än 20 meter. Detta motsvarar en diameter på ca 30 meter.

### 6.2.2 Ny svensk modell

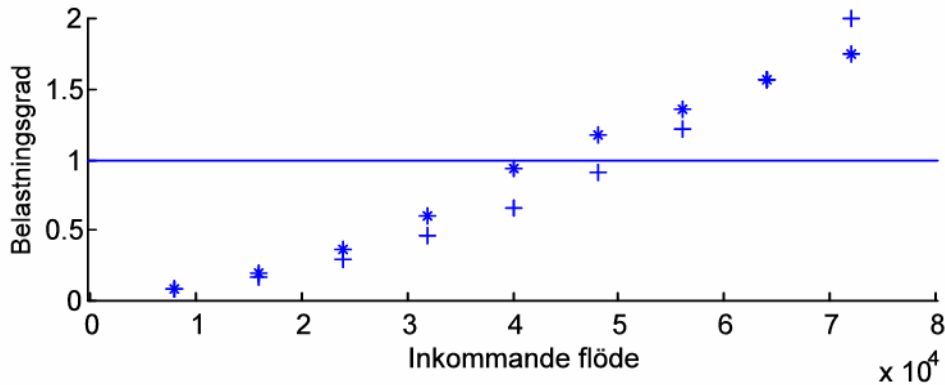
Hagring (1996a, 1998b) har genomfört fältmätningar av cirkulationsplatser i Sverige. Mätningarna har omfattat ca 12 cirkulationsplatser i tätorts- och förortsmiljö. Resultaten från dessa mätningar kan sammanfattas så här:

- Det kritiska tidsavståndet är olika för det högra och det vänstra körfältet i en tvåfältig tillfart. Skillnaden är ca 0.6 s. Dessutom är det kritiska tidsavståndet beroende av växlingssträckans längd och bredd, dvs. samma variabler som i CAPCAL även om sambandet här är helt linjärt. Högersvängande fordon har ca 0.3 s kortare kritiskt tidsavstånd än övriga fordon i det högra körfältet. Direkt jämförelse med CAPCAL är inte möjlig eftersom sambanden för de kritiska tidsavstånden ser olika ut. I genomsnitt visar dock mätningarna på längre kritiska tidsavstånd än vad CAPCAL gör.
- Tunga fordon har ca 1.1 s längre kritiskt tidsavstånd än personbilar.
- Hela det cirkulerande flödet kan betrakats som överordnat. Denna slutsats baseras på studier av det kritiska tidsavståndet uppdelat på det inre och yttre körfältet i en tvåfältig cirkulationsplats. Studierna av de kritiska tidsavstånden med denna uppdelning har visat att de kritiska tidsavstånden för det inre och yttre körfältet är signifikant skilda åt med ca 0.2 s större kritiskt tidsavstånd för det yttre körfältet.
- Det överordnade flödet kan beskrivas som en M3-fördelning. För tvåfältiga cirkulationsplatser kan en generaliserad M3-fördelning användas.  $\Delta$  har skattats till 1.8 s.

Resultaten kan användas till en beräkningsmodell för cirkulationsplatser. Utkast till en sådan finns i Hagring (1996, 2000a). Vid jämförelse med CAPCAL ger den nya modellen lägre kapacitet för tvåfältiga cirkulationsplatser och ungefär samma kapacitet för enfältiga cirkulationsplatser, se figur 6.2 och 6.3. Kapaciteten för en enfältig cirkulationsplats är ca 32 000 fordon/dygn vid lika belastning på alla ben. Vid verkliga förhållanden blir kapaciteten lägre. Att belastningsgraden för den nya modellen är lägre vid höga flöden är beroende av att det görs en begränsning av inkommande flöde så att detta ej överskrider kapaciteten (enligt Fisk 1991). För tvåfältiga cirkulationsplatser ger CAPCAL en högre kapacitet vilket hänger samman med att CAPCAL ej tar hänsyn till de svårare interaktionsförhållandena som gäller för det vänstra körfältet i tillfarten. Observera dock att den nya modellen ger lägre belastningsgrad vid höga flöden (överbelastning på grund av restriktionerna för inflödena).



Figur 6.2 Belastningsgrad för enfältig cirkulationsplats. \*: ny svensk modell, +:CAPCAL. Inkommande flöde i fordon/dygn.



**Figur 6.3** Belastningsgrad för tvåfältig cirkulationsplats. \*: ny svensk modell, +:CAPCAL. Inkommande flöde i fordon/dygn.

Den minsta cirkulationsplats som mättes hade en växlingssträcka på 16 meter, dvs. något lägre än minsta tillåtna värde i CAPCAL. De skattade värdena på kritiska tidsavstånd från denna cirkulationsplats ingick ej i de slutgiltiga analyserna eftersom förarbeteendet bedömdes som alltför avvikande. Den näst minsta cirkulationsplatsen hade en diameter på 37 meter och en växlingssträcka på 25.5 meter, dvs. strax över CAPCALs nedre gräns.

### 6.2.3 Australien

Australien är det land där mest arbete lagts ner på att utveckla mikromodeller för cirkulationsplatser. Forskningen har beskrivits av Troutbeck (1988, 1991) och är implementerad i de nationella anvisningarna (AUSTROADS 1993). Parallellt med Troutbecks forskning och utvecklingen av AUSTROADS anvisningar har utvecklingen av SIDRA pågått. SIDRA (se t.ex. Akçelik 1992) är ett program för kapacitetsberäkningar utvecklat vid ARRB. Mellan SIDRA och AUSTROADS anvisningar finns ett antal skillnader.

AUSTROADS (1993) beräkningsmodell bygger i stor utsträckning på resultat av Troutbeck (1989). Ett grundläggande begrepp är indelningen av de underordnade körfälten i dominant (ett körfält) och subdominanta (ett eller flera körfält), där det dominanta är det som har högst flöde. Följdtiderna i det dominanta körfältet beskrivs som en funktion av cirkulationsplatsens diameter och det överordnade flödet. Det kritiska tidsavståndet bestäms av följdtiden, det överordnade flödet, antalet överordnade körfält och bredden på det underordnade körfältet. Följdtiden i det subdominanta körfältet (vid två eller flera underordnade körfält) bestäms av följdtiden i det dominanta körfältet och förhållandet mellan flödena i de båda körfälten. Tidsavstånden mellan överordnade fordon beskrivs av en M3-fördelning för ett körfält, där  $\Delta$  i princip bestäms av antalet körfält i den överordnade strömmen och  $\alpha$  av storleken på det överordnade flödet och  $\Delta$ .

Den beräkningsmodell som finns i SIDRA är beskriven av Akçelik (1998). Trots att beräkningsmodellen bygger på kritiska tidsavstånd är skillnaderna stora gentemot såväl CAPCAL som den modell som utvecklats av Hagring (1996a, 1998b). I rapporten refereras till arbeten av Troutbeck (bland annat 1989, 1991, 1992b) men det framgår inte alltid hur sambanden tagits fram. Av intressanta skillnader kan följande nämnas:

Följdtiden kan anta ett värde mellan 1.2 och 4.0 sekunder och det kritiska tidsavståndet ett värde mellan 2.2 och 8.0 sekunder. Såväl de undre som de övre värdena är anmärkningsvärda. Beräkningarna av följdtider och kritiska tidsavstånd är förhållandevis intrikata och baseras bland annat på forskning av Troutbeck (1989, 1991, 1992b). Följdtiden för det dominanta körfältet är beroende av cirkulationsplatsens diameter, antalet underordnade respektive överordnade körfält samt det överordnade respektive det underordnade flödets storlek. Sambanden innebär att följdtiden

minskar med ökande flöde och ökande diameter. Följdtiden för ett subdominant körfält beror av följdtiden för det dominanta körfältet och förhållandet mellan flödena i det dominanta respektive det subdominanta körfältet. Det kritiska tidsavståndet är beroende av bland annat det överordnade flödets storlek och följdtiden. Sambanden är således relativt lika de som används i AUSTROADS (1993).

Sambandet mellan kritiskt tidsavstånd och följdtime är dock svagt, vilket visas av mätdata och regressions sambanden ( $R^2$  är 0.027 under 1200 fordon/timme och 0.199 över 1200 fordon/timme).

Det överordnade flödet beskrivs av en M3-fördelning för ett körfält. Om flera körfält förekommer minskar  $\Delta$  från 2.0 sekunder till 1.2 (två körfält) eller 1.0 (fler än två körfält). Värdet på  $\Delta$  i ett överordnat flöde är beroende av hur de strömmar som detta flöde består av ser ut, dvs. värdena på  $\Delta$  och flödet. Andelen fria fordon är exponentiellt beroende av det överordnade flödets storlek.

SIDRA tar också hänsyn till kapacitetsrestriktioner (Fisk 1991) och inverkan av varierande OD-flöden (se nedan).

Det kapacitetssamband som användes är det som utvecklats av Akçelik (1994). Skillnaden mellan detta samband och den traditionella ansatsen, dvs. mellan formlerna (2.6.6) och (2.6.8), avseende kapacitet är mycket liten. Kapacitetssamband av den typ som återfinns i figurerna 6.2 och 6.3 redovisas också. För en enfältig cirkulationsplats anges kapaciteten till ca 2800 fordon/timme och för en tvåfältig till ca 4700 fordon/timme. Motsvarande värden från figurerna 6.1 och 6.2 är 3300 och 4500, beroende på vilken modell som används.

Troutbeck (1989) anger en minsta diameter på ca 20 meter.

#### 6.2.4 USA

List et al. (1994) undersökte en cirkulationsplats i New York State. Kritiska tidsavstånd och följdtider skattades – med bland annat Sieglochs metod – till ca 3.5 s respektive ca 2 s. Olika kapacitetssamband jämfördes med uppmätta värden på under- respektive överordnat flöde. Av någon anledning gjordes mätningar också när tillfarterna ej var mättade varför man genomgående fick för höga predikterade kapacitetsvärden.

Flannery och Elefteriadou (1998) mätte kritiska tidsavstånd och följdtider i sex cirkulationsplatser. Medelvärdena var 3.7 respektive 2.3 sekunder. Också tidsavstånden mellan överordnade fordon mättes. De konstaterade att en exponentialfördelning kunde förklara ca 90% av de uppmätta tidsavstånden. Konstaterandet är något oklart men kan tolkas som  $\sum \min(p_{obs}, p_{est})$  där  $p$  anger andel tidsavstånd i ett intervall i någon lämplig intervallindelning.  $p_{obs}$  och  $p_{est}$  anger observerade respektive skattade andelar. Den potentiella kapaciteten beräknades med formel (2.5.3) med  $p_k$  beräknat från observerad fördelning. Slutsatsen var – dock utan några redovisade beräkningar – att HCM 1997 ger en god prediktion av kapaciteten.

### 6.3 Övriga mikromodeller

Särskilda modeller för fenomen som kan behandlas likvärdigt med korsningar med stopp- eller väjningsplikt, t.ex. förekomsten av fotgängare som korsar en tillfart, behandlas i kapitel 3.

#### Kritiska tidsavstånd och följdtider

Schnabel (1994) har mätt kritiska tidsavstånd och följdtider i en cirkulationsplats med diameter 65 m. De kritiska tidsavstånden har skattats med Sieglochs metod till 4.2 s (genomsnitt för två

tillfarter) medan följdtiden beräknades till 2.5 s. Det kapacitetssamband som erhålls avviker från den tyska makromodellen på det sätt som mikro- och makromodeller oftast skiljer sig åt, nämligen att mikromodellen ger högre kapacitet vid låga överordnade flöden och lägre kapacitet vid höga överordnade flöden.

Aagaard (1995) har mätt kritiska tidsavstånd i fyra enfältiga danska cirkulationsplatser. Värdena är något högre än de värden som uppmätts av Hagring (1996) även om en fullständig jämförelse ej kan göras då uppgifter om geometri saknas. Nielsen och Jensen (1999) redovisar en längre mätserie omfattande nio cirkulationsplatser där också storleken på cirkulationsplatsen visas. Storleken på de kritiska tidsavstånden är ungefär desamma som de som redovisas av Hagring (1996) men då redovisningen görs relativt rondellens diameter (Hagring redovisar växlingssträckans längd) går mer noggranna jämförelser ej att göra. Följdtiden uppmättes till 2.7 s.

Krogscheepes och Roebuck (1998) fann att kritiska sträckavstånd gav bättre korrelation mellan observerad och beräknad fördröjning än kritiska tidsavstånd. Detta är i överensstämmelse med studier av Ashworth och Bottom (1977) och egentligen ej överraskande då uppskattning av sträcka torde vara enklare än uppskattning av tidsavstånd. Att använda sträckavstånd komplicerar dock såväl mätningar som beräkningar.

Peltola (1994, 1996, 1997) har mätt kritiska tidsavstånd i finländska cirkulationsplatser. I vissa av cirkulationsplatserna uppmättes låga kritiska tidsavstånd, under 3 s.

#### Inverkan av varierande OD-flöden

Det överordnade flödet består normalt tre delflöden (se ovan) och det antas att inverkan av de tre delströmmarna är lika per fordon (eller fordonsekvivalent). Baserad på observationer av avvikelser mellan predikterad och observerad kapacitet har Akçelik, Chung och Besley (1996) och Akçelik (1997) utvecklat en modell som tar hänsyn till var det överordnade flödet har sitt ursprung och vart det är på väg. Modellen anger rätt stora skillnader mellan olika fall. Någon närmare förklaring till mekanismerna bakom anges inte. Hagring (2000a) har påpekat att av den inverkan av varierande OD-flöden som modellen anger beror en väsentlig del på andra faktorer (köbildning). CAPCAL (Vägverket 1995) tar hänsyn till varierande OD-flöden genom omräkningsfaktorer för överordnat flöde medan i den cirkulationsplatsmodell som redovisas av Hagring (2000a) beaktas varierande OD-flöden i tvåfältiga cirkulationsplatser genom att fördelningen på de två cirkulerande körfälten ändras. Detta i kombination med olika kritiska tidsavstånd för dessa två körfält ger att kapaciteten blir beroende av OD-flödet.

Hagring (1998b) fann olika kritiska tidsavstånd för den inre respektive den yttre överordnade strömmen i tvåfältiga cirkulationsplatser. Krogscheepes och Roebuck (1998) fann skillnader i kritiskt sträckavstånd beroende på om det överordnade fordonet kom från den tillfart som låg närmast eller näst närmast uppströms och fann skillnader mellan dessa, i genomsnitt så att de kritiska tidsavstånden var större för de fordon som kom från tillfarten närmast uppströms. Båda dessa undersökningar innebär att vid ett givet värde på det överordnade flödet kan kapaciteten variera beroende på var det överordnade flödet har sitt ursprung. Hagring (2000a) utnyttjade sina resultat i en analytisk modell som visade att skillnader i OD-flöden kan ha stor inverkan på kapaciteten.

Krogscheepes och Roebuck (2000) utnyttjade sina resultat för en simuleringsmodell och undersökte OD-flödenas inverkan på kapaciteten. De här refererade undersökningarna gav motstridiga resultat. Hagrings resultat är icke-symmetriska precis som de av Krogscheepes och Roebuck (2000) men omkastade, dvs. en OD-situation som Hagring fann ge maximal kapacitet befanns av Krogscheepes och Roebuck ge den minsta kapaciteten. Skillnaden kan bero att Hagring modellerade tvåfältiga cirkulationsplatser medan Krogscheepes och Roebuck modellerade enfältiga. Mer

anmärkningsvärt är kanske att de samband som Akçelik (1997) fann för såväl en- som tvåfältig cirkulationsplatser var symmetriska. Uppenbarligen är detta område ej helt klarlagt ännu.

### Cyklister och gångtrafikanter

Tan (1994) har beräknat inverkan av cyklister och gångtrafikanter på kapaciteten för biltrafiken genom simulering. För gångtrafikanter har två fall behandlats.

Det första berör övergångsställen i tillfarten. Tan bygger sitt arbete på Maycock och Marlowe (1982) men har korrigerat för att fotgängarna ej har absolut prioritet. Tillfarten beskrivs som ett seriekopplat kösystem.

Det andra berör övergångsställe i frångången och risken för att en bilkö kan blockera cirkulationsplatsen. Genom regressionsanalys bestämdes ett samband mellan blockeringstiden och cykeltrafikflödet, biltrafikflödet och magasinets storlek. Inverkan på fordon uppströms bestämdes genom att blockeringstiden konverterades till ett ekvivalent biltrafikflöde.

För cyklister behandlades också två fall. Skilda kapacitetssamband beräknades beroende på om omkörning av cyklister är möjlig eller ej. Om omkörning ej är möjlig blir inverkan något större, men skillnaden är liten mellan de två fallen. Cyklisternas inverkan kan beräknas antingen genom att bestämma ett pbe-värde för dessa eller genom att direkt ta hänsyn till cyklisterna i kapacitets-ekvationen. Pbe-värdet blir flödesberoende och är ca 1 när biltrafikflödet är litet och 0.1 till 0.3, den lägre siffran för cyklister som kan köras om, när detta flöde är ca 1400 fordon/timme.

Även cyklisters inverkan på utkörande fordon har studerats på motsvarande sätt. I artikeln redovisas tyvärr inte några uppgifter om trafikanters beteende och fordonsdynamik. Bland annat måste kritiska tidsavstånd med avseende på cyklister ha skattats på något sätt.

### Kapacitetsrestriktioner

Flertalet cirkulationsplatsmodeller – också CAPCAL – beaktar ej kapacitetsrestriktioner i tillfarten. Vid belastningsgrader över 1 kan inte hela det underordnade flödet ta sig in i cirkulationsplatsen. Inflödet måste reduceras till kapaciteten vilket i sin tur påverkar övriga tillfarter. Problemet har uppmärksamats av Fisk (1991) som också föreslagit en lösning på problemet. Denna lösning har inkluderats av bland andra Hagring (2000a) och i SIDRA, Akçelik (1998).

## 6.4 Makromodeller

### 6.4.1 England

Philbrick (1977) utvecklade en makromodell för äldre cirkulationsplatser, dvs. byggda då fordon som var på väg in i cirkulationsplatsen hade företräde (övergången till nu gällande reglering skedde 1966). Kimber och Semmens (1977) samt Glen, Summer och Kimber (1978) utvecklade en liknande modell för nyare cirkulationsplatser med annan utformning (mindre rondell). Ashworth och Laurence (1978) utvecklade en mikromodell och en makromodell på samma data (se avsnitt 6.5), för övrigt på samma datamaterial som Philbrick (1977) använde. Slutligen utvecklade Kimber (1980) en modell som kunde hantera cirkulationsplatser av såväl äldre som nyare typ.

Fältmätningarna var omfattande – 86 cirkulationsplatser mättes och totalt 11000 minuters data samlades in. Den resulterande modellen innehåller flera geometriska variabler som bland annat speglar den typiska engelska utformningen med stor breddökning i tillfarten. Förändringar av denna variabel ger stor inverkan på kapaciteten. Minsta uppmätta diameter var 13.5 meter.

### 6.4.2 Tyskland

Den tyska manualen är dokumenterad av Brilon, Grossman och Blanke (1994). Cirkulationsplatsdelen är uppbyggd på samma sätt som den del som behandlar korsningar med stopp- eller väjningsplikt.

Det överordnade flödet för en tillfart definieras som det cirkulerande flöde som passerar tillfarten. Omräkning till fordonsenheter görs enligt tabell 3.2. Inverkan av lutning görs på samma sätt som för korsningar med stopp- eller väjningsplikt. Siktsträckan beaktas ej. Däremot anges en inverkan av fotgängare tvärs tillfarten. Denna beror av storleken på fotgängarflödet och det överordnade flödet och skiljer sig för en- respektive tvåfältiga cirkulationsplatser och uttrycks som en korrigeringsfaktor för kapaciteten. Korrigeringarna baseras på en studie av Marlow och Maycock (1982). Någon inverkan av utformningen, t.ex. cirkulationsplatsens storlek, anges ej utöver antalet körfält.

Kapaciteten för en tillfart beräknas med ett diagram. Man skiljer på följande fall

- Enfältig tillfart, enfältig cirkulationsplats
- Enfältig tillfart, två- eller trefältig cirkulationsplats
- Tvåfältig tillfart, tvåfältig cirkulationsplats
- Tvåfältig tillfart, trefältig cirkulationsplats

I kommentarerna till beräkningsanvisningarna redovisas de samband som använts för att rita kapacitetsdiagrammen. Dessa samband är linjära och helt i överensstämmelse med t.ex. den engelska makromodellen förutom att utformningen ej har någon inverkan. Inverkan av fotgängare anges däremot explicit. Orsaken till att man valde en makromodell var att teorin för kritiska tidsavstånd inte gick att enkelt tillämpa på cirkulationsplatser. Skälen till detta var, enligt Stuwe (1991), att följdtiden i vissa fall var större än det kritiska tidsavståndet och att det var så gott som omöjligt att definiera det överordnade flödet i cirkulationsplatser med flera körfält i cirkulationsplatsen och i tillfarten.

Jämfört med metoden för korsningar med stopp- eller väjningsplikt har ett stort arbete gjorts med cirkulationsplatsmetoden. Arbetet förtjänar att redovisas här, inte minst på grund av att de rekommenderade beräkningsmodellerna skiftat så mycket under kort tid.

Stuwe (1991) redovisar samband, baserade på mätdata., för de fyra olika fall som beskrivits ovan. Sambanden är precis desamma som formel (2.6.6) men med de båda konstanterna bestämda med regressionsanalys, dvs. sambandet blir enligt formel (2.7.2). Vid mättat flöde kan således skattning av kritiska tidsavstånd och följdtider göras på detta, se tabell 6.2, där  $T$ ,  $T_0$  och  $T_b$  beräknats från de samband som givits av Stuwe (1991). Notera att då infarten har två körfält så får  $T_0$  tolkas som den gemensamma följdtiden. De kritiska tidsavstånden för de enfältiga infarterna överensstämmer med motsvarande svenska värden (Hagring 1996) medan de som gäller för de tvåfältiga inte kan tolkas på detta sätt. Stuwe (1991) undersökte också en linjär modell men denna gav något lägre korrelationskoefficient. Inverkan av det utkörande flödet och av fotgängare kunde ej konstateras för hela materialet. Endast för en cirkulationsplats befanns fotgängarflödet vara signifikant i kapacitetsekvationen och då med en lägre inverkan än vad Marlow och Maycock (1982) anger.

Efter Stuwes studier gjordes ytterligare fältmätningar och analyser av Brilon och Stuwe (1993) med ungefär samma resultat. Samma år publicerades ytterligare en studie – Brilon, Stuwe och Drews [1993] – citerad i Brilon, Wu och Bondzio (1997). Den exponentiella modellen hade då ersatts med en linjär eftersom denna gav högre förklaringsgrad. Att de linjära modellerna ger en

skärning med x-axeln (dvs. med den axel som svarar mot det överordnade flödet) angavs som en fördel. I den senare referensen diskuteras betydelsen av att kapaciteten i utfarten inte är känd.

Samma referens diskuterar frågan om fördelar och nackdelar med mikro- respektive makromodeller. Som en nackdel påpekas att makromodellerna ej kan extrapoleras, en aspekt som diskuteras vidare i avsnitt 7.2. Mot bakgrund av denna diskussion har ett nytt matematiskt samband, baserat på teorin för kritiska tidsavstånd, utvecklats av Wu (1997a), se avsnitt 2.6.

**Tabell 6.2.  $T$ ,  $T_0$  och  $T_b$  beräknade från Stuwe (1994) och Guichet (1997).**

| Antal körfält     |        |       |       |      |
|-------------------|--------|-------|-------|------|
| Cirkulationsplats | Infart | $T_0$ | $T_b$ | $T$  |
| 3                 | 2      | 1,78  | 2,40  | 3,30 |
| 2                 | 2      | 2,32  | 2,41  | 3,57 |
| 2-3               | 1      | 3,00  | 2,63  | 4,13 |
| 1                 | 1      | 3,31  | 2,78  | 4,44 |
| Guichet (1997)    |        | 2,05  | 3,53  | 4,56 |

Någon begränsning av cirkulationsplatsens storlek anges ej.

#### 6.4.3 Frankrike

Louah (1988) redovisar en kapacitetsmodell, utvecklad av SETRA, för cirkulationsplatser belägna på fransk landsbygd. De faktorer som befanns påverka kapaciteten var cirkulerande flöde och utkörande flöde (angivet som personbilsenheter/timme med pbe-värde för tunga fordon 2.0), bredd på underordnat körfält (mätt ett fordonsavstånd från väjningslinjen), refug i tillfart och växlingssträcka. Storleken på cirkulationsplatsen befanns ej påverka kapaciteten vilket förklarades med korrelation mellan parametrar och med att små cirkulationsplatser ej studerats. Några uppgifter om den undersökning som ligger till grund för denna kapacitetsmodell redovisas av Louah (1992): 56 tillfarter i 17 cirkulationsplatser i landsbygds- och förortsmiljö har mätts.

Guichet (1997) redovisar en del förändringar gentemot Louah (1992). Bland annat har den linjära modellen ersatts av samma exponentiella modell som Stuwe (1991) använde, dvs. såsom formel (2.7.2). Det resulterande kritiska tidsavståndet och följdtiden återfinns i tabell 6.2. Det överordnade flödet består av det cirkulerande flödet och det utkörande flödet. Det cirkulerande flödet delas i internt och externt flöde vars innebörd är oklar.

Någon begränsning av storleken anges ej. Miljön kan möjligen antyda något större cirkulationsplatser.

#### 6.4.4 Schweiz

Simon (1991) beskriver två olika makromodeller som utvecklats i Schweiz. Den första, beställd av VSS Association of Swiss Road and Traffic Engineers, avser cirkulationsplatser i tätort med en diameter på 25-40 m. Inga samband med den geometriska utformningen ges. Datamaterialet bestod av 16 tillfarter i sju cirkulationsplatser. Denna modell finns dock i två varianter där den ena avser en standardutformning och den andra cirkulationsplatser med bredare tillfart, separat busskörfält eller stort överordnat flöde. Om två körfält förekommer i tillfarten blir kapaciteten 40% större jämfört med ett körfält. Cyklar och lastbilar anges motsvara 0.5 respektive 2 fordonsenheter. Minsta tillåtna storlek på diametern anges till 25 meter.

Den andra modellen utvecklades av Bovy et al. [1991]. Modellen baseras på samma dataunderlag som den förra. Den skiljer sig gentemot denna på en punkt då den innefattar effekter av det utkö-

rande flödet. Dessa effekter har beräknats genom simulering. Den ökning av kapaciteten som fås med flera körfält anges explicit av Tan och Tufo (1997) i form av intervall. Tre körfält i tillfarten ger t.ex. en kapacitetsökning med en faktor som varierar mellan 1 och 3!

#### 6.4.5 Nederländerna

Botma (1997) anger ett kapacitetssamband liknande det som anges av Bovy et al. [1990], dvs. (en del av) det utkörande flödet innefattas i det överordnade flödet. Också cyklister anges ha en inverkan – ett flöde på 100 cyklister/timme anges minska kapaciteten med 12.5%. Sambandet gäller för enfältiga cirkulationsplatser. Något beroende av utformningen anges inte. För tvåfältiga cirkulationsplatser anges att kapaciteten är ca 40 till 60% större än för enfältiga. Som en tumregel anges kapaciteten i enfältiga cirkulationsplatser till 20000 fordon/dygn och i tvåfältiga till 25000 fordon/dygn av Stembord och Botma (1998) medan Boender (1999) anger 35000 – 40000 fordon/dygn.

#### 6.4.6 Jordanien

Al-Masaeid och Faddah (1997) har bestämt ett kapacitetssamband för cirkulationsplatser i Jordanien. Sambandet har ett utseende som i stort sett överensstämmer med formel (2.7.2). Värdet på parametern **A** bestäms av diametern, avståndet mellan tillfart och nästa utfart (motsvarar således växlingssträckans längd), tillfartsbredden och växlingssträckans bredd, alla positivt korrelerade med kapaciteten. Kapaciteten befanns vara något större än den tyska metoden, som den angavs av Brilon och Stuwe (1993).

#### 6.4.7 Israel

Polus och Smhueli (1997) undersökte sex cirkulationsplatser i Israel med diameter mellan 17 och 62 meter. De utvecklade ett samband enligt (2.7.2) med parametern **A** bestämd av diametern. Kapacitetssambandet jämfördes med flera andra modeller. Den engelska modellen gav en högre kapacitet medan den tyska gav en lägre.

#### 6.4.8 USA

Diagram för kapacitetsbestämning återfinns i FHWA (2000). Källan för dessa framgår ej, men av formen att döma så är diagrammen baserad på en makromodell. Inverkan av korta körfält och fotgängare anges i tabell- och diagramform. Samband för medelfördröjning och 95-percentil anges också. Dessa är baserade på HCM.

### 6.5 Modelljämförelser

Flera författare har jämfört olika kapacitetsmodeller, i allmänhet genom att rita kapacitetsfunktioner för en given utformning. Däremot är det ont om jämförande empiriska studier. En sådan har hittats – Ashworth och Laurence (1978). I denna studie har en mikro- och en mikromodell utvecklats på samma datamaterial. Mikromodellen bygger på formel (2.6.8) samt antagandet att det kritiska tidsavståndet och följdtiden är lika stora. Makromodellen bygger på formel (2.7.1). De resulterande sambanden är förhållandevis lika. Som väntat ger mikromodellen högre kapacitet än makromodellen vid låga överordnade flöden, 1100 fordon/timme jämfört med 900 fordon/timme. Vid höga överordnade flöden ger mikromodellen också högre kapacitet, tvärt emot vad som ofta anges. Detta beror förmodligen på variation i data samt den särskilda mikromodell som används. Om de överordnade tidsavstånden antas vara exponentialfördelade går kapaciteten asymptotiskt mot noll vilket innebär att det vid höga överordnade flöden alltid finns en viss, om än låg, kapacitet. Om en M2- eller M3-fördelning hade använts skulle kapaciteten fås som  $\Delta^{-1}$ . Ashworth och Laurence studie innebär därför inte att det vanliga påståendet om skillnader mellan makro- och mikromodeller kan falsifieras.

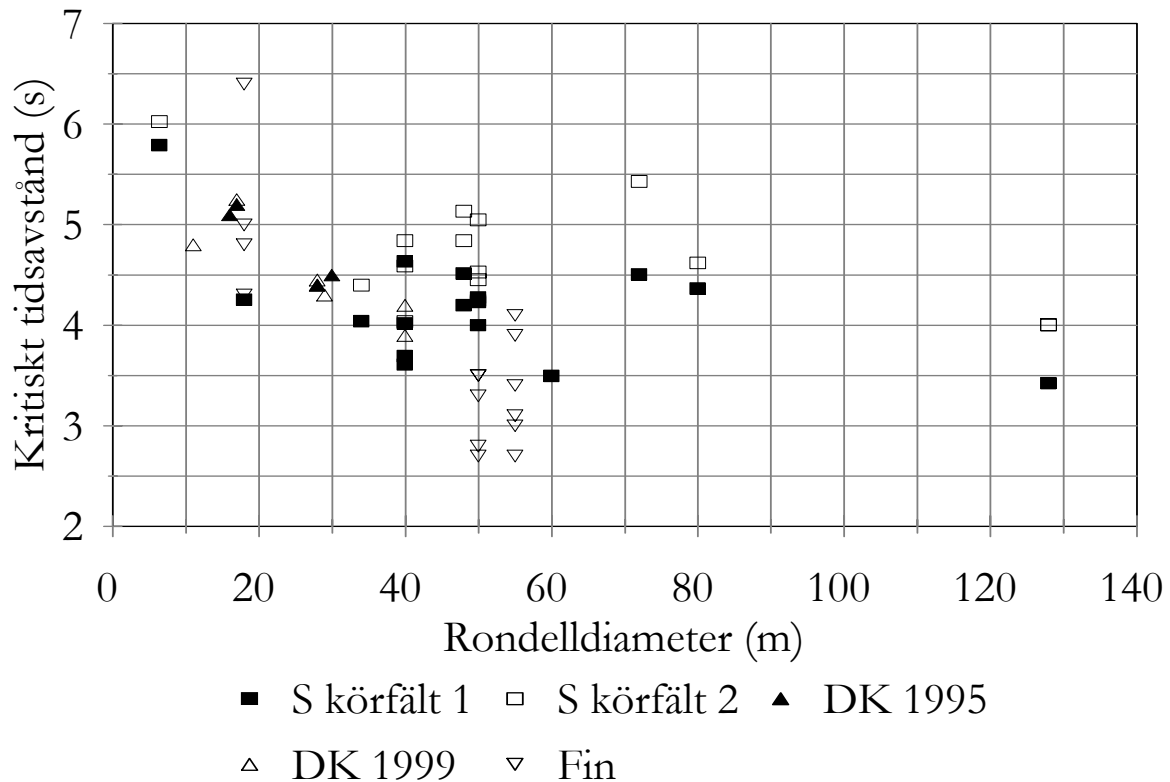
Hakkert et al (1990,1991) genomförde en systematisk jämförelse av sex olika kapacitetsmodeller, fyra mikromodeller och två makromodeller. Slutsatserna var bland annat att beteendeförändringar vid höga överordnade flöden (gap forcing, priority sharing) ger högre kapacitet än vad de kritiska tidsavståndsmodellerna predikterar. Det motsatta förhållandet gäller vid låga överordnade flöden. Kritiska tidsavståndsmodeller fungerar bäst vid måttliga flöden om inte det kritiska tidsavståndet och följdtiden görs beroende av det överordnade flödet. Den skattade kapacitetskurvan hade ett intercept på 957 fordon/timme, dvs. en följdtime på nära 4 s, vilket stöder ovanstående slutsats. Normalt ligger ju följdtimeerna på under tre sekunder. Den ena makromodellen – ARCADY2, baserad på Kimber (1980, 1989), se också Semmens (1985) – överskattade kapaciteten men kunde anpassas till data genom att minska interceptet något. Den franska modellen (SETRA, se Louah 1988) fungerade däremot sämre.

Kapaciteten för en cirkulationsplats har angetts av flera olika författare. Brilon, Troutbeck och Tracz (1997) anger en kapacitet på 20000-28000 fordon/dygn för enfältiga cirkulationsplatser och 35000 fordon/dygn för tvåfältiga. Jämförelserna på dygnsnivå kompliceras av att man använder olika maxtimmeandelar i olika länder. Schnabel (1994) anger en maxtimmeandel på 7,5% vilket ger en kapacitet på 29000 fordon/dygn för en enfältig cirkulationsplats. Med en maxtimmeandel på 10% blir kapaciteten 22000 fordon/dygn.

De svenska modellerna ligger högre för båda typerna men med förutsättningen att flödena är lika fördelade på alla tillfarter under alla timmar, något som i praktiken aldrig blir uppfyllt. Hur det överordnade flödet ska definieras skiljer sig något mellan olika modeller. CAPCAL har en helt egen definition där delar av det cirkulerande flödet ej inräknas i det överordnade flödet. Den vanligaste definitionen är att alla cirkulerande fordon räknas som överordnade och har samma inverkan. Några modeller anger att fordonens ursprung har en inverkan på kapaciteten, dvs. det ger en effekt som motsvarar CAPCAL. Några makromodeller tar också hänsyn till det utkörande flödet.

Beträffande mikromodeller så finns betydande skillnader ifråga om kritiska tidsavstånd och följdtider, kanske mest beroende på att mer ingående mätningar i Australien givit flödesberoende parametrar som resultat.

I figur 6.4 redovisas mätningarna av Aagaardh (1995) och Peltola (1994, 1996 och 1997). Aagaardh använde Hewitts metod för skattning av de kritiska tidsavstånden medan Peltola använde Raffs metod. Raffs metod har visat sig ge skattningar som är starkt beroende av det överordnade flödets storlek, dvs. antal och storlek på de erbjudna tidsavstånden. Detta kan vara en förklaring till de låga värden för cirkulationsplatserna med diameter 50 respektive 55 m. De nyare, danska mätningarna (Nielsen och Jensen 1999) visar på en negativ korrelation mellan det kritiska tidsavståndet och rondelldiametern. De svenska mätningarna visar på en liknande negativ korrelation. Korrelation med växlingssträckans längd är dock bättre än med rondelldiametern. Om man bortser från de finländska mätningarna avseende diameter på 50 respektive 55 m, så är skillnaderna i variationsbredd för det kritiska tidsavståndet för en viss storlek i allmänhet mindre än 1 s. Där skillnaderna är större beror detta i flera fall på att det i de svenska mätningarna ingår värden för det vänstra körfältet i tvåfältiga cirkulationsplatser.



**Figur 6.4** Kritiska tidsavstånd uppmätta i Sverige, Danmark och Finland. De finländska mätningarna avser tre olika cirkulationsplatser. 18 m: fyra olika tillfarter, 50 m: två tillfarter vid olika tidpunkter, 55 m: tvåfältig cirkulationsplats, såväl höger som vänster körfält.

En sammanställning av vilka geometriska parametrar som påverkar kapaciteten ges av Haging (1996a). Störst betydelse har givetvis antal körfält i tillfarten. Det är dock inte så att en fördubbling av antalet körfält inte fördubblar kapaciteten vilket ju i princip predikteras av CAPCAL. Det sistnämnda dock med förutsättningen att utformningen i övrigt och det cirkulerande flödet ej ändras, något som i praktiken ej går att uppfylla. I övrigt torde cirkulationsplatsens storlek (mätt t.ex. som diameter inklusive körytorna i cirkulationsplatsen eller som växlingssträckans längd) vara den parameter som har störst betydelse. För cirkulationsplatser gäller dock detsamma som för stopp- och väjningspliktig korsningar: skillnader i inverkan av olika geometriska parametrar mellan olika nationella modeller kan bero på skillnader i utformning. Vid mätning och analys bör inte någon parameter uteslutas.

Tillåten minsta storlek varierar för de olika modellerna med 13.5 meter (England) som minsta värde. För övrigt ligger gränsen vid 20 meter eller över.

Den modelltyp som är vanligast, och särskilt vid framtagning av nya beräkningsmodeller, är makromodellen. Orsaken till detta anges inte alltid, se t.ex. Polus och Shmueli (1997), men de enkla mätningarna och analyserna är rimligen ett skäl. Ett annat, angivet av Masaeid och Faddah (1997) är att mikromodellen kan överskatta kapaciteten. Detta diskuteras vidare i kapitel 7.

De olika kapacitetsmodeller som har refererats avviker alltför mycket från de mätningar som gjorts i svenska cirkulationsplatser för att direkt kunna användas. Närmast till hands ligger den australiensiska modellen men det finns stora skillnader vad gäller samband mellan utformning och kritiska tidsavstånd. Uppdelningen i dominant respektive subdominant körfält är inte förenlig med svensk empiri. Beskrivningen av det överordnade flödet är likartat men rymmer ändå

stora skillnader, t.ex. vad avser andelen fria fordon och det minsta tidsavståndet. Vissa av skillnaderna bör kontrolleras mot fältdata.

## 7 Modelljämförelser

I detta avsnitt görs dels en jämförelse av de i detta kapitel redovisade modelltyperna, dels en genomgång av de referenser där specifika modelljämförelser utförts.

### 7.1 Jämförande studier

Höglund (1990,1991) har gjort en före-efter studie av en signalreglerad korsning som byggts om till en cirkulationsplats. Studien baseras på mätning av tidsförbrukningen (dvs. färdtid) för passage av korsningen. Resultaten visar att cirkulationsplatsen gav lägre fördröjning än trafiksignalen för den studerade tillarten. De samband som beräknats mellan tidsförbrukning och underordnat flöde är egendomliga genom att de har en negativ lutning, dvs. tidsförbrukningen minskar med ökande flöde när en positiv korrelation vore att vänta. Andelen förklarad varians är genomgående låg vilket tillsammans med lutningen antyder att det måste finnas andra faktorer som är viktigare, t.ex. det överordnade flödets storlek. I Höglund (1990) återfinns samband mellan under- och överordnat flöde som visar att dessa är svagt positivt korrelerade (mätvärden i fordon per minut). Om så är fallet måste detta bero på en samvariation vid ganska låga belastningsgrader, vid kapacitetsgränsen är ju korrelationen negativ. Oavsett detta så innebär den positiva korrelationen att den negativa korrelationen mellan underordnat flöde och tidsförbrukning förblir oförklarad.

### 7.2 Mikro- eller makromodell?

Huruvida en makro- eller en mikromodell ska väljas har diskuterats mycket alltsedan Kimber (1976) med flera introducerade makromodellen. Bland andra har Brilon, Troutbeck och Tracz (1997) diskuterat för och nackdelar med makromodellen. De ansåg att fördelarna var:

- Det behövs ingen teoretisk modell.
- Uppmätta kapaciteter kan användas
- Inverkan av utformning kan beaktas.
- Omvänd prioritet och andra beteende förändringar hanteras direkt (men implicit)
- Förarbeteendet behöver ej beskrivas.

Nackdelarna var:

- Överförbarheten till andra länder är dålig på grund av att trafikantbeteendet kan ändras.
- De ger ingen förståelse av trafikantbeteendet.
- Sambanden för fyrvägs-korsningar är alltför komplicerade.
- Modellen måste baseras på mätningar av överbelastade korsningar eller körfält.

Saken är emellertid inte fullt så enkel som sammanställningen antyder. Huruvida en teoretisk modell behövs eller inte kan naturligtvis diskuteras och är egentligen avhängigt syftet med modellen – en praktiker är nog mest intresserad av att veta att resultaten håller en viss kvalitet eller noggrannhet.

Att inverkan av utformning kan beaktas i en makromodell är ingen komparativ fördel, detta är möjligt också för en mikromodell. Jämförs till exempel den svenska modellen för fyrvägs-korsningar med den brittiska så kan den svenska hantera fler geometriska parametrar än den brittiska. Däremot är variansen större för mikromodellen, dvs. sambanden är osäkrare. Detta visar sig bland annat i att  $R^2$ -värdet är större för en modell med kapaciteten som oberoende variabel än en modell där det kritiska tidsavståndet är den oberoende variabeln. Mikromodellen återspeglar ju variansen inom och mellan förare, något som utjämnas vid mätningar under längre tidsperioder.

Beträffande överförbarheten så visar studierna av Hakkert et al. (1990, 1991) att överförbarheten generellt är dålig och att makromodeller inte är sämre än mikromodeller. Tvärtom kan det vara enklare att fastställa kapaciteten då det överordnade flödet är 0 (dvs. mättnadsflödet) och på så sätt justera makromodellen. Att kalibrera en mikromodell kräver däremot besvärliga mätningar.

Att beakta eller inte beakta trafikantbeteendet har såväl för- som nackdelar. En uppenbar nackdel är att förarbeteendet är olika vid olika situationer. Detta kan hanteras på olika sätt i en mikromodell. Ett är att försöka finna ett samband mellan det kritiska tidsavståndet (och följdtiden) och det överordnade flödets storlek. Detta har gjorts av bland annat Troutbeck (1989) och ger en enkel modell där förändringarna går att relatera till indata till beräkningarna.

Ett annat sätt är att beakta samband med väntetidens längd. Effekter av väntetidens längd på det kritiska tidsavståndet har studerats bland annat av Ashworth och Bottom (1977), Kyte et al. (1991b), Kittelson och Vandehey (1991), Cassidy et al. (1995) och Teply et al. (1997). Att beakta väntetidens inverkan på det kritiska tidsavståndet är beräkningsmässigt svårare – i princip krävs en iterativ procedur som kräver att väntetiden beräknas och används som indata i nästa steg. Vid simulering blir detta enklare eftersom man då kan göra mätningar på varje fordon.

Utöver att det kritiska tidsavståndet förändras beroende på ändringar av det överordnade flödets storlek eller väntetidens längd kan också tidsavståndsfördelningen för överordnat flöde förändras som en följd av omvänd prioritet eller att underordnade förare tvingar sig in i korta tidluckor. Det finns modeller som beaktar detta, t.ex. Cowan (1979). Baserat på studier av tidsavstånd före och efter konfliktpunkten i cirkulationsplatser har Troutbeck och Kako (1997) utvecklat en modell som beräknar effekterna av begränsad prioritet för den överordnade strömmen.

Dessa olika sätt att beakta beteendeförändringar leder till att kapacitetskurvan blir mindre krökt, kapaciteten kommer att minska vid låga överordnade flöden och öka vid högre flöden och således närma sig utseendet hos den engelska modellen, som ju är helt linjär. Emellertid finns det mätdata från Jordanien och Israel (se avsnitt 6.4.6 och 6.4.7) som visar att sambanden som ges av en makromodell kan vara krökta på samma sätt som de samband som ges av mikromodeller. Kimbers resultat (1980) att sambanden är helt linjära är alltså inte generellt giltiga.

Viktigare är dock att makromodellerna behandlar beteendeförändringar implicit, dvs. effekterna visar sig genom de uppmätta värdena på kapaciteten. Överhuvudtaget är det så att makromodellen enkelt löser alla de matematiska och statistiska problem som mikromodellen genererar, den är således det svärd som hugger av den gordiska knuten.

Att makromodellen inte kommit att helt dominera marknaden för kapacitetsmodeller beror på att den inte går att mäta in om inte korsningen, dvs. minst ett körfält, är överbelastat under tillräckligt lång tid (i storleksordningen 30 minuter eller mer). Detta kan ge upphov till avsevärda svårigheter att finna mätbara korsningar och var orsaken till att en makromodell för svenska cirkulationsplatser inte kunde utvecklas. Ett alternativ till makromodellen vid belastningsgrader under 1 är att mäta betjäningstiderna för alla fordon. Kapaciteten kan sedan beräknas som det inverterade medelvärde av betjäningstiderna (se Kyte et al. 1991a) och också Hagring (1997a) för likande mätningar. Svårigheterna med denna metod, som påpekats av Brilon, Troutbeck och Tracz (1997) och också noterats av författaren, är av mätteknisk art, nämligen hur betjäningstiden ska definieras.

Då makromodellerna mätts in under överbelastning uppkommer ett problem motsatt det som gäller för mikromodellerna. Bland annat har Kimber (1989) kritiserat mikromodellerna för svårigheterna att beakta beteendeförändringar vid höga överordnade flöden. Omvänt måste gälla att makromodellerna är svaga när belastningen är låg – då måste det nämligen finnas en beteendeför-

ändring på andra hållet. Detta har däremot inte diskuterats någonstans såvitt denna inventering kunnat finna. Brilon, Troutbeck och Tracz (1997) har noterat att makromodellerna mätts in under överbelastning men ej noterat de beteendemässiga implikationerna av detta. Dessa förhållanden leder till en komplex situation vars praktiska konsekvenser kan sammanfattas så här: Makromodellen är av allt att döma bättre på att hantera situationer vid hög belastning medan mikromodellen, åtminstone om den är inmätt vid belastningsgrader under 1, borde fungera bättre vid låga flöden. Eftersom väntetiderna är approximativt exponentiellt beroende av belastningsgraden borde detta ge företräde för makromodellen. Å andra sidan dimensionerar man ju normalt för belastningsrader under 0.5 till 0.8 beroende på situation och då borde det vara rimligare att använda mikromodellen. Det är förvånande att det finns så få en rapporterade studier där såväl mikro- som makromodeller mätts in.

I en av dessa studier, utförd av Al-Masaeid (1995), har en mikro- och en makromodell utvecklas på samma datamaterial. Jämförelsen av dessa båda modeller visar – som ofta påpekats – att mikromodellen överskattar kapaciteten vid lågt överordnat flöde och underskattar den vid högt överordnat flöde. Detta beror här som i alla andra fall på ett metodfel eller på svårigheter att få en tillräcklig datamängd. I allmänhet skattas det kritiska tidsavståndet och följdtiden på ett material som täcker en stor variation i t.ex. överordnat flöde och de skattade värdena kommer därför att bli någon form av medelvärden över det överordnade flödet. Data måste delas upp för att få fram dessa skillnader. Detta kan bäst exemplifieras med följdtiden vid låga överordnade flöden. Följdtiden måste – per definition – då vara lika med eller i det närmaste lika med det inverterade värdet av kapaciteten. Att Al-Masaeid (1995) får resultat där följdtiden skiljer sig från det inverterade kapacitetsvärdet kan bara bero på att resultaten kommer från olika indelning av observationerna.

En diskussion på samma tema görs också av Akçelik (1997). Han vänder sig bland annat mot att makromodellerna kallas empiriska eftersom alla kapacitetsmodeller som bygger på mätdata i någon mening är empiriska.

En mycket utförlig redovisning och diskussion görs av Khattak och Jovanis (1990). Utgångspunkten är HCM 1985 som, enligt författarna, underskattar kapaciteten vid höga överordnade flöden. De kommentarer som görs, t.ex. att mikromodellen ej ger möjlighet att ta hänsyn till variation i utformning, gäller därför enbart HCM 1985.

## 8. Framkomlighetsmått

### 8.1 Inledning och definitioner

Det viktigaste framkomlighetsmålet, och det som utgör underlag för samhällsekonomiska värderingar, är fördröjning. Fördröjning definieras som den mertid det tar att passera korsningen jämfört med att denna ej funnits. Fördröjningen indelas i geometrisk fördröjning respektive interaktionsfördröjning:

- Geometrisk fördröjning avser fördröjning som uppkommer på grund av korsningens utformning, dvs. retardations- och accelerationsförluster. Jämförelsen sker mot en ostörd passage även om någon ostörd passage ej existerar såsom för ett högersvängande fordon.
- Interaktionsfördröjning avser fördröjning som beror av konflikter med andra fordon.

Fördröjningen består således av såväl geometrisk fördröjning som interaktionsfördröjning men utgörs ej av summan av dessa båda storheter eftersom retardationsfördröjningen till stora delar kan antas uppgå i interaktionsfördröjningen. I CAPCAL anges följande definition:

$$d = \max(d_i, d_{gr}) + d_{ga} \quad (8.1.1)$$

där  $d$  är fördröjningen och indexen  $i$ ,  $gr$  och  $ga$  anger interaktionsfördröjning, retardationsfördröjning respektive accelerationsfördröjning. I den tyska manualen (se Brilon et al. 1994) ingår också en orienteringstid i fördröjningen.

Interaktionsfördröjningen består av betjäningstid och väntetid i kö:

- Betjäningstid är den tid det tar för trafikanten att bli betjänad.
- Väntetid i kö är den tid som tillbringas i kö innan stopp- respektive väjningslinjen nås.

Begreppet väntetid används på två andra sätt:

- Väntetid är ett annat uttryck för interaktionsfördröjning, ej att förväxla med väntetid i kö.
- Medelväntetid avser den genomsnittliga väntetiden för ett körfält eller en fordonsström, ej att förväxla med total medelväntetid som avser hela korsningen.

Ett utomlands ofta använt begrepp är reservkapacitet som definieras som kapacitet minus inkommande flöde. Begreppet är relevant endast då belastningsgraden är mindre än ett, i annat fall blir den negativ.

Kapaciteten för en korsning kan definieras som det totala inkommande flödet då det mest belastade körfältet har belastningsgraden 1. Denna definition utgår ifrån en given situation då det mest belastade körfältet har en belastningsgrad som är mindre än 1. Trafikflödena ökas sedan med samma faktor tills något av körfälten får belastningsgraden 1. Skillnaden mellan flödena i de båda fallen blir då ett annat mått på reservkapaciteten. Denna kan således definieras antingen enbart med utgångspunkt i skillnaden mellan kapacitet och flöde eller med hänsyn också till det körfält som först når kapacitetsgränsen vid proportionell ökning av flödena.

Beräkningen av en korsnings kapacitet kan göras genom iterativa beräkningar alternativt kan en mer systematisk ansats göras enligt Wong (1996).

Ett annat begrepp som också är vanligt utomlands är servicenivå, som är en klassificering av korsningens funktion, baserad t.ex. på medelväntetiden eller på den totala medelväntetiden. Eventuellt kan flera framkomlighetsmått kombineras för att beskriva en viss servicenivå.

De viktigaste framkomlighetsmåttet i Sverige, näst fördröjning, torde vara belastningsgraden. Denna används bland annat vid val av korsningstyp på så sätt att belastningsgraden i det mest belastade körfältet måste underskrida ett riktvärde för en given korsningstyp.

Framställningen i detta kapitel är mindre koncentrerad på olika nationella metoder och mer riktad mot olika metoder att angripa problemet. Den är också ganska översiktlig, bland annat därför att flera av referenserna är tämligen svårtillgängliga. En utförligare beskrivning planeras i en annan rapport.

## 8.2 Korsningen som ett kösystem

### 8.2.1 Inledning

När kapaciteten är beräknad används normalt köteori för att beräkna väntetider, kölängder osv. Det är klart att mikromodeller har en närmare koppling till köteorin än makromodellerna eftersom köteorin baseras på studier av ankomster och betjäning samt (den statistiska) fördelningen av dessa. Också för makromodeller är köteoretiska modeller användbara även om begrepp som ankomstfördelning och betjäningstidsfördelning egentligen inte är relevanta på makronivå. Medelbetjäningstiden kan dock antas motsvara det inverterade värdet av kapaciteten på samma sätt som för en del av mikromodellerna. Man kan vidare förutsätta att det implicit i modellen finns ett antagande om t.ex. exponentialfördelade betjäningstider och tidsavstånd vid ankomst. Köteoretiska modeller är således direkt tillämpbara också för makromodellen. Detta innebär att kontroll och kalibrering av modellerna måste göras på samma sätt som för mikromodellerna, dvs. genom mätningar på fordonsnivå.

Det ligger utanför denna litteraturinventering att närmare redogöra för köteori som redskap för effektberäkning men några aspekter på detta ska dock ges. Det enklaste kösystemet är det som består av en kö och en betjäningsstation. I princip kan man tänka sig att ett underordnat körfält utgör ett sådant system med stopp- eller väjningslinjen som betjäningsstation. Särskilt enkla beräkningar fås om det antages att fordonen ankommer såväl som betjänas med exponentialfördelade tidsavstånd (dock av olika genomsnittlig längd). Med dessa antaganden betecknas kösystemet M/M/1. Ytterligare förutsättningar för detta system är att den genomsnittliga betjäningstiden är kortare än det genomsnittliga tidsavståndet mellan successiva ankomster och att inga förändringar sker över tiden, dvs. stationära förhållanden. Avvikelserna mellan detta ideala system och de verkliga förhållandena är flera:

- Varken ankomster eller betjäningstider är normalt exponentialfördelade, åtminstone inte när trafikflödena är stora.
- Förutsättningen att den genomsnittliga betjäningstiden är kortare än det genomsnittliga tidsavståndet mellan successiva ankomster, dvs. att flödet är lägre än kapaciteten, är inte alltid uppfyllt.
- Ett vägtrafiksystem är inte tidskonstant (stationärt), trafikflödena ökar eller minskar mer eller mindre regelbundet.

- I korsningar med stopp- respektive väjningsplikt innebär företrädesreglerna att det enkla M/M/1-systemet ger en dålig beskrivning av vad som faktiskt sker. I själva verket är kösystemet sammansatt av flera köer varav några har förtur framför andra.
- Förekomsten av köfält med begränsad magasinlängd innebär att vissa betjäningsstationer kan vara blockerade under vissa perioder.

Det finns flera olika sätt att lösa dessa problem. De två sista punkterna har behandlats i kapitel 3. Dessa båda problem hanteras genom att den resulterande kapaciteten för de olika köfälten eller delströmmarna beräknas. Därefter appliceras någon form av köteoretisk modell, dvs. problemet reduceras till att beräkna medelbetjäningstiden. Detta ger resultat som mycket väl överensstämmer med de med simulering erhållna resultaten (Wu 1998).

Den tredje punkten har också behandlats i kapitel 3.

De två första punkterna påverkar egentligen inte kapacitetsberäkningen. Den första punkten kan ses som en följd av olika antaganden vid kapacitetsberäkningen, t.ex. hur tidsavstånden i överordnad ström fördelas. Den andra punkten är en fråga om det underordnade flödets storlek. Båda dessa punkter kan hanteras inom köteorin.

I nästa avsnitt har valts att först redogöra för olika sätt att lösa dessa problem och att därefter redovisa olika nationella och andra beräkningsmetoder.

### 8.2.2 Olika ansatser

Den enklaste ansatsen är, som nämnts, att betrakta korsningen som ett M/M/1-system. Man kan då visa, se t.ex. Körner (1997) eller Hagring (1999) att kölängden vid stationära förhållanden är geometriskt fördelad. Medelväntetiden erhålls med Little's formel. Väntetiden är M3-fördelad vilket visats av Haight (1963).

De svenska metoderna för cirkulationsplatser och stopp- och väjningspliktiga korsningar är identiska och bygger på ett M/G/1-system, dvs. väntetiden kan beräknas med Pollaczek-Khintchines väntetidsformel. Väntetiden blir då beroende av variationskoefficienten vars härledning vållar svårigheter då beräkningarna i CAPCAL baseras på att det finns två betjäningstider – en för fordon i kö och en för fordon som ej står i kö (M/G2/1-system). Variationskoefficienten approximeras med ett enkelt men ej härlett uttryck.

Tanner (1962) härledde ett samband för fördröjningen i en korsning mellan en över- och en underordnad ström. Tidsavstånden mellan de ankommande fordonen på såväl över- som underordnad led antas vara exponentialfördelade. Korsningen antas för den överordnade leden fungera som ett M/D/1-kösystem. Den underordnade leden kan beskrivas som ett M/G/1-system. Under förutsättning av stationära förhållanden kan medelväntetiden för den underordnade fordonsströmmen beräknas. Fisk och Tan (1989) redovisar en något annorlunda härledning baserad på att den överordnade leden fungerar som ett M/M/1 system.

En nackdel med flertalet köteoretiska ansatser har varit att de förutsätter stationära förhållanden, dvs. att belastningsgraden är mindre än ett. Vid överbelastning kan kösystemet karakteriseras som ett D/D/1-system. Denna ansats har lett fram till att man sammanväger M/M/1- och D/D/1-systemen genom koordinattransformationsmetoden. Denna innebär en sammanläggning av de båda kösystemen. Metoden finns först beskriven av Catling (1977) samt Kimber och Hollis (1978, 1979). Jämförelser av olika modeller görs av Fisk och Tan (1989) som också redovisar en utvidgning av koordinattransformationsmetoden till ett kösystem med två olika kunder (t.ex. olika körriktningar eller olika fordonstyper). Troutbeck och Blogg (1998) diskuterar några nack-

delar med denna metod, särskilt att ansatsen egentligen saknar en teoretisk bas, en diskussion som har sin utgångspunkt i en artikel av Hurdle (1984).

En metod som kan användas om man vill beräkna effekten av icke-stationära ankomster, utvecklad av Kimber och Hollis (1979), är att stega sig fram i korta tidsintervall. Kölängden vid slutet av en period blir då indata till beräkningen för nästa period. Ett medelvärde kan därefter beräknas. Egentligen, om problemet ska angripas korrekt, bör också variationer i det överordnade flödet hanteras. Kapaciteten kommer då att ändras för varje intervall vilket Kimber och Hollis (1979) ej förutsatte.

Brilon och Grossmann (1991) diskuterar några olika sätt att beräkna fördröjning. De rekommenderar ett samband av Harders [1968] för medelväntetid:

$$d = \frac{1 - e^{-(qT + hT_0)}}{K - h} \quad (8.2.1)$$

dvs. medelväntetiden beror av reservkapaciteten. Det visar sig, se t.ex. Brilon och Grossman (1991) att om reservkapaciteten är konstant så kommer fördröjningen att vara i stort sett oberoende av förändringar i det överordnade flödet. Brilon (1995) beräknar fördröjningen med hjälp av reservkapaciteten för kösystemet (körfältet) och utnyttjar koordinattransformationstekniken för att generalisera beräkningen till fall med överbelastning.

Överbelastning innebär att en del av den trafik som anländer under en viss timme, t.ex. under dimensionerande timme, kommer att avvecklas under efterföljande timme. Fördröjningen bör därför inkludera den fördröjning som fordon som avvecklas efter denna timme utsätts för. HCM 1985 baseras, enligt Rouphail och Akçelik (1992), ej på denna ansats. Inte heller CAPCAL gör detta.

Troutbeck och Walsh (1994) jämför olika ansatser – direkt från den kritiska tidsavståndsteorin och från köteori – för utveckling av beräkningsformler för fördröjning. Med simulering jämförs några av dessa ansatser. Bland annat visas att den modell som används i CAPCAL, där den genomsnittliga betjäningstiden ges som ett viktat medelvärde av betjäningstiderna för fordon som stannar respektive ej stannar (dvs. som ankommer när det ej finns kö respektive när det finns kö) underskattar fördröjningen.

## 8.3 Beräkning av effektmått

Genomgången avser i huvudsak underordnade strömmar. För överordnade strömmar beaktas enbart geometrisk fördröjning.

### 8.3.1 Väntetid och kölängd

De svenska metoderna för cirkulationsplatser och stopp- och väjningspliktiga korsningar är identiska och bygger som nämnts ovan på ett M/G/1-system. Ett överbelastat system beskrivs som ett D/D/1-system. Då belastningsgraden är i intervallet [0.8;1.4] beräknas fördröjningen genom interpolation mellan de beräknade värdena vid belastningsgraderna 0.8 respektive 1.4. Kölängden beräknas med Little's formel, dvs. väntetiden multipliceras med flödet i körfältet. Percentiler beräknas utifrån antagandet om att kölängderna är geometriskt fördelade.

Den tyska manualen (se Brilon et al.1994) anger medelväntetid som det viktigaste framkomlighetsmåttet för såväl korsningar med stopp- eller väjningsplikt som för cirkulationsplatser. Medelväntetiden används för att bestämma servicenivåer, se tabell 8.1, för de olika strömmarna eller

körfälten. Medelväntetiden bestäms med hjälp av diagram där överordnat flöde, reservkapacitet och fordonsströmmens rang är ingående parametrar. De bakomliggande sambandet är det av Harders [1968], se Brilon och Grossman (1991), framtagna (dvs. formel (8.2.1)). Även ett diagram baserat på de med koordinattransformationsmetoden erhållna sambandet finns med. I tabell 8.1 redovisas också erforderlig reservkapacitet för de olika servicenivåerna.

**Tabell 8.1. Servicenivåer och reservkapacitet i Tyskland**

| Servicenivå | Medelväntetid (s) | Reservkapacitet |
|-------------|-------------------|-----------------|
| A           | #10               | $\geq 400$      |
| B           | #15               | $\geq 300$      |
| C           | #25               | $\geq 200$      |
| D           | #45               | $\geq 100$      |
| E           | >45               | $\geq 0$        |
| F           | –                 | <0              |

Den australiensiska handboken för cirkulationsplatser (AUSTROADS 1993) använder ett samband som går tillbaka till Tanner (1962) och Dunne and Buckley (1975). Det bygger på betjäningstiden för fordon som ankommer när det ej finns någon kö och korrigeras med en faktor som är omvänt proportionellt mot **(1-B)**. Sambandet liknar det som gäller för ett M/M/1-system. I AUSTROADS (1993) har detta samband förändrats med hjälp av koordinattransformationen för att klara överbelastning.

I HCM 1994 utnyttjas också en metod baserad på koordinattransformation, nämligen samma som används i SIDRA (Akçelik 1992). Servicenivåindelningen är något mer restriktiv än den tyska. Det har här ej kontrollerats vilka implikationer de olika nivåerna har, dessa kan ju skilja från land till land.

Louah (1988) redovisar ett annat angreppssätt. För varje punkt på den kapacitetskurva som makromodellen ger går det att finna en mikromodell som ger motsvarande kapacitet. Det därtill svarande kritiska tidsavståndet kan därefter användas för att göra en fördröjningsberäkning baserad på Tanner (1962). Detta angreppssätt förefaller något omständligt. Någon validering av fördröjningsberäkningarna redovisas ej.

Tracz (1991) redovisar polska LOS-nivåer som avviker från såväl de tyska som de amerikanska.

Schnabel (1994) har jämfört beräknad och uppmätt fördröjning med förhållandevis stora skillnader som resultat. Den beräknade fördröjningen är i allmänhet större än den uppmätta.

Benekohal och Bashar (1997) har provat en empirisk ansats. Genom mätningar har samband etablerats mellan den genomsnittliga betjäningstiden och det överordnade flödet samt mellan variansen för betjäningstiden och betjäningstiden. Dessa användes sedan i en M/G/1-modell som gav god överensstämmelse med uppmätta data.

Tan (1997) jämför några olika ansatser för beräkning av väntetid och kölängd (Harders, M/M/1 och CETUR) och konstaterar att dessa är ganska lika. Han använder koordinattransformations-tekniken för att erhålla ett fördröjningssamband för överbelastning, likt det som utvecklats av Kimber och Hollis (1979) förutom att det är försett med korrigeringsfaktorer. Sambandet som är givet av Kimber och Hollis visade sig överskatta fördröjningen vid överbelastning. Orsaken till detta anges vara dels att det D/D/1-samband som används inte ger en korrekt fördröjningsberäkning, åtminstone om denna beräkning jämförs med fältmätningar, dels att det koordinattransformerade sambandet närmar sig D/D/1-kurvan för långsamt. Koordinattransformationsmetoden

bygger på att avståndet mellan M/M/1-kurvan och dess asymptot (dvs. belastningsgraden 1) ska vara lika stort som mellan den transformerade kurvan och dess asymptot (dvs. D/D/1-kurvan). Tan (1997) inför två olika faktorer vars värde skattas utifrån mätdata och erhåller därmed en bättre anpassning av fördröjningssambandet. Båda faktorerna konstaterades vara beroende av belastningsgraden.

Heidemann (1991) härleder såväl väntetids- och kölängsfördelningarna i ett M/G2/1-system. Heidemann och Wegmann (1997) har generaliserat dessa resultat ytterligare. Åtminstone den kölängdsfördelning som Heidemann (1991) härlett är beräkningsmässigt komplicerad eftersom fördelningsfunktionen utgörs av en olösbar summa. Wu (1994) ger en förenkling av denna, baserad på regressionsanalys.

### 8.3.2 Andel fördröjda

Fördröjningen i en korsning kan orsakas av konflikt eller av retardation- och accelerationsförloppet (geometrisk fördröjning). Den andel som fördröjs av konflikt (dvs. för underordnade strömmar) beräknas i CAPCAL (Vägverket 1995a, 1995 b) som belastningsgraden (dvs. den andel som anländer när det finns en kö) plus den de som anländer när det ej finns någon kö men som ej accepterar det första tidsavståndet. Alla underordnade fordon antas drabbade av geometrisk fördröjning oavsett regleringsform.

Om fordonen ej har stopplikt beräknas andelen stoppade som den andel av de interaktionsfördröjda som har en väntetid större än retardationstiden (Vägverket 1995a, 1995b). Väntetiden antas vara exponentialfördelad.

Troutbeck (1993a) har härlett exakt samma samband som ovan. I samma arbete ges också en härledning av fördelningsfunktionen för väntetiden och en beräkning av det genomsnittliga antalet fordonsrörelser i kön i en underordnad tillfart.

### 8.3.3 Geometrisk fördröjning

McDonald, Hounsell och Kimber (1984) har gjort en systematisk genomgång av geometrisk fördröjning, uppdelat på retardationsfördröjning (före korsningen), fördröjning i korsningen och accelerationsfördröjning (efter korsningen). Kimber, Summersgill och Burrow (1986) har analyserat sambandet mellan geometrisk fördröjning och interaktionsfördröjning och konstaterar att dessa mått ej kan adderas.

Wolfe och Lane (2000) undersökte sambandet mellan fördröjningen för raktframkörande och högersvängande fordon och särskilt inverkan av radien för högersvängande ström. Detta kan ses som att geometrisk fördröjning för en ström ger fördröjning för en ström som annars ej skulle blivit fördröjd.

## 8.4 Sammanfattning

Här har endast gjorts en mycket kortfattad genomgång av beräkningen av några viktiga effektmått. Det kan konstateras att beräkningen av fördröjning i princip baseras på ett M/M/1-system som fås att klara överbelastning genom koordinattransformation. En systematisk genomgång skulle vara av intresse men ligger utanför syftet med denna litteraturinventering.

## 9. Simulering

Simulering som ett verktyg för att beräkna kapacitet och andra framkomlighetsmått ger några fördelar jämfört med de analytiska modeller som presenterats ovan, främst att komplicerade förlopp ej behöver beskrivas genom sannolikheteoretiska modeller. Modellering av inkonsistens och inhomogenitet eller icke-stationära flöden är ett exempel på detta. Det finns emellertid också svårigheter vad gäller validitet och reliabilitet, precis som för övriga modeller. Validiteten hänger delvis samman med hur noggrant man modellerar ett förlopp. Ju noggrannare man modellerar ett förlopp, dvs. ju mer man modellerar på mikronivå, desto större problem kan uppstå på makronivå.

Ett exempel på detta är hur fordonens tidsavstånd ska beskrivas på en överordnad led. Ett sätt är att göra detta är genom en fördelningsfunktion – empirisk eller teoretisk med skattade parametrar. Ett annat sätt är att göra det genom en mikromodell som beskriver fordonens accelerationsförlopp och därmed också ger ett väg-tid-diagram. I allmänhet görs detta med en car-following modell. Det denna då ska göra är att reproducera tidsavstånd mellan överordnade fordon.

En jämförelse mellan simulerade och skattade tidsavstånd är gjord av Pursula et al. (1997). Den visade att det simuleringsverktyg som användes – HUTSIM (Kosonen 1996) – ej lyckades att reproducera tidsavståndsfördelningar som var skattade på mätningar från svenska cirkulationsplatser. Jämförelsen baserades på andelen fria fordon. Som ett resultat av avvikelserna gav HUTSIM och den motsvarande analytiska modellen skillnader i kapacitet. En förklaring till skillnaderna kan vara att HUTSIM ej kan reproducera det komplicerade förlopp som ger upphov till de överordnade tidsavstånden i en cirkulationsplats. De tidsavstånd som mäts vid konfliktpunkten i en cirkulationsplats är ju beroende av interaktionerna vid två uppströms liggande konfliktpunkter och två utfarter. Eftersom beroenden uppströms föreligger för alla tillfarter får man beroende mellan alla tillfarter och utfarter.

En slutsats av detta är att i en utvärdering av simuleringsmodeller bör olika intermediära variabler ingå och att man bör vara försiktig vid flyttning av modellen från ett system till ett annat. Dock innebär resultaten inte att simuleringsmodeller skulle vara oanvändbara. Mer stringenta modelltester kan göras om man modellerar endast det som de analytiska modellerna försöker beskriva, t.ex. att man simulerar överordnade tidsavstånd direkt som angivits ovan. Det är på detta sätt som bl.a. Miller (1972), Brilon et al (1997) och Hagring (1998b) testat olika skattningsmetoder för kritiska tidsavstånd. Simulering blir då mer ett modellutvecklingsverktyg än en beräkningsmodell.

Det finns ett stort antal simuleringsmodeller för oreglerade korsningar, se t.ex. konferenshandlingarna från de tre konferenserna som behandlat korsningar utan trafiksignaler. Huruvida en modell baserad på simuleringsteknik eller en analytisk modell ska väljas för oreglerade korsningar kan diskuteras. Det stora antalet referenser som behandlar olika former av analytiska modeller och att de nationella modellerna är analytiska leder till slutsatsen att denna typ av modeller är att föredra. Orsaken till detta kan vara att oreglerade korsningar är förhållandevis enkla att modellera analytiskt även om det finns en rad fenomen som ställer till problem, t.ex. icke stationaritet. Å andra sidan kan detta orsaka problem också vid simulering. En annan orsak till att analytiska modeller föredras är att de kräver mindre utvecklingsarbete och att de är enklare att använda. En systematisk analys krävs dock för att kunna avgöra modellvalet på ett objektiva sätt. För mer komplexa system såsom korsningar med trafiksignaler eller olika typer av nät kommer simuleringstekniken mer till sin rätt. Dessa områden ligger dock utanför ämnet för denna inventering.

## 10. Sammanställning av kunskapsbrister

De kunskapsbrister som föreligger kan vara antingen av teoretisk natur eller av empirisk natur. En del av de teoretiska modeller som utvecklats kan vara direkt användbara, medan andra kan behöva anpassa till svenska förhållanden. Här görs ett försök att sammanställa de kunskapsbrister som finns vad gäller de svenska modellerna för framkomlighetsberäkning med hänsyn till de forskningsresultat som presenteras i litteraturstudien.

### 10.1 Korsningar med stopp- eller väjningsplikt

Vid genomgången av CAPCAL konstaterades följande oklarheter i modellen:

- pbe-värden för oskyddade trafikanter
- passage av korsning i två steg
- några mättnadsflödeskorrektioner
- antaganden om tidsavståndsfördelningar
- användande av bred vägren vid högersväng till överordnad led
- pbe-värden för olika fordonstyper

Utöver dessa oklarheter kan konstateras att mätningarna av bland annat de kritiska tidsavstånden är gjorda på 70-talet och att nya mätningar antagligen är behövliga. Huruvida de kritiska tidsavstånden ändrat sig eller ej kan inte avgöras utan nya mätningar. Särskilt intressant är att få en uppfattning om det finns något samband mellan de kritiska tidsavstånden, följdtiden och flödets storlek eller fördröjningen.

Delar av beräkningsmodellen är felaktiga, om än väldokumenterade. Dit hör främst hanteringen av de konflikter mellan fordonsströmmar med olika ordning (se figur 3.2). Detta problem är teoretiskt löst. Lösningen skulle kunna implementeras i CAPCAL. Det samma gäller problemet med korta körfält. Båda dessa lösningar är generella.

Problemet med passage av korsningar i två steg har också det lösts teoretiskt.

När det gäller pbe-värden så saknas det uppgifter om detta, de i CAPCAL använda uppgifterna är förmodligen baserade på allmänna övervägande och schablonsiffror från andra länder.

För oskyddade trafikanter saknas i stort sett användbara modeller, både för deras inverkan på biltrafiken men också för biltrafikens inverkan på de oskyddade trafikanterna.

Beräkningen av fördröjning och andra effektmått kan behöva ses över då en hel del resultat producerats under senare år. Den diskontinuerliga fördröjningsfunktion som används i CAPCAL borde kunna bytas ut.

Modellen borde dessutom valideras genom mätning av oberoende korsningar.

Utöver på olika vis dokumenterade oklarheter eller felaktigheter kan det finnas skäl att prova CAPCAL gentemot andra modeller. Ett exempel på detta är i vilken utsträckning som högersvängande från överordnad led kan betraktas som överordnade eller ej, även om konflikt inte föreligger, men detta inte alltid kan avgöras av bilföraren.

## 10.2 Korsningar med fyrvägsstopp

Någon svensk modell finns ej.

## 10.3 Korsningar med högerregel

Här finns två möjliga beräkningsmetoder. Dessa är ej validerade.

## 10.4 Cirkulationsplatser

Den nya modellen för cirkulationsplatser som tagits fram bygger på aktuella forskningsresultat. Den kunskapsbrist som finns berör främst urvalet av och antalet undersökta cirkulationsplatser. Det skulle vara önskvärt att göra mätningar i små cirkulationsplatser och i cirkulationsplatser med höga flöden. Några samband mellan flöde och kritiska tidsavstånd finns ej framtagna.

Oskyddade trafikanter är ej beaktade i modellen. Ej heller är inverkan av olika fordonstyper helt utredd. Även fördröjningsberäkningen borde ses över, liksom för stopp- och väjningspliktiga korsningar användes en diskontinuerlig fördröjningsfunktion. Den geometriska fördröjningen baseras på en enkel och schablonmässig modell. En validerad modell för detta som beaktar olika fordonstyper saknas. Modellen borde dessutom valideras för några oberoende korsningar.

Om en modell där det överordnade flödet i en tvåfältig cirkulationsplats ska beskrivas ström för ström behövs en modell för val av körfält under passagen av cirkulationsplatsen. Detta gäller såväl val av underordnat körfält som val av överordnat körfält.

## 10.5 Sammanfattning

För stopp- och väjningspliktiga korsningar samt för cirkulationsplatser kan modellerna sägas vara väl strukturerade och väl i linje med andra modeller. De är förhållandevis avancerade genom det sätt varpå olika utformning m.m. kan beaktas. Däremot finns det ett antal samband eller delmodeller som ej är klart redovisade eller som kan ersättas med bättre modeller. En första ansats för en vidareutveckling skulle därför kunna vara att skissa nya modeller utifrån de existerande modellerna och i denna skiss beakta de framsteg som gjorts och som redovisats i denna litteraturgenomgång.

För de övriga två korsningstyperna, där svenska modeller i stort sett saknas, kan det vara lämpligt att först diskutera vilka krav som ska ställas på en ny modell och vilka behov som finns av en ny modell.

## 11. Sammanfattning och rekommendationer för fortsatt arbete

Syftet med denna litteraturinventering är att ge en allmän kunskapsöverblick som underlag för en sammanställning av kunskapsbrister samt att ge ett underlag för en bedömning av tillförlitligheten hos de framkomlighetsmodeller för ej signalreglerade korsningar som Vägverket använder idag.

I CAPCAL finns en lång rad odokumenterade samband. Det är omöjligt att avgöra huruvida dessa är riktiga eller inte utan en närmare analys – dessa samband pekar alltså på en kunskapsbrist. Det finns dessutom ett antal delmodeller som är dokumenterade men som är felaktiga eller inte täcker alla fall. En del av dessa modeller skulle kunna ersättas med nyutvecklade sådana.

Det kan konstateras att beräkningsmodellen för stopp- och väjningspliktiga korsningar i stora drag rätt väl överensstämmer med de modeller som används i USA och Tyskland. Det finns en del skillnader som berör definition och beskrivning av överordnat flöde och storleken på olika parametrar. Andra skillnader beror på vilka geometriska parametrar som varit föremål för undersökning, CAPCAL hanterar inverkan av fler sådana parametrar än de två andra modellerna. Den nuvarande modellen skulle kunna navändas som utgångspunkt för utveckling av en ny modell.

Den cirkulationsplatsmodell som finns i CAPCAL skiljer sig mycket från den modell som baseras på de mätningar som gjorts i sen tid. Dessa mätningar uppvisar en del skillnader gentemot den australiensiska modellen och SIDRA som är de modeller som bäst överensstämmer med de senare mätningarna. För cirkulationsplatser skulle en ny modell kunna byggas på den modell som utvecklats av Hagring (1996a).

De modeller för och mätningar av korsningar i Sverige bygger alla på mikromodeller. Det skulle vara möjligt att utveckla också makromodeller. Svårigheten med dessa är att finna överbelastade korsningar eller tillfarter. Till detta kommer frågan om representativitet vid låga belastningsgrader – och omvänt: representativiteten för mikromodellen vid belastningsgrader som avviker från de som rådde vid mätningstillfället. En intressant uppgift vore att studera några tillfarter under varierande belastningsförhållanden och utifrån dessa studier utveckla såväl en mikro- som en makromodell som kan hantera de skiftande förutsättningarna, t.ex. förändrat trafikantbeteende.

En möjlig fortsättning på detta arbete skulle kunna vara att ställa upp teoretiska modeller på mikronivå och i dessa inkludera de teoretiska landvinningar som gjorts under senare tid. Utifrån denna kan sedan behovet av fältmätningar och ytterligare teoriutveckling bedömas.

Ytterligare en ansats, som inte utesluter någon av de övriga, är att särskilt granska de modeller som finns för beräkning av olika effektmått. Som påpekats i kapitel 8 är dessa modeller ofta komplicerade och kräver en djupgående analys.

En viktig del i det fortsatta arbetet är modellvalidering. Särskilt gäller detta för fördröjning, som är det viktigaste framkomlighetsmåttet.

## Referenser

- Aagaardh P. (1995) *Metoder til valg af reguleringsform for vejkryds*. IVTB, Danmarks Tekniske Universitet.
- Aagaardh P. (1997) Danish Capacity Models. In Ola Hagrings (ed.) *NordKap – nordiskt kapacitetssamarbete*. Bulletin 156, Inst. för trafikteknik, LTH, Lund.
- Aakre A. (1997) Norwegian methods for calculations of capacity and level of service at intersections. In Ola Hagrings (ed.) *NordKap – nordiskt kapacitetssamarbete*. Bulletin 156, Inst. för trafikteknik, LTH, Lund.
- Abou-Henaidy M., Teply S. and Hunt J. D. (1994) Gap acceptance investigations in Canada. In R. Akçelik (ed.) *Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity*. Sydney, Australia.
- Adams W. F. (1936) Road traffic considered as a random series. *Journal of the Inst. Civ. Engrs* 4.
- D'Agostino R. and Stephens M. (1986) . *Goodness-of-fit techniques*. Dekker, New York.
- Akçelik R. (1992) *Roundabout capacity and performance analysis using Sidra*. Summary Report, Australian Road Research Board.
- Akçelik R. (1994) Gap-acceptance modelling by traffic signal analogy. *Traffic Engineering & Control* 35(9).
- Akçelik R. (1997) Analysis of roundabout performance by modelling approach-flow interactions. In *Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals*, Portland, Or., USA.
- Akçelik R. (1998) *Roundabouts: Capacity and performance analysis*. Research Report ARR 321. ARRB.
- Akçelik R. and Chung E. (1994) Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways. *Road & Transport Research* 3(1).
- Akçelik R. and Chung E. (1994) Traffic Performance Models for Unsignalised Intersections and Fixed-Time Signals. R. Akçelik (ed.) *Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity*. Sydney, Australia.
- Akçelik R., Chung E. and Besley M.(1996). Performance of roundabouts under heavy demand conditions. *Road & Transport Research* 5(2).
- Akçelik R. and Besley M. (1999) *SIDRA 5 User Guide*. Australian Road Research Board.
- Al-Masaeid H. (1995) Capacity of One-Way Yield-Controlled Intersections. *Transportation Research Record* 1484. Transportation Research Board, Washington DC.
- Al-Masaeid H. and Faddah. M. Z. (1997) Capacity of Roundabouts in Jordan. *Transportation Research Record* 1572. Transportation Research Board, Washington DC.

- Archilla R. and Morrall J. (1994) Traffic characteristics on Two-Lane Highway Downgrades. In R. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.
- Ashworth R. (1968) A note on the selection of gap acceptance criteria for traffic simulation studies. ***Transportation Research* 2(2)**.
- Ashworth R. and Bottom C.G. (1977) Some observations of driver gap acceptance behaviour at a priority intersection. ***Traffic Engineering & Control* 18(12)**.
- Ashworth R. and Laurence C. J. D. (1978). A new procedure for capacity calculations at conventional roundabouts. ***Proceedings Institution of Civil Engineers* 65(2)**.
- AUSTROADS (1988) ***Guide to traffic engineering practice. Part 5. Intersections***.
- AUSTROADS (1993) ***Guide to traffic engineering practice. Part 6. Roundabouts***.
- Benekohal R. and Bashar A.-O. (1997) Development of Delay Models for Stop-Controlled Intersections Using Queuing Theory. ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.
- Bergh T. and Dardak H. (1994) Capacity of unsignalised intersections and weaving areas in Indonesia. R. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.
- Boender J. P. (1999) Roundabouts: The new Dutch Guidelines. ***Roads* 99/1**.
- Bonnesson J. and Fitts J. (1997) Delay to Major-Street Through Vehicles at Two-Way Stop-Controlled Intersections. ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.
- Bovy Ph. H. et al.[1991] ***Guide de Suisse des Giratoires***. VSS/OFR+FSR. Lausanne.
- Branston D. (1976) Models of Single Lane Time Headway Distributions. ***Transportation Science* 10(2)**.
- Breiman L., Gafarian A. V., Lichtenstein R. And Murthy V. K. (1969) An experimental analysis of single-lane time headways in freely flowing traffic. In W. Leutzbach and P. Baron (ed.) ***Beträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Referate anlässlich des IV. Internationalen Symposiums über die Theorie des Verkehrsflusses in Karlsruhe im juni 1968***. Bonn.
- Brilon W. (1988) Recent Developments in Calculation Methods for Unsignalized Intersections in West Germany. Intersections without Traffic Signals. In W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, West Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brilon W. (1995) Delays at Oversaturated Unsignalized Intersections Based on reserve Capacities. ***Transportation Research Record* 1484**. Transportation Research Board, Washington DC.
- Brilon W. and Grossman M. (1991) Calculation Procedures for German Practice: Intersections without Traffic Signals. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an

International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Brilon W. and Stuwé B. (1993) Roundabouts in Germany: Recent results regarding capacity and safety. In *Actes du Seminar "Giratoire 92"*. Nantes.

Brilon W., Stuwé B. and Drews O. [1993] *Sicherheit und leistungsfähigkeit von kreisverkehrsplätzen*. Ruhr-Universität Bochum.

Brilon W., Grossman M. and Blanke H. (1994) *Verfahren für die berechnung der leistungsfähigkeit und qualität des verkehrsablaufes auf strassen*. Bundesministerium für verkehr.

Brilon W., Wu N. and Lemke K. (1996) *Capacity at unsignalized two-stage priority intersections*. Pre-print 96-1280 TRB 75<sup>th</sup> Annual Meeting.

Brilon W., Troutbeck R. and Tracz M. (1997) Review of International Practices Used To Evaluate Unsignalized Intersections. *Transportation Research Circular* Number 468.

Brilon W., Koenig R. and Troutbeck R. (1997) Useful Estimation Procedures for Critical Gaps. In *Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals*, Portland, Or., USA.

Brilon W., Wu N. and Bondzio L. (1997) Unsignalized intersections in Germany – a state of the art 1997. In *Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals*, Portland, Or., USA.

Buckley D.J. (1968) A Semi-Poisson Model of Traffic Flow. *Transportation Science* 2(2).

Cassidy M., Madanat S., Wang M.-H. and Yang F. (1995) Unsignalized Intersection Capacity and Level of Service: Revisiting Critical Gap. *Transportation Research Record* 1484. Transportation Research Board, Washington DC.

Catchpole E. A. and Plank A. W. (1984) A general capacity formula for an uncontrolled intersection. *Traffic Engineering & Control* 25(6).

Catchpole E. A. and Plank A. W. (1986) The capacity of a priority intersection. *Transportation Research* 20(6).

Catling, T. (1977) A time-dependent approach to junction delays. *Traffic Engineering & Control* 18(11).

Cowan R. J. (1975) Useful headway models. *Transportation Research* 9(6).

Cowan R. J. (1979) The uncontrolled traffic merge. *Journal of applied probability* 16 (384-392). *Biometrika* 42, 80-95.

Dunne M. C. and Buckley D. J. (1972) Delays and capacities at unsignalised intersections. *Proceedings of the 6th ARRB conference, Canberra*, 345-362.

Fasching C. J. (1997) Unsignalized Intersection Analysis – Effect of Overlapping Conflicting Traffic Flow on Minor Movement Potential Capacity. *Transportation Research Record* 1572. Transportation Research Board, Washington DC.

FHWA (Federal Highway Administration) (2000) **Roundabouts: An Informational Guide**. Publication No. FHWA-RD-00-067.

Fisk C. S. (1989) Priority intersection capacity: A generalization of Tanner's formula. **Transportation Research 23B(4)**.

Fisk C.S. (1990) Effects of heavy traffic on network congestion. **Transportation Research 24B(5)**.

Fisk C. S. (1991) Traffic performance analysis at roundabouts. **Transportation Research 25B(2-3)**.

Fisk C.S. and Tan H. H. (1989) Delay analysis for priority intersections. **Transportation Research 23B(6)**.

Flannery A. och Elefteriadou L. (1998) Capacity Models for American Roundabouts. In R. Rysgaard (ed.) **Proceedings of the third international symposium on highway capacity**. Copenhagen, Denmark.

Gaca S och Chodur J. (1988) Simulation studies of the effect of some geometrical and traffic factors on the capacity of priority intersections. W. Brilon (ed.) **Intersection Without Traffic Signals**. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Gaca S., Chodur J. and Gondek, S. (1998) Research on capacity and traffic conditions at unsignalized urban intersections. In R. Rysgaard (ed.) **Proceedings of the third international symposium on highway capacity**. Copenhagen, Denmark.

Glen, M., Summer M. and Kimber R. M. (1978) **The capacity of offside priority roundabout entries**. Transport and Road Research Laboratory, Report 436. England: Department of Transport.

Golias J. (1981) **Gap acceptance, delay and capacity for vehicles crossing a priority stream**. Doct. Thesis. Transport Studies Group, University College London.

Golias J. (1986) Towards a realistic analytical evaluation of minor-stream capacity at priority road junctions. **Traffic Engineering & Control 27(1)**.

Golias J. and Kanellaidis G. (1988) Estimation of Driver Behaviour Model Parameters. **Journal of Transportation Engineering 116(2)**.

Griffiths J. D. and Hunt J. G. (1991) Vehicle headways in urban areas. **Traffic Engineering & Control 32 (9)**.

Grossmann M. (1991) KNOSIMO – A practicable simulation model for unsignalized intersections. W. Brilon (ed.) **Intersection Without Traffic Signals II**. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Hagring O. (1992) **Kapacitet i icke signalreglerade korsningar**. Bulletin 107. Institutionen för trafikteknik, Lunds Universitet.

Hagring O. (1996a) **Roundabout Entry Capacity**. Bulletin 135. Dept. of Traffic Planning and Engineering, Lund.

Hagring O. (1996b) The use of the Cowan M3 distribution for modelling roundabout flow. ***Traffic Engineering & Control 37(5)***.

Hagring O. (1997a) A new Swedish roundabout capacity model. In ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA

Hagring O. (1997b) CAPCAL2 –A new version of the SNRA capacity, delay and VOC software. In ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA

Hagring (1998a) A further generalization of Tanner's formula. ***Transportation Research 32B(6)***.

Hagring (1998b) ***Vehicle-vehicle interactions at roundabouts and their implications for the entry capacity***. Doctoral. Thesis.

Hagring O. (1999) ***Kompedium i trafikflödesteori***. Teknik och samhälle, LTH.

Hagring O. (2000a) Effects of OD flows on roundabout entry capacity. In Brilon W. (ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.

Hagring O. (2000b) Derivation of a capacity equation for a roundabout including circulating and exiting flow. Accepted for presentation at the 2001 TRB Annual Meeting.

Haight F.A. (1963) ***Mathematical theories of traffic flow***. Academic Press, London.

Hakkert A.S., Malahel D. and Asante S.A. (1990) ***Comparing capacities at unsignalized intersections and roundabouts***. Transportation Research Institute, Israel.

Hakkert A.S., Malahel D. and Asante S.A. (1991) A comparative study of roundabout capacity procedures. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***, Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Hamed M. M., Easa. S. M. and Batayneh R. R. Disaggregate Gap-Acceptance Model for Unsignalized T-Intersections. ***Journal of Transportation Engineering*** 123(1).

Hansson A. (1975) ***Studies in driver behaviour, with applications in traffic design and planning***. Bulletin 11. Dept. of Traffic Planning and Engineering, Lund University.

Hansson A. (1978) Capacity of unsignalized intersections. ***Transportation Research Record 667***. Transportation Research Board, Washington D.C.

Hansson A. (1980) ***Capacity of unsignalized intersections. Calculation methods for intersection capacity***. SWECO Report S – 1980:1.

Hansson A. (1980) ***Traffic signal calculation for individual intersections. Calculation methods for intersection capacity***. SWECO REPORT S – 1980:1.

Harders J. [1968] Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer verkehrsknoten. ***Schriftenserie strassenbau und strassenverkehrstechnik***, Heft 76.

Harders J. [1976] Grenz- und folgezeitlücken als grundlage für die leistungsfähigkeit von landstrassen. ***Schriftenserie strassenbau und strassenverkehrstechnik***, Heft 216.

Harwood D., Mason J. and Brydia R. (1997) Design policies for sight distances at stop-controlled intersections based on gap acceptance. In ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.

Hasan T. and Stokes R. (1997) Guidelines for Right-Turn Treatments at Unsignalized Intersections and Driveways on Rural Highways. ***Transportation Research Record 1579***. Transportation Research Board, Washington DC.

Heidemann D. (1991) Queue length and waiting-time distributions at priority intersections. ***Transportation Research 25B(4)***.

Heidemann D. and Wegmann H. (1997) Queuing at unsignalized intersections. ***Transportation Research 31B(3)***.

Hewitt R. H. (1985) A comparison between some methods of measuring critical gap ***Traffic Engineering & Control 26(1)***.

Hjorth U. (1995) ***A Markovian Car Speed Model***. Dept. of Mathematics, Linköping University.

Hoogendorn S.P., Botma H. and Bovy P.H.L. (1997) ***Car headway distribution modelling and estimation***. Technische Universiteit, Delft.

Hoogendorn S.P. and Bovy P.H.L. (1998) New Estimation Technique for Vehicle-Type Specific Headway Distributions. ***Transportation Research Record 1646***. Transportation Research Board, Washington DC.

Hoppe L. M. and Kruszyk T. (1988) Some factors effecting left-turn capacity and delay at unsignalized intersections. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Hunt J. G. and Jabbar. J. A. (1989) Vehicle-vehicle interactions in the region of roundabout entries. ***Proceedings PTRC 17th Summer Annual Meeting***.

Hunt J. G. and Jabbar. J. A. (1995) The effect of pelican crossings on roundabout entry capacity. ***Highways and transportation 42(10)***.

Hurdle V. F. (1984) Signalized Intersection Delay Models – A Primer for the Uninitiated. ***Transportation Research Record 971***. Transportation Research Board, Washington D.C.

Höglund P. (1990) ***Method and model for comparative intersection research***. Institutionen för Trafikplanering, KTH.

Höglund P. (1991) Case study. Performance effects of changing a traffic signal intersection to roundabout. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Jessen G. D. [1968]. Ein richtlinienvorschlag für die behandlung der leistungsfähigkeit von knotenpunkten ohne signalregelung. ***Strassenverkehrstechnik 7/8***. (1968).

Jirava P. och Karlicky P. (1988) Research on unsignalized intersections with impact on the

- Czechoslovak Design Standard. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Joubert H. S and Van As S. C. (1994) The effect of platooning on the capacity of priority controlled intersections. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.
- Jørgensen N. O. (1991) ***Rundkørslers kapacitet og sikkerhed***. Rapport nr. 61, Institut for Veje, Trafik og Byplan, DTH.
- Khattak A. J. and Jovanis P. (1990) Capacity and Delay Estimation for Priority Unsignalized Intersections: Conceptual and Empirical Issues. ***Transportation Research Record 1287***. Transportation Research Board, Washington DC.
- Kimber R. M. (1976) ***The capacity of some major/minor priority junctions***. TRRL LR 735. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England.
- Kimber R.M. (1980) ***The traffic capacity of roundabouts***. TRRL LR 942. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England.
- Kimber R.M. (1989) Gap-Acceptance and Empiricism in Capacity Prediction. ***Transportation Science 23(2)***.
- Kimber R. M. and Semmens M. C. (1977) ***A track experiment on the entry capacities of offside priority roundabouts***. Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Report 304. Crowthorne, England.
- Kimber R. M. and Hollis E. (1978) Peak-period traffic delays at road junction and other bottlenecks. ***Traffic Engineering & Control 19(10)***.
- Kimber R. M. and Hollis E. (1979) ***Traffic queues and delays at road junctions***. Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 909. Crowthorne, England.
- Kimber R. M. och Coombe R. D. (1980) ***The traffic capacity of major/minor priority junctions***. Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Report 582. Crowthorne, England.
- Kimber R. M., Summersgill I. and Burrow I. J. (1986) Delay processes at unsignalised junctions: The interrelation between geometric and queuing delay. ***Transportation Research 20B(6)***.
- Kittelson W.K, and Vandehey M.A. (1991) Delay effect on driver gap acceptance characteristics at two-way stop-controlled intersections. ***Transportation Research Record 1320***. Transportation Research Board, Washington DC.
- Kosonen I. (1996) ***HUTSIM – simulation Tool for Traffic Signal Control Planning***. Publication 89, Helsinki University of Technology, Finland.
- Krogscheepes C. och Roebuck C. (2000) Unbalanced Traffic Volumes at Roundabouts. In W. Brilon (ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.
- Kyte M. (1990) Estimating Capacity of an All-Way-Stop-Controlled Intersection. ***Transportation Research Record 1287***. Transportation Research Board, Washington DC.

Kyte M. (1997) Capacity and level of service of unsignalized intersections: New practices in the United States. In ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.

Kyte M, Zeeger J och Lall K. (1991a). Empirical models for estimating capacity and delay at stop-controlled intersections in the United States. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Kyte M., Clemow C, Mahfood N., Kent Lall B. And Jotin Khisty C. (1991b) Capacity and delay characteristics of two-way stop-controlled intersections. ***Transportation Research Record 1320***. Transportation Research Board, Washington DC.

Kyte M., Lall K. and Mahfood N. (1992) Empirical Method To Estimate the Capacity and Delay of the Minor Street Approach of a Two-Way-Stop-Controlled Intersection. ***Transportation Research Record 1365***. Transportation Research Board, Washington DC.

Kyte M., Kittelson W., Zongzhong T., Brilon W., Troutbeck R. and Mir Z. (1994) New measurements for saturation headway's and critical gaps at stop-controlled intersections. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.

Kyte M., Zongzhong T., Mir Z., Hameedmansoor Z., Kittelson W., Vandehey M., Robinson B., Brilon W., Bondzio L., Wu N. and Troutbeck R. (1996a) ***Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections***. NCHRP Web Document 5. (Project 3-46 Volume 1 –Two-Way Stop-Controlled Intersections). Available at [www.nap.edu](http://www.nap.edu).

Brilon W., Bondzio L., Wu N. and Troutbeck R. (1996b) ***Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections***. NCHRP Web Document 6. (Project 3-46 Volume 2 – All-Way Stop-Controlled Intersections). Available at [www.nap.edu](http://www.nap.edu).

Kyte M. och Tan Z. (1998) Characteristics of new models for capacity analysis of two-way stop-controlled (TWSC) intersections. In R. Rysgaard (ed.) ***Proceedings of the third international symposium on highway capacity***. Copenhagen, Denmark.

Körner U. (1997) ***Köteori och tillförlitlighetsteori***. Studentlitteratur.

Lan C.J. (1997) An alternative procedure for estimating gap acceptance parameters based on aggregate flow data. In ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.

Lasarre S., Lejeune P. och Decret J. C. (1991). Gap acceptance and risk analysis at unsignalised intersections. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Louah G. (1988) Recent French Studies on Capacity and Waiting Times at Rural Unsignalized Intersections. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Louah G. (1992) Panorama critique des modeles francais de capacite des carrefours giratoires. In ***Giratoire 92***. Actes du Seminaire.

- Luttinen T. (1996) *Statistical analysis of vehicle time headways*. Otaniemi, Finland.
- Madanat S., Cassidy M. and Wang M.-H. (1994) Probabilistic Delay Model at Stop-Controlled Intersection. *Journal of Transportation Engineering* 120(5).
- Maher M. J. and Dowse R. J. (1983) Estimating parameters in models of gap acceptances by queues. *Traffic Engineering & Control* 24(5).
- Marlow M. and Maycock G. (1982). *The effect of zebra crossings on junction entry capacities*. Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Report 724. England: Department of Transport.
- May A. D. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice Hall.
- McDonald M., Hounsell N. B. and Kimber R. M. (1984) geometric delay at non-signalised intersections. Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Report 810. England: Department of Transport.
- McDowell M., J. Wennell P.A. Storr and Darzentas J. (1983) *Gap acceptance and traffic conflict simulation as a measure of risk*. Special Report 776. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England.
- Miller A. J. (1972) Nine estimators of gap-acceptance parameters. Newell (ed.) *Traffic Flow and Transportation*. Elsevier, New York.
- Miller A. J. and Pretty R. L. (1968) Overtaking on two-lane rural roads. *Proceedings of the fourth ARRB conference*.
- Nielsen M. H. and Jensen C. H. (1999). Kapacitet i rundkørsler. *Dansk Vejtidskrift* 11/99.
- Pant P. D. och Balakrishnan P. (1994) Neural network for gap acceptance at stop-controlled intersections. *Journal of Transportation Engineering* 120(3).
- Peltola V. (1994) *Roundabouts – Design Guidelines and Capacity* (In Finnish). FinnRA, Traffic Road and Engineering.
- Peltola V. (1996) *Two-lane roundabouts* (In Finnish with English abstracts). FinnRA, Traffic Road and Engineering.
- Peltola V. (1997) Finländska mätningar i cirkulationsplatser och trafiksignaler. In Ola Hagring (ed.) *NordKap – nordiskt kapacitetssamarbete*. Bulletin 156, Inst. för trafikteknik, LTH, Lund.
- Peterson, B. (1978) Swedish Capacity Manual. Part 1. Objectives, Scope and Arrangement of the Manual. *Transportation Research Record* 667. Transportation Research Board, Washington D.C.
- Peterson, B. (1980) *Swedish Capacity Manual. Part 1. Objectives, Scope and Arrangement of the Manual*. Calculation methods for intersection capacity. SWECO REPORT S – 1980:1.
- Philbrick M. J. (1977) *In search of a new capacity formula for conventional roundabouts*. Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 773. England: Department of Transport.

- Polus A. and Shmueli S. (1997) Analysis and Evaluation of the Capacity of Roundabouts. **Transportation Research Record 1572**. Transportation Research Board, Washington DC.
- Prevedouros P. D. (1988) . A Model of Unsignalized Intersection Capacity Based on Erlang-3 Gap Distribution. W. Brilon (ed.) **Intersection Without Traffic Signals II**. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pursula M. (1997) Finska beräkningsmetoder för korsningarnas kapacitet och fördröjningar. In Ola Hagring (ed.) **NordKap – nordiskt kapacitetssamarbete**. Bulletin 156, Inst. för trafikteknik, LTH, Lund.
- Pursula M., Hagring O. and Niittymäki J. (1997) Simulation and Capacity Calculation of Intersections without Traffic Signals - A Discussion and a Roundabout Case study. **Proceedings of the Third International Symposium On Intersections Without Traffic Signals**. Portland, Oregon, USA.
- Robinson B. et al (1997) Extensions of theoretical capacity models to account for special effects of two-stage gap acceptance etc. **Proceedings of the Third International Symposium On Intersections Without Traffic Signals**. Portland, Oregon, USA.
- Roughail N. and Akçelik R. (1992) Oversaturation Delay Estimates with Consideration of Peak-ing. **Transportation Research Record 1365**. Transportation Research Board, Washington DC.
- Salter R. J. and Ismail E. A. (1991) Simulation of Two- and Four-Way Stop Control. **Transportation Research Record 1320**. Transportation Research Board, Washington DC.
- Schnabel W. (1991) Some Aspects of Capacity Analysis of Unsignalized Intersections. W. Brilon (ed.) **Intersection Without Traffic Signals II**. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schnabel W. (1994) Traffic operations on roundabouts. In R. Akçelik (ed.) **Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity**. Sydney, Australia.
- Schuhl A. (1955) **Poisson and Traffic**. Eno Foundation for Transportation. Saugatuck, California, USA.
- Semmens M. C. (1985) **ARCADY2: An enhanced program to model capacities, queues and delays at roundabouts**. Transport and Road Research Laboratory, Research Report 35. England: Department of Transport.
- Siegloch W. [1973] Die leistungsermittlung von knotenpunkten ohne lichtsignalanlagen. **Schriftenserie strassenbau und strassenverkehrstechnik, Heft 154**.
- Silcock P. P. och Borzym L. (1991) A strategy to optimise the geometric design of isolated priority junctions. W. Brilon (ed.) **Intersections Without Traffic Signals II**. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Simon M.J. (1991) Roundabouts in Switzerland. W. Brilon (ed.) **Intersections Without Traffic Signals II**. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

- Simonsson S. O (1996a) ***Mimic: A microscopic Simulation Model for Rural Road Traffic***. Doct. Thesis. Chalmers University of Technology.
- Simonsson S.O. (1996b) ***The lognormal distribution in traffic theory***. Stig O. Simonsson Förlag, Mölndal.
- Stembord H. och Botma H. (1998) National report on highway capacity of the Netherlands. In R. Rysgaard (ed.) ***Proceedings of the third international symposium on highway capacity***. Copenhagen, Denmark.
- Stuwe B. (1991) Capacity and safety of roundabouts- German results. W. Brilon (ed.) ***Intersections without traffic signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sullivan D.P. and Troutbeck R.J. (1994) The use of Cowan's M3 headway distribution for modelling urban traffic flow. ***Traffic Engineering & Control 35(7-8)***.
- SweRoad. (1991) ***Work package report***. WP 1.3 International literature review. Directorate of urban road development, Indonesia.
- Tan J. (1994) Influences of Pedestrian and Cyclist Flow on Roundabout Entry Capacity. In R. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.
- Tan J. (1997) Estimation of Traffic Queues and Delays at Roundabout Entries. In Proceedings of the Third International Symposium on ***Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.
- Tan J. och Tufo F. (1997) A capacity analysis procedure for unsignalized intersections in Switzerland. In ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.
- Tanner J. C. (1951) The delay to pedestrians crossing a road. ***Biometrika 38***, pp 383-392.
- Tanner J.C. (1962) A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection. ***Biometrika 49 (1-2)***.
- Tanner J.C. (1967) The capacity of an uncontrolled intersection. ***Biometrika 54 (3-4)***.
- Teply S., Abou-Henaldy M. I. And Hunt J. D.(1997) Gap acceptance behaviour: aggregate and logit perspectives - Part 1. ***Traffic Engineering & Control 38(9)***.
- Thedéen T. (1979) On the relation between offered, critical and accepted gap distributions. ***Journal of Applied Probability 16***, 54-64.
- Tian Z., Vandehey M., Robinson B., Kittelson W., Kyte M., Troutbeck R. and Brilon W. (1997) Implementing the Maximum Likelihood Methodology to Measure Driver's Critical Gap. ***Proceedings of the Third International Symposium On Intersections Without Traffic Signals***. Portland, Oregon, USA.

Tian Z., Troutbeck R., Kyte M., Brilon W., Vandehey M., Kittelson W. and Robinson B. (2000) A Further Investigation on Critical Gap and Follow-Up Time. *In* W. Brilon (ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.

Tracz M. (1988) Research and traffic performance of major/minor priority intersections. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Tracz M. (1991) The design of major/minor priority junctions in Poland. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Tracz M. (1998) Research and applications of highway capacity and level of service in Poland – Country Report. *In* R. Rysgaard (ed.) ***Proceedings of the third international symposium on highway capacity***. Copenhagen, Denmark.

Tracz M. and Gondek S. (2000) Use of Simulation to Analysis of Impedance Impact at Unsignalized Intersections. *In* W. Brilon (ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.

Transportation Research Board (1994) ***Highway Capacity Manual***. Special Report 209. Washington DC, USA.

Transportation Research Board (1998) ***Highway Capacity Manual***. Special Report 209. Washington DC, USA.

Troutbeck R. J. (1984) The theory of traffic flow on roundabouts. ***Traffic Flow Theory. Esso Monash Short Courses in Traffic Sciences***, 179-210.

Troutbeck R. J. (1986) Average delay at an unsignalized intersection with two major streams each having a dichotomized headway distribution. ***Transportation Science* 20(4)**.

Troutbeck R. J. (1988). Current and future Australian practices for the design of unsignalized intersections. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Troutbeck R. J. (1989) ***Evaluating the performance of a Roundabout***. Australian Road Research Board. Special Report 45.

Troutbeck R. J. (1991) Unsignalized Intersections and Roundabouts in Australia: Recent Developments. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Troutbeck, R. J. (1992a) ***Physical Infrastructure Center, QUT Research report 92-5, March 1992, Australia***.

Troutbeck R. J. (1992b). The "AustRoads 1992" procedure for evaluating roundabouts. *In* ***Actes du Seminar "Giratoir 92"***. Nantes.

Troutbeck R. J. (1993a) The Characteristics of the Times Drivers are Stopped at Unsignalised Intersections. C. Daganzo (ed.) ***Proceedings of the 12th international symposium on Transportation and traffic theory***, Berkeley, California.

Troutbeck R. J. (1993b) Effect of heavy vehicles at Australian Traffic Circles and unsignalized intersections. ***Transportation Research Record 1398***. Transportation Research Board, Washington DC.

Troutbeck R. J. (1997) A review of the process to estimate the Cowan M3 headway distribution parameters. ***Traffic Engineering & Control 38(11)***.

Troutbeck R. J. and Walsh D. J. (1994) The Difference Between Queueing Theory and Gap Acceptance Theory. In R. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.

Troutbeck R. J. and Kako S. (1997) Limited Priority Merge at Unsignalized Intersections. ***Proceedings of the Third International Symposium On Intersections Without Traffic Signals***. Portland, Oregon, USA.

Troutbeck R. and Blogg M. (1998) Queueing at Congested Intersections. ***Transportation Research Record 1646***. Transportation Research Board, Washington D.C.

VBB (1980) ***Förslag till beräkningsmetoder för plankorsningar utan signalreglering***. Kapacitetsutredning, PM 27.

Virkler M., Madsen R. and Sutton J. (1991). Estimating high and low flow rates at unsignalized intersections. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Vägverket. (1973) ***Kapacitetsutredning – Litteraturstudier och analys***. TV 188.

Vägverket. (1977) ***Beräkning av kapacitet, kölängd och fördröjning i vägtrafikanläggningar***. Rapport TV 131. Borlänge, Sweden.

Vägverket. (1995a) ***CAPCAL. Model description of Intersection without traffic signals***. Report 1995:007E. Borlänge, Sweden.

Vägverket. (1995b) ***CAPCAL. Model description of Roundabouts***. Report 1995:009E. Borlänge, Sweden.

Wang Z. (1999) Projected time gap: A new look at driver behaviour at junctions. ***Traffic Engineering & Control 40(11)***.

Wang Z. (2000) Critical gap and traffic volume – re-examining the relationship. ***Traffic Engineering & Control 41(7)***.

Wasielewski P. (1974) An Integral Equation for the Semi-Poisson Headway Distribution Model. ***Transportation Science 8(3)***.

Wegmann H. (1991) A general capacity formula for unsignalized intersection. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals II***. Proceedings of an International Workshop in Bochum,

Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.

Weinert A. (2000) Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Signalized Intersections in Germany. *In* W. Brilon (ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.

Weiss G. H. (1975) Solution to an Integral Equation in the Study of Semi-Poisson Headway Distributions. ***Transportation Science* 9(1)**.

Wolfe A. and Lane W. (2000) Effects of Radius of Curvature for Right Turning Vehicles on Through Traffic Delay. *In* W. Brilon(ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.

Wong S. C. (1996) The reserve capacities of priority junctions and roundabouts. ***Transportation Research* 30B (6)**.

Wu N. (1994) An Approximation for the Distribution of Queue Length at Unsignalised Intersections. *In* R. Akçelik (ed.) ***Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity***. Sydney, Australia.

Wu N. (1997a) ***Eine universelle formel für Berechnung der Kapazität von kreisverkehrsplätzen***. Ruhr-Universität Bochum.

Wu N. (1997b) Capacity of shared/short lanes at unsignalized intersections. *In* ***Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals***, Portland, Or., USA.

Wu N. (1998) Impedance effects for streams of higher ranks at unsignalised intersections. *In* R. Rysgaard (ed.) ***Proceedings of the third international symposium on highway capacity***. Copenhagen, Denmark.

Wu N. (2000) Capacity at All-Way Stop-Controlled and First-In-First-Out Intersections. *In* W. Brilon (ed.) ***Proceedings of Fourth International Symposium on Highway Capacity***, Maui, Hawaii.

Yahya M-R. (1997) ***Metoder att skatta väntevärdet för kritiska tidluckor i vägtrafikkorsningar***. Linköpings universitet.

Zhang X. (1988) The influence of partial constraint on delay priority junctions. W. Brilon (ed.) ***Intersection Without Traffic Signals***. Proceedings of an International Workshop in Bochum, Germany. Heidelberg: Springer-Verlag.