Trafikafvikling i 2-sporet frafarter

Signalregulerede kryds med to frafartsspor

Poul Greibe
Belinda la Cour Lund

2. marts 2017

Trafitec
Scion-DTU
Diplomvej 376
2800 Kgs. Lyngby
www.trafitec.dk

Titel: Trafikafvikling i 2-sporet frafarter. Signalregulerede kryds med to frafartsspor

Forfatter(e): Poul Greibe; Belinda la Cour Lund

Publiceringsdato: 24. februar 2017

Sprog: Dansk med engelsk summary

Antal sider: 59

Rekvirent/finansiel kilde: Vejdirektoratet

Projekt: Udviklingsopgaver om trafikafvikling og kapacitet

Kvalitetssikring: TSB

Emneord: Kapacitet, frafartsspor, signalreguleret kryds

Resumé:

Vejdirektoratets trafikkapacitetsmanual skal ajourføres og videreudvikles med det formål at kunne beskrive trafikafviklingskonsekvenserne af forskellige anlægsløsninger. De forskellige kapacitetsbestemmende parameterværdier er oprindeligt baseret på tyske og amerikanske værdier. Men der er i de senere år arbejdet målbevidst på at udskifte disse værdier så de baseres på danske trafikmålinger og dermed tilpasses den danske trafikantadfærd.

Som en del af dette arbejde, har Vejdirektoratet igangsat en undersøgelse med det formål at belyse, hvilken betydning længden af 2-sporede frafarter før sporbortfald har på trafikafviklingen i signalregulerede kryds baseret på danske data.

På baggrund af data er der bl.a. lavet en model til beregning af hastighedsforskel mellem første og sidste køretøj i kø ved slutning af kilestrækning set i forhold til krydsgeometri og trafikmængde. Resultaterne kan bl.a. benyttes til en skønsmæssig vurdering af, hvor lang strækningen fra stoplinje til slutningen af kilestrækningen skal være set i forhold til, hvilket serviceniveau der ønskes.

Title: Traffic operation at signalised junctions with two departure lanes

Author(s): Poul Greibe; Belinda la Cour Lund

Report date: February 24, 2017

Language: Danish with English summary

No. of pages: 59

Client/financial source: The Danish Road Directorate

Project: Traffic operation – research and development

Quality management: TSB

Key words: Capacity, exit lanes, signalized junctions, auxiliary through lane

Abstract:

The Danish Road Directorates traffic capacity manual must be updated and maintained and further developed with the aim to describe the traffic impact of various design solutions. The parameters used are at present based on German and American values. However, work is going on to change these values with data collected in Denmark and thus adapted to Danish road user behavior.

As a part of this work The Danish Road Directorate has initiated a study with the aim to find a relation between the required length of the two-lane departure section downstream signalised junctions and traffic flow based on Danish data.

Based on the collected data, a model for calculating the speed difference between first and last vehicle in a queue at the end of the taper section compared to junction geometry and traffic volume of traffic is presented. The results can be used to provide an estimation of the length of the stretch from the stop line to the end of the taper section according to the desired service level.

Rapporten kan hentes fra www.trafitec.dk.

Copyright © Trafitec

Ved gengivelse af materiale fra publikationen skal fuldstændig kildeangivelse udføres.

The report can be acquired from www.trafitec.dk.

Copyright © Trafitec

Reprinting material from this publication must include a complete reference to original source.

Indhold

Sammenfatning **5**

English Summary **9**

1. Indledning **13**

2. Metode **15**
2.1 Krydsgeometri – empiriske data 15
2.2 Dataindsamling 18
2.3 Databehandling 20

3. Resultater fra empiriske data **25**
3.1 Data 25
3.2 Sporbenyttelse 26
3.3 Gaps mellem køretøjer 28
3.4 Speed-flow relation (kilestrækningen) 31
3.5 Acceleration ved opstart 35
3.6 Observeret flow ved kileslut (snit D) 39
3.7 Teoretisk beregning af 2 sporet frafartlængde 40

Bilag 1 De syv analysestrækninger **43**
Bilag 2 Teoretisk beregning af længde af frafartsspor **51**

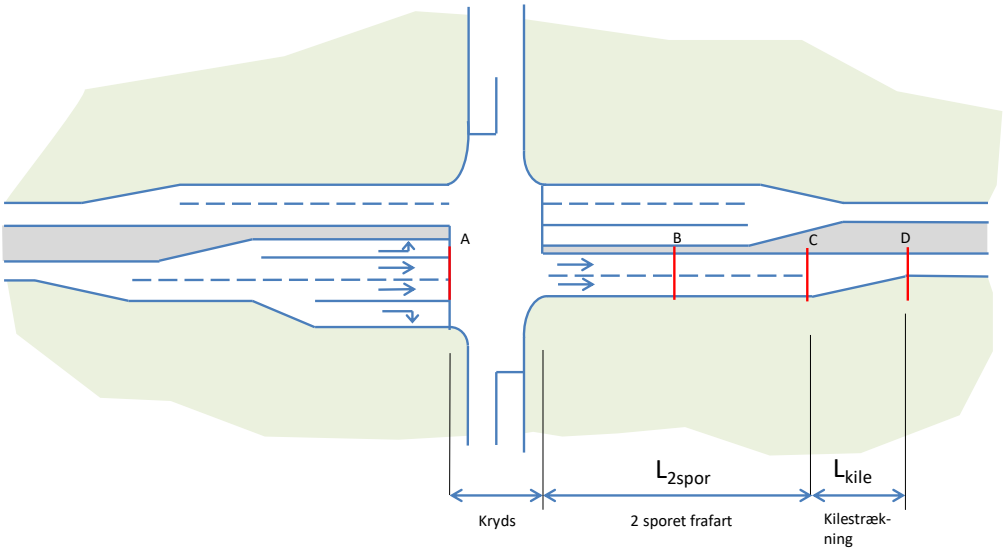
Sammenfatning

Vejdirektoratet har bedt Trafitec lave en undersøgelse af, hvilken betydning længden af 2-sporede frafarter før sporbortfald har på trafikafviklingen i signalregulerede kryds baseret på danske data. Nedenfor følger analysens metode og hovedresultater.

Metode

Der indgår data for i alt 7 forskellige lokaliteter, som er placeret forskellig steder i Danmark. Valg af krydslokaliteter er foretaget ud fra et kriterie om, at der skal være to gennemgående ligeudspor med efterfølgende sporbortfald, efter man er kørt ud af krydset. Krydsene skal have så store trafikmængder som muligt og være placeret i åbent land eller udkanten af byområde. Herudover er der lagt vægt på at finde kryds med variation i længde af den 2-sporede frafart, længde af kilestrækning, og om det er højre eller venstre spor, der bortfalder. Længden af den 2-sporede strækning (L_{2spor}) varierer mellem 37-186 m og længden af kilestrækningen mellem 43-190 m.

For alle kryds er der indsamlet kødata for en periode på mellem 2 og 4 timer. Der er indsamlet data for køsituationer, hvor minimum én trafikant har holdt stille for rødt, inden der køres ind i krydset. Data er indsamlet vha. fire videokameraer, placeret i Snit A, B, C og D, der tilsammen dækker trafikanternes rejse, fra de kører ind i krydset ved stoplinjen (Snit A), til de passerer snittet ved afslutning af kilestrækning (Snit D), se figur nedenfor.



Resultater
For de undersøgte kryds gælder, at trafikintensiteten i frafartssporene i høj grad er styret af signalet, hvorfor der ses høj belastning i en periode svarende til ca. grøntiden, hvorefter intensiteten falder markant i rødtiden. Der er således ikke registreret situationer, hvor der ved opstart for grønt stadig er trafik fra forrige omløb, som ikke er afviklet.

Sporbenyttelse
Andelen af trafikanter i det venstre tilfartsspor ved snit A stiger med andelen af tung trafik. Ved mere end 5-10 pe (personbilenheder) i kø er andelen af pe i de to spor stort set ens. Langt størsteparten af trafikanterne trækker først ind i det spor, der forsætter på selve kilestrækningen. Der er ikke noget, der tyder på, at valg af sporbenyttelse i tilfarten afhænger af længde af frafartsspor og kilestrækning.

Gaps
Ved måling af gaps betragtes trafik i de to spor som én strøm. Gaps måles mellem køretøjer fra bagende af forreste køretøj til forende af bagerste køretøj. De analyserede gap er målt mellem køretøjer hvor begge spor betragtes som én strøm. Gap mellem køretøjer ved kileslut viser, at gap reduceres jo flere køretøjer, der er i kø ved opstart, og at der er en tendens til, at gap er mindre for kryds med kort $L_{2spor.}$ Gap mellem køretøjer er i nogle kryds (typisk dem med kort L_{2spor}) mere følsom overfor trafikmængden ved opstart end kryds med lang L_{2spor}. Korte gaps er et udtryk for høj trafikintensitet.

Speed/Flow relation og acceleration
Hastigheden af det sidste køretøj i kø er tilsyneladende mere følsom overfor trafikmængde i kryds med kort L_{2spor}, set i forhold til frafarter med lang L_{2spor}. Hastighedsforskellen mellem første og sidste køretøj ved afslutning af kilestrækningen ligger på mellem 10-30 km/t, og hastigheden er faldende ved stigende trafikmængde (antal pe i opstartskø). Ved lille trafikmængde er hastighedsforskellen mellem første og sidste køretøj ca. 5-15 km/t, mens hastighedsforskellen ved stor trafikmængde er 15-35 km/t. På baggrund af indsamlede data er der lavet en model til beregning af hastighedsforskel mellem første og sidste køretøj set i forhold til trafikmængden og afstand fra stoplinje til slutning af kilestrækning.

Modellen har en $R^2 = 0{,}28$ (ikke specielt højt) og har følgende form:

$$H_{faktor} = 0{,}84 + 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot Dist_D \cdot N + 1{,}35 \cdot 10^{-4} \cdot Dist_D - 0{,}017 \cdot N$$

Hvor H_{faktor} er hastighedsreduktionsfaktoren for sidste køretøj set i forhold til første køretøj, $Dist_D$ er afstanden fra snit A til snit D, og N er trafikmængden i kø ved opstart.

Resultaterne kan bruges til en skønsmæssig vurdering af trafikafviklingen afhængig af krydsgeometri og trafikmængde. Ønskes et højt serviceniveau, hvor alle

trafikanter i kø ved opstart skal kunne accelerere næsten uhindret med høj hastighed frem til kileslut, skal krydset have en lang strækning med 2-sporet frafart/ kilestrækning. Er trafikmængden derimod knap så stor, eller accepteres en reduktion i hastighed for det sidste køretøj, kan længden reduceres.

Flow ved kileslut opgjort i korte tidsintervaller viser, at der typisk afvikles ca. 15-17 pe /20 sek., og at længden af L_{2spor} tilsyneladende ikke har indflydelse på flowet.

Baseret på data fra denne undersøgelse er det beregnet, hvor lang strækning en personbil i venstre spor skal bruge for at overhale et tungt køretøj i højre spor afhængig af personbilens position i køen ved opstart. Eksempelvis skal en personbil, der holder i kø som nummer fem i det venstre spor ved stoplinjen, bruge en strækning på 125 m for at kunne overhale et tungt køretøj, der holder forrest i det højre spor, når der startes op for grønt signal.

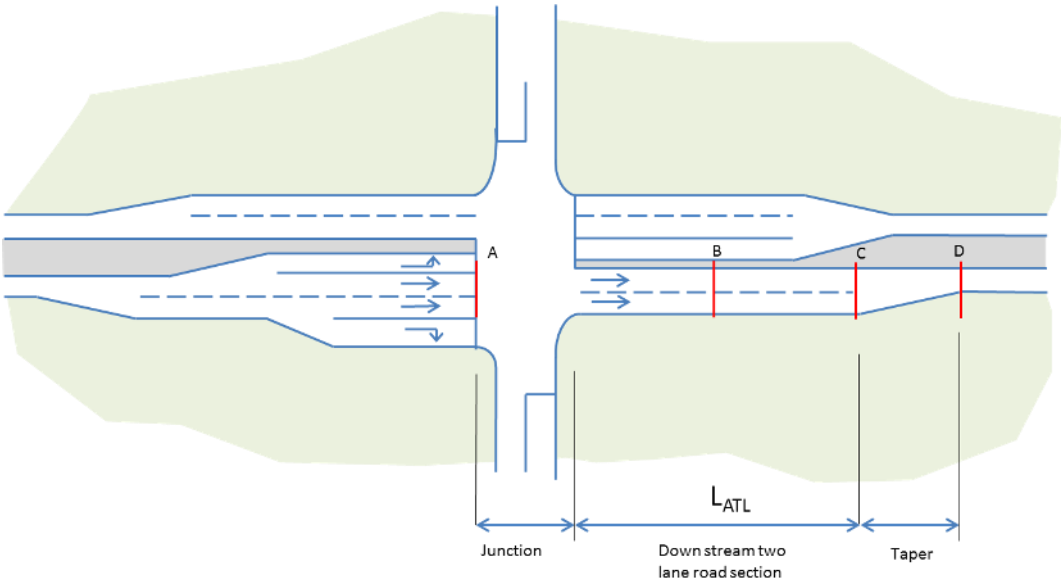
En teoretisk metode til beregning af minimumslængden for L_{2spor} med henblik på at undgå tilbagestuvning i krydset er forsøgt beregnet. Metoden beregner eksempelvis en længde af L_{2spor} på minimum ca. 115 m i tilfælde af 30 sek. grøntid.

English Summary

The Danish Road Directorate has initiated a study with the aim to find a relation between the traffic flow and the required length of the two-lane departure section downstream signalised junctions based on Danish data. The two-lane road section is also known as auxiliary through lane (L_{ATL}). The method and main results of the study are presented below.

Method
The study includes data for a total of 7 junctions located different places in Denmark. Selection of the junctions have been based on the criteria, that there must be a two-lane departure section (L_{ATL}), the junction should have a large volume of traffic and be situated in rural area or in the outskirts of urban area. The geometry of the 7 junctions has been chosen with regard to a variety in both lengths of the two-lane section before merge (L_{ATL}), the length of the taper section and whether the lane drop is at the right or left lane. The length of L_{ATL} in this study, varies between 37-186 m, and the length of the taper section between 43-190 m.

At all seven sites, traffic data are collected for a period of between 2 and 4 hours. Data has been collected for all green phases where at least one vehicles have stopped for red phase before entering the junction. Data is collected by using four video cameras placed in Section A, B, C and D (se figure below) covering the vehicles driving from the stop line (Section A) to the end of the taper section (Section D).



Results

For all seven junctions, the traffic intensity in L_{ATL} is largely controlled by the signals with a high traffic intensity for a period corresponding to the green phase and with intensity dropping significantly in the red phase. No situations with remaining queue at the lane drop (from the previous green phase) has been observed at green phase startup. Nor situations with queue spillback into the junction.

Lane usage

The share of road users in the left lane at section A increases with the proportion of heavy vehicles. In situations with more than 5-10 passenger car units (pcu) in the startup queue, the share of pcu in the two lanes are virtually the same. The majority of road users doesn't change to the lane that continues before entering the taper section. There is nothing in data that indicates a relation between the use of right or left lane at stop line and the length of L_{ATL} and the taper section.

Gaps

The analyzed gap is measured between vehicles where both lanes are regarded as one stream. All gaps are measured between rear end of the front vehicle to the front of the rear vehicle. Gap between vehicles at the end of the taper section shows that gaps are reduced the more vehicles in queue at the beginning of the green phase and that there is a tendency to smaller gaps at junctions with short L_{ATL}. Gap between vehicles at junctions with short L_{ATL} is apparently more sensitive to traffic volumes at startup than junctions with long L_{ATL}. Short gaps are an indication of high traffic intensity.

Speed/Flow relations and acceleration

The speed of the last vehicle in a queue is apparently more sensitive to traffic volume at junctions with short L_{ATL} than at junctions with long L_{ATL}. The speed difference between the first and the last vehicle at the end of the taper section is between 10-30 km/h and speed is decreasing with increasing traffic volume (number of pcu in queue). At low traffic volume, the speed difference between the first and last vehicle is around 5-15 km/h, while the speed difference at high traffic volumes is 15-35 km/h. Based on the collected data, a model for calculating the speed difference between the first and last vehicle in relation to the traffic volume and distance from the stop line to the end of the taper section is presented.

The model has an $R^2 = 0.28$ (not very high) and has the following form:

$$H_{faktor} = 0{,}84 + 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot Dist_D \cdot N + 1{,}35 \cdot 10^{-4} \cdot Dist_D - 0{,}017 \cdot N$$

Where H_{faktor} is a speed reduction factor for the last vehicle in relation to the first vehicle, $Dist_D$ is the distance from section A to section D and N is the volume of traffic in the queue at startup.

The results can be used to provide an estimation of traffic operation depending on junction geometry and traffic volume. If a high level of service is wanted where all drivers in the queue at startup, could accelerate almost unhindered at high speed until the end of the taper section, the total length of L_{ATL} and the taper section should be long. If the amount of traffic is moderate, or a reduction in speed for the last vehicle is accepted, the length of L_{ATL} and the taper section can be reduced.

The observed flow at the end of the taper section in short time intervals (20 sec intervals) shows that the traffic flow in average is approx. 15-17 pc per 20 secs and that L_{ATL} doesn't affect the flowrate.

Based on data from this study, the distance needed for a car in the left lane to overtake a heavy vehicle in the right lane has been estimated. The distance needed is estimated depending on individual vehicle's position in the queue at startup. For example, a passenger car in queue position number 5 in the left lane at the stop line, need a distance of 125 meters to overtake a heavy vehicle in the first queue position in the right lane when starting up in the beginning of the green phase.

A theoretical method to estimate the minimum length of L_{ATL} is also presented. The method is based on the condition that queue spillback into the junction from the lane drop should be prevented. In case of 30 sec green phase the minimum length of L_{ATL} has been estimated to 115 m.

1. Indledning

Vejdirektoratets trafikkapacitetsmanual skal ajourføres og videreudvikles med det formål at kunne beskrive trafikafviklingskonsekvenserne af forskellige anlægsløsninger. De forskellige kapacitetsbestemmende parameterværdier er oprindeligt baseret på tyske og amerikanske værdier. Der er i de senere år arbejdet målbevidst på at udskifte disse værdier, så de baseres på danske trafikmålinger og dermed tilpasses den danske trafikantadfærd.

Som en del af dette arbejde ønsker Vejdirektoratet at få undersøgt, hvilken betydning længden af 2-sporede frafarter før sporbortfald har på trafikafviklingen i signalregulerede kryds og rundkørsler baseret på danske data. I denne delrapport afrapporteres data, der omhandler signalregulerede kryds med to frafartsspor. Resultaterne fra en tilsvarende undersøgelse vedr. trafikafvikling i rundkørsler med to frafartsspor vil blive afrapporteret i et separat notat.

2. Metode

Midlertidige sporudvidelser før og efter signalregulerede kryds og rundkørsler etableres ofte for at undgå kapacitetsproblemer. Formålet med sporudvidelsen i kryds er at øge kapaciteten i grøntiden, idet trafikken kan afvikles i flere spor gennem krydset.

De forskellige kapacitetsbestemmende parameterværdier er oprindeligt baseret på tyske og amerikanske værdier. Der er i de senere år arbejdet målbevidst på at udskifte disse værdier, så de baseres på danske trafikmålinger og dermed tilpasses den danske trafikantadfærd.

På baggrund af danske data er der lavet en undersøgelse, der har til formål at belyse forskellige aspekter i forbindelse med, hvilken betydning længden af et ekstra frafartsspor har for trafikafviklingen i signalregulerede kryds.

Undersøgelsen indeholder en analyse af empiriske data fra syv signalregulerede kryds samt en beskrivelse af en teoretisk metode til vurdering af længden af den 2-sporede frafart.

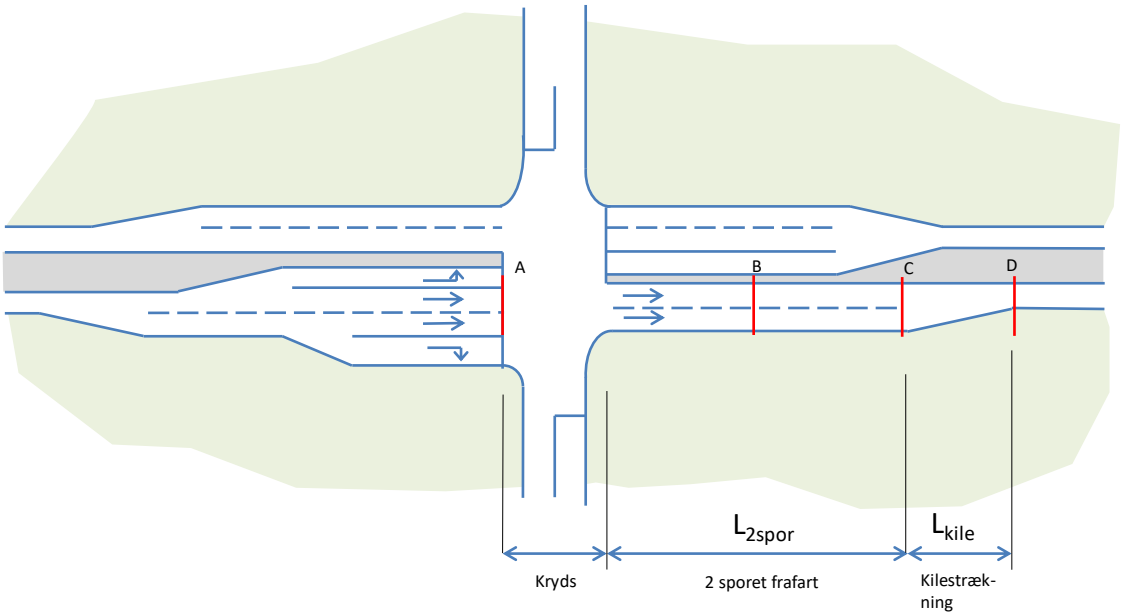
Kapitlet indledes med en beskrivelse af de lokaliteter, der er benyttes til dataindsamling. Herefter følger en beskrivelse af den metode, der ligger til grund for analysen, herunder hvilke data der indsamles samt den efterfølgende databehandling.

2.1 Krydsgeometri – empiriske data

Der indgår data for i alt syv forskellige lokaliteter, som er placeret forskellig steder i Danmark. Valg af krydslokaliteter er foretaget ud fra følgende kriterier:

- Der skal være to gennemgående ligeudspor med efterfølgende sporbortfald, efter man er kørt ud af krydset
- Tilstrækkelige trafikmængder
- Krydset skal være placeret i åbent land eller i udkanten af byområde
- Ingen eller kun få ind- og udkørsler på frafartsstrækningen
- Variation i længde af 2-sporet frafartsspor
- Variation i længde af kilestrækning
- Variation i hvilket spor der fortsætter efter sporbortfald
- En passende afstand til næste kryds således at tilbagestuvning undgås

En skitse af den overordnede krydsgeometri kan ses af Figur 1 med angivelse af strækningslængden med 2 frafartsspor (L_{2spor}) samt kilestrækningen (L_{kile}).



Figur 1. Overordnet geometri for analysekrydsene.

I Tabel 1 fremgår hoveddata for de syv udvalgte krydslokaliteter, og i Figur 2 ses et luftfoto af kryds nr. K4.

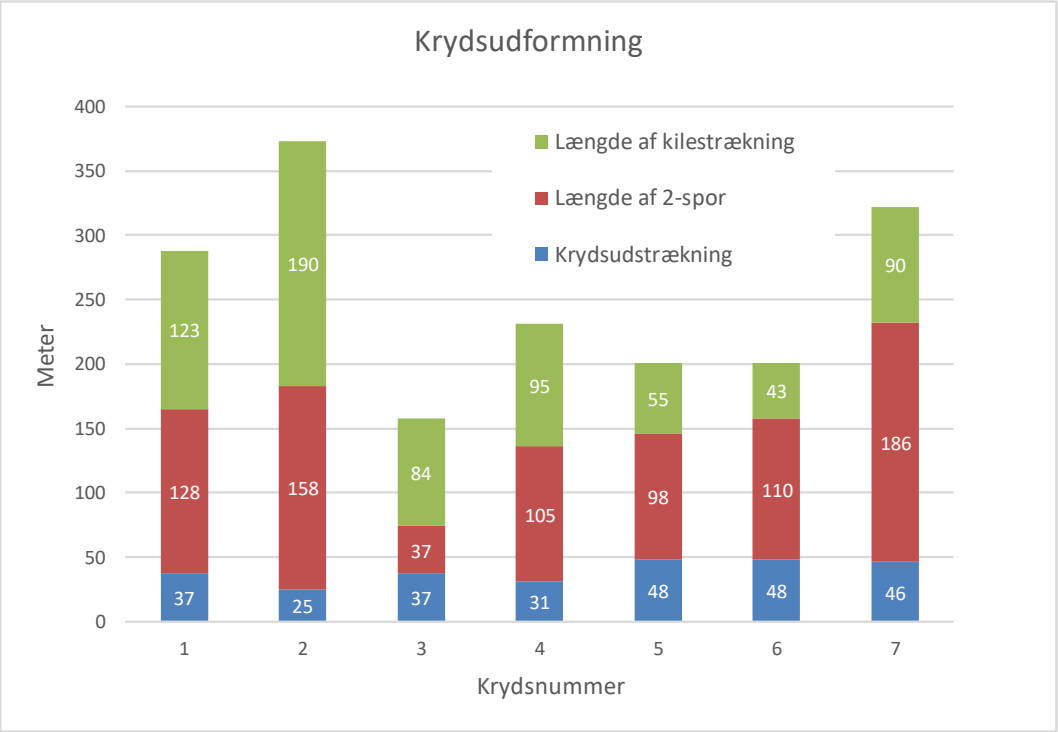
Kryds nr.:	Af-stand A-D (m)	L_{2spor} (m)	L_{kile} (m)	Spor der fort-sættes efter sporbortfald	Skiltning af spor-bortfald	Skiltet ha-stighed (km/t)	Vej-bredde af 2-sporet frafart (m)	Vej-bredde ved af-slutning af kiles-trækning (m)
K1	288	128	123	Midt	Nej	70	7,0	3,5
K2	373	158	190	Højre	Ja	60/70	7,0	4,7
K3	158	37	84	Venstre	Nej	70	6,9	4,7
K4	231	105	95	Højre	Ja	70	6,1	4,8
K5	201	98	55	Venstre	Ja	70	6,3	3,3
K6	201	110	43	Højre	Ja	70	6,8	5,2
K7	322	186	90	Venstre	Nej	60	6,2	4,7

Tabel 1. Angivelse af længde af hhv. frafartsspor og kilestrækning for de 7 kryds der indgår i undersøgelsen.

Figur 2. Oversigtsfoto af krydset K4 (Juelsmindevej/Horsensvej) taget fra drone.

Sporbredden på den 2-sporede frafartsstrækning ligger på mellem 3,0-3,5 m og er dermed meget ens for alle syv strækninger. Sporbredden efter indsnævring til ét spor ligger mellem 3,3 og 5,2 m og er dermed mere varieret.

Figur 3 viser krydsgeometrien for de 7 kryds mht. længden af de 2 frafartsspor (L_{2spor}), kilestrækningen (L_{kile}) og selve krydset udstrækning. Den samlede længde fra stopstreg til kileslut spænder fra 158 m (i kryds 3) til 373 m (i kryds 2).



Figur 3. Overordnet krydsudformning.

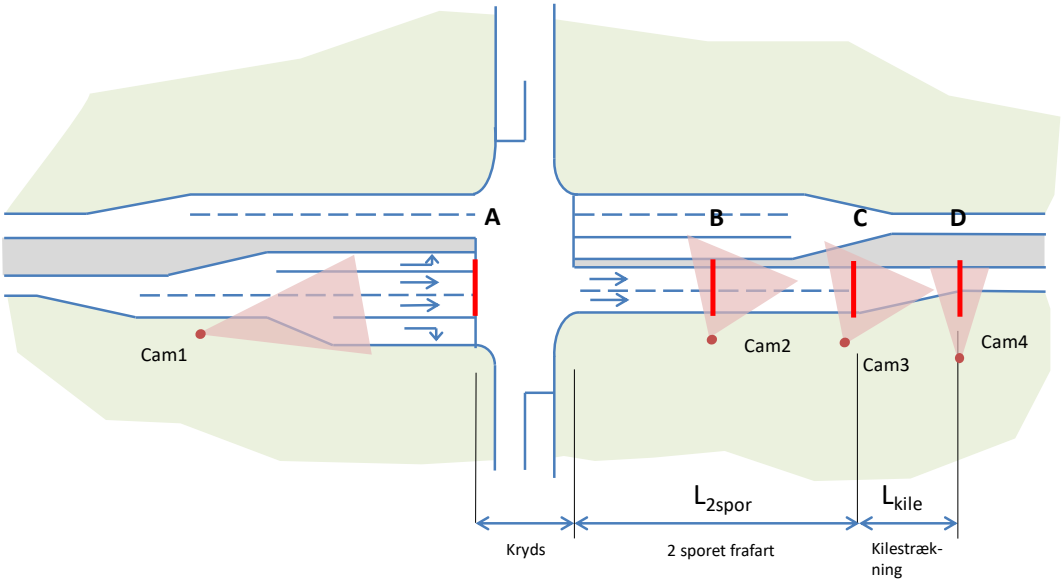
I bilag 1 er vedlagt luftfotos af de syv krydsstrækninger, der indgår i analysen.

2.2 Dataindsamling

For hver af de syv strækninger er der opsat i alt fire videokameraer der dækker trafikanterne fra ca. 50 m før, de kører ind i krydset, til de passerer det snit, hvor sporbortfaldet er fuldført, og der igen kun er ét frafartsspor. Der indsamles data fra i alt fire forskellige snit i observationsfeltet:

- Ved passage af stopstreg ved kørsel ind i krydset (snit A)
- Ved passage af et snit placeret 75 m efter man er kørt ud af krydset (snit B eller C afhængig af geometrien i den pågældende frafart)
- Ved passage af det snit hvor afmærkningen af den 2-sporede frafart slutter (Snit B eller C, afhængig af geometrien i den pågældende frafart)
- For enden af kilestrækningen hvor den 2-sporede frafart er helt indsnævret til ét kørespor (Snit D)

På Figur 4 ses en principskitse af observationsfeltet.



Figur 4. Placering af målesnit A, B, C og D samt kamera 1-4.

For alle syv strækninger er der foretaget videooptagelser af trafikken over en periode på 2-4 timer, se Tabel 2

Krydslokalitet	Dato	Tidsrum
K1	17/2 2014	15:00-17:45
K2	25/3 2014	14:30-17:30
K3	3/11 2014	14:30-17:30
K4	26/8 2014	14:00-17:00
K5	13/11 2014	14:30-16:15
K6	3/6 2015	13:00-17:00
K7	23/4 2015	14:30-17:30

Tabel 2. Angivelse af dato og tidsperiode for videooptagelser.

For én af de syv strækninger blev der udover videooptagelser fra niveau, som et forsøg også lavet droneoptagelser hvor hele observationsfeltet blev dækket med ét videokamera. Fordelen ved droneoptagelser er, at det er muligt at følge trafikanterne gennem hele observationsstrækningen, og dermed at registrere situationer med uhensigtsmæssig adfærd mellem flettende trafikanter. Til gengæld bliver en registrering af trafikanternes passage af snit B, C og D mere unøjagtigt set i forhold til kamera i niveau. Det skyldes dels at dronen indimellem bevæger sig lidt; og at hele observationsfeltet dækkes med ét kamera, se figur 2.

De fire kameraer i niveau står mere lige for de enkelte målesnit således, at det med forholdsvist stor nøjagtighed er muligt at registrere det enkelte køretøjs passage af snit B, C og D, se figur 6. Den efterfølgende analyse er alene baseret på data fra video optaget i niveau.

For de undersøgte kryds gælder, at trafikintensiteten i frafartssporene i høj grad er styret af signalet, hvorfor der ses høj belastning i en periode svarende til ca. grøntiden, hvorefter intensiteten falder markant i rødtiden. Der er således ikke registreret situationer, hvor der ved opstart for grønt stadig er trafik fra forrige omløb, som ikke er afviklet.

2.3 Databehandling

Til brug for den efterfølgende analyse, registreres for hvert signalomløb trafikanter, der er en del af den første kø, der opstår i forbindelse med, at signalet i hovedretningen skifter til grønt. Ved en kø forstås i denne sammenhæng situationer hvor:

- Mindst to ligeudkørende trafikanter har holdt stille for rødt lys, inden de kører ind i krydset.

- Alle ligeudkørende trafikanter, der har holdt stille for rødt, er en del af køen.

- Et køretøj som ikke har holdt stille for rødt signal, betragtes som en del af køen, hvis den enten overhaler minimum ét af de køretøjer, der har holdt stille for rødt, eller hvis køretøjet ankommer til enden af kilestrækningen (snit D) mindre end 2 sek. efter forankørende, hvor forankørende er en del af køen.

- Starttidspunktet for afviklingen af en kø er sat til det tidspunkt, hvor hovedsignalet skifter til grønt.

- En kø betragtes som afsluttet, når bagenden af det sidste køretøj i kø passerer snit D ved kileslut.

Kun data, hvor en kø alene består af ligeudkørende trafikanter gennem krydset, er medtaget.

Ud fra de synkroniserede videooptagelser registreres for hver kø følgende data:

- Tidskode hvor hovedsignalet bliver grønt (starttidspunkt for kø)
- Antal køretøjer fordelt på køretøjstype der ved passage at stopstreg (Snit A) kører i hhv. i det højre og det venstre ligeudspor.

- Tidskode for passage af for- og bagende af alle køretøjer i snit B og C, og om muligt delt på om trafikanterne kører i det højre eller venstre frafarts-spor
- Tidskode for passage af for- og bagende af alle køretøjer i snit D ved kile-slut

Køretøjstyper er delt i følgende kategorier:

1. Personbiler og små Varebiler
2. Lastbiler, Busser, Personbiler med anhænger og Varebiler med anhænger
3. Sættevogntog, Påhængsvogntog og Modulvogntog
4. Motorcykel/Knallert 45

Ved omregning fra antal køretøjer til personbilenheder (pe) er benyttet Vejdirektoratets omregningsværdier som angivet i Tabel 3.

Køretøjskategori			
Store knallerter og motorcykler	Person- og Varebiler	Lastbiler og busser	Sætte- og påhængsvogntog
0,5	1,0	1,5	2,0

Tabel 3. Personbilækvivalenter i forbindelse med signalregulerede kryds. Håndbog for Kapacitets- og Serviceniveau, september 2015.

Ud fra de indsamlede data undersøges, om det er muligt at finde en sammenhæng mellem kapacitet og længde af frafartsspor.

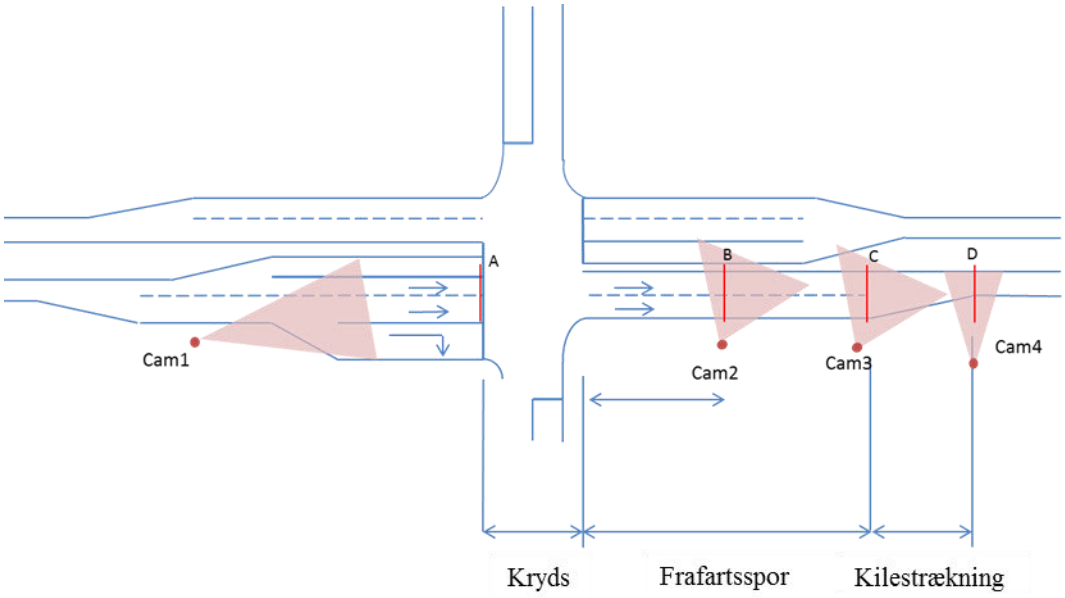
På Figur 5 ses en principskitse af observationsfeltet. For hver af de syv strækninger er der opsat i alt fire videokameraer der dækker trafikanterne fra ca. 50 m, før de kører ind i krydset, til de passerer det snit, hvor sporbortfaldet er fuldført, og der igen kun er ét kørespor.

Cam1 videofilmer de indkørende trafikanter i de to tilfartsspor ved stoplinje, set i forhold til hovedsignalet.

Cam2 videofilmer trafikanterne i Snit B, der altid er placeret i en afstand af 75 m, fra trafikanten kører ud af krydset.

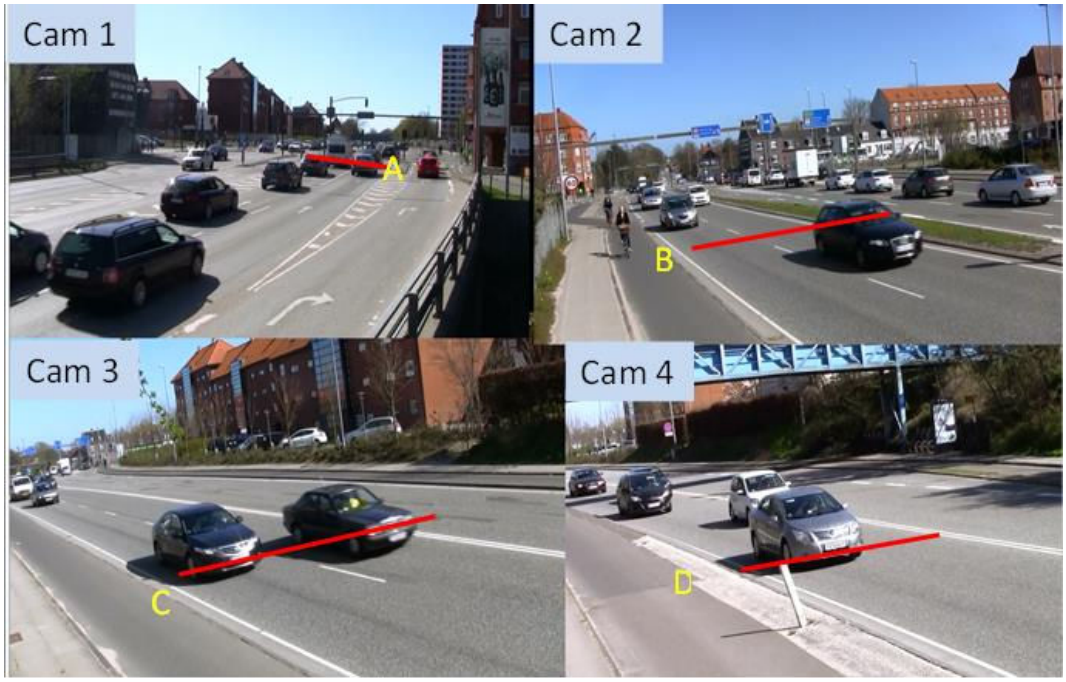
Cam3 videofilmer trafikanterne i det snit, hvor afmærkning af de to frafartsspor ophører.

Cam4 videofilmer trafikanterne ved kileslut, dvs. det snit hvor de to frafartsspor er indsnævret til ét spor.



Figur 5. Principskitse af observationsareal

Efterfølgende synkroniseres videooptagelserne for de fire videokameraer, således at det er muligt at følge de enkelte køretøjer, fra de kører ind i krydset til slutningen af kilestrækningen.



Figur 6. Synkronisering af de fire videokameraer gør det muligt at følge det enkelte køretøjs passage af de fire snit gennem observationsfeltet.

På baggrund af de indsamlede data undersøges, om det er muligt at finde en sammenhæng mellem trafikafviklingen og længden af frafartssporet. Nogle af de faktorer, der vil blive set på, er:

- Valg af sporbenyttelse set i forhold til antallet af pe i kø ved snit A, B, C og D. Det forventes at valg af sporfordeling afhænger af både antallet af pe i kø, andelen af tunge køretøjer samt længden af den 2-sporede frafartsstrækning samt kilestrækningen.

- Gaps mellem køretøjer i snit B, C og D. Det forventes, at der er en sammenhæng mellem kapacitet og tidsafstand mellem køretøjer, når de passerer snit B, C og D.

- Hvor på frafartsstrækningen trafikanterne fletter ind i det spor, der fortsætter efter sporbortfald.

- Den tid det tager at afvikle en kø set i forhold til antallet af pe i kø, andelen af tung trafik i en kø samt længden af den 2-sporede frafart og kilestrækningen.

Ved angivelse af tung trafik forstås i denne sammenhæng, busser person- og varebiler med anhænger, sættevogntog, påhængsvogntog og modulvogntog.

På baggrund af de indsamlede data og analyser undersøges, om det er muligt at komme med et bud på, hvor lang en 2-sporet frafartsstrækning og kilestrækning bør være set ud fra et trafikafviklingsmæssigt hensyn.

3. Resultater fra empiriske data

Nedenfor følger en beskrivelse af de indsamlede data samt den efterfølgende data-behandling og resultater.

3.1 Data

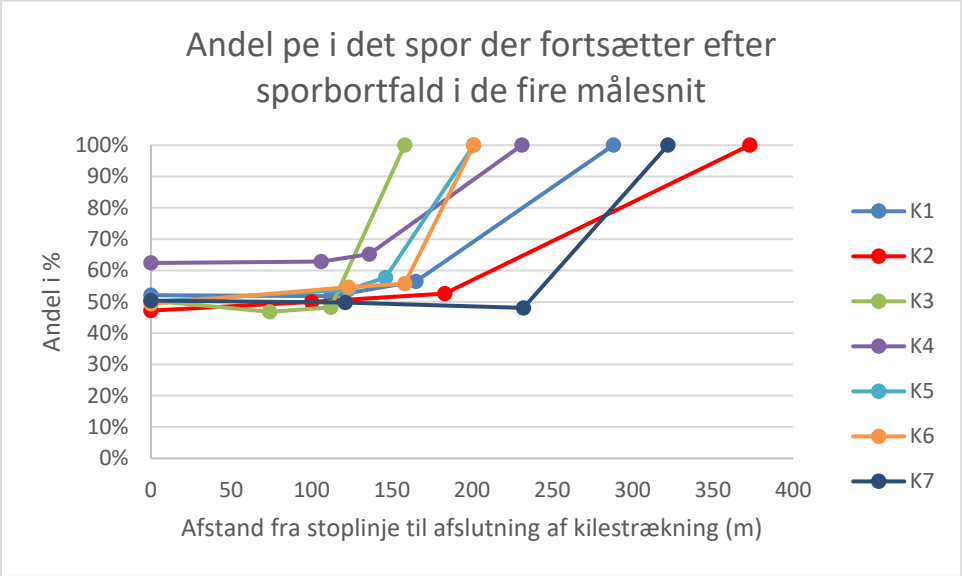
I Tabel 4 ses en opgørelse over hvor mange kødata der er indsamlet for hver af de syv strækninger. Det er disse kødata, der ligger til grund for den efterfølgende analyse.

Kryds nr.	Antal obs. af kø	Antal obs. med kø UDEN tung trafik	Antal obs. med kø MED tung trafik	Andel tung trafik	Antal pe i kø (middel)
K1	55	44	11	3%	9,4
K2	58	44	14	2%	14,8
K3	53	38	15	3%	11,9
K4	71	50	21	5%	9,8
K5	39	34	5	2%	7,7
K6	78	26	52	13%	10,6
K7	49	31	18	2%	22,4

Tabel 4. Datagrundlag mht. antal registrerede køsituationer, andelen af tung trafik samt det gennemsnitlige antal pe i kø for hver af de syv lokaliteter. Andelen af tung trafik er opgjort som det gennemsnitlige antal tunge køretøjer per kø per lokalitet.

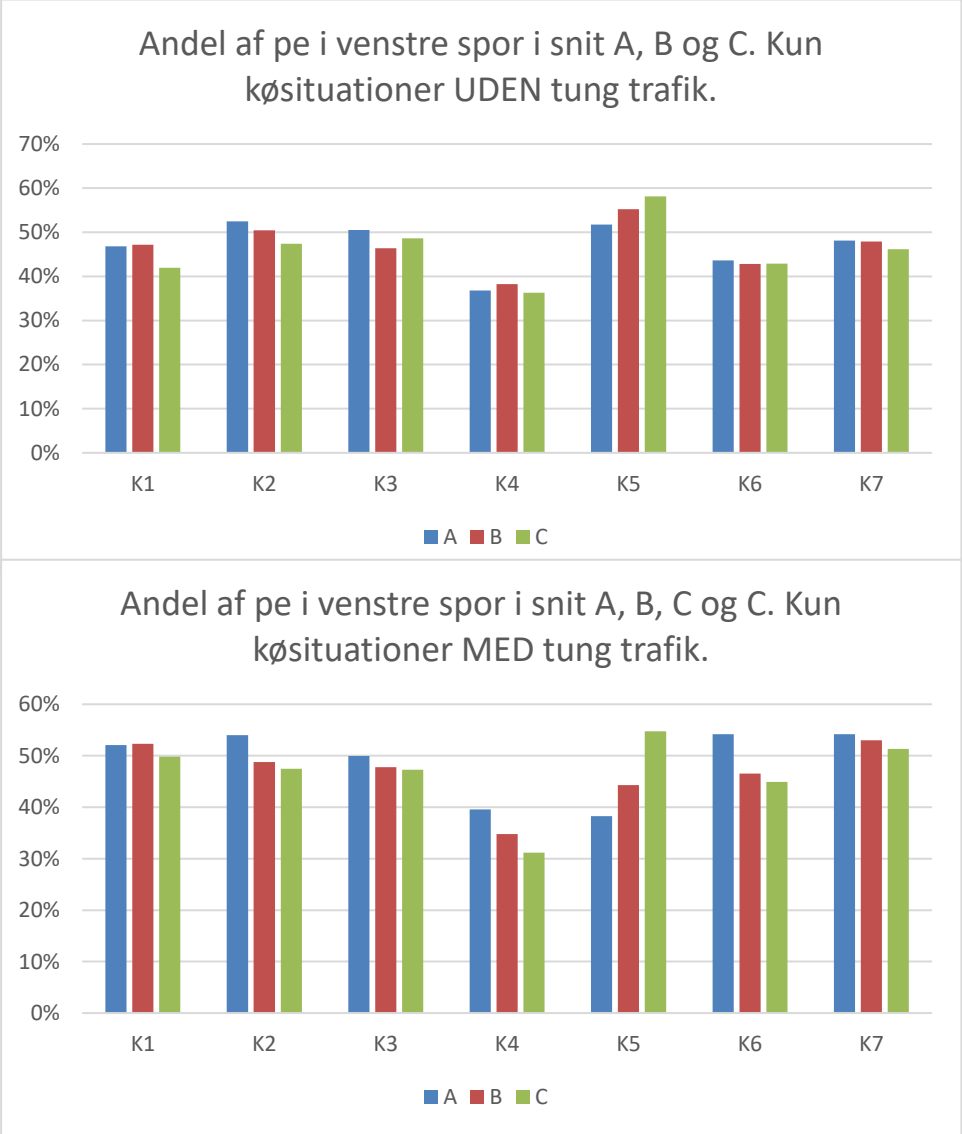
3.2 Sporbenyttelse

I Figur 7 ses andelen af pe i de to spor ved passage af snit A, B, C og D. Ved passage af snit D, ved kileslut, hvor strækningen igen er indsnævret til ét kørespor, er alle trafikanter flettet ind. Størsteparten af trafikanterne fletter først ind det spor, der fortsætter på selve kilestrækningen. Der er således tilsyneladende ingen sammenhæng mellem længde af strækning fra stoplinje til kileslut og hvor på strækningen, trafikanterne fletter ind i det spor, der fortsætter.



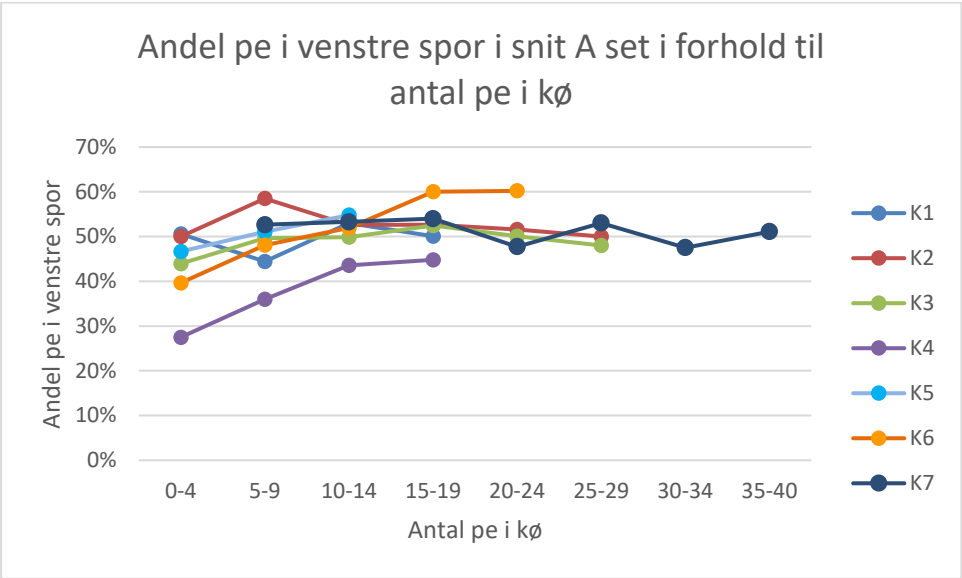
Figur 7. Andel af pe i det spor der fortsætter efter sporbortfald for de fire målesnit. For K3, K5 og K7 fortsætter venstre efter sporbortfald, for K2, K4 og K6 fortsætter højre spor. For K1 sker sammenfletningen mellem de to spor.

På Figur 8 ses andelen af pe i snit A, B og C, delt på kryds samt kø med hhv. uden tung trafik. For fem af de syv kryds ses, at andelen af pe, der benytter det venstre spor, stiger når der er ét eller flere tunge køretøjer i en kø. Dette er specielt tydeligt for K6, hvor andelen af tung trafik er 13%, og for K7 som er karakteriseret ved at have mange pe i kø per omløb.



Figur 8. Andel af pe der kører i det venstre spor ved passage af snit A, B og C for køsituationer hhv. UDEN (øverst) og MED (nederst) tung trafik delt på de 7 kryds (K1-K7).

I Figur 9 ses andelen af pe der benytter det venstre tilfartsspor ved stoplinje (snit A) set i forhold til antallet af pe i kø. Jo mere trafik desto mere ligelig fordeling af pe i de to spor. Ved små trafikmængder er der en tendens til, at andelen af trafikanter er størst i det højre spor. At andelen af pe i venstre spor er specielt højt for K6 kan forklares ved, at andelen af tung trafik på 13% er væsentligt højere end for de 6 andre kryds, hvor andelen ligger på 2-5%.



Figur 9. Andel af pe i venstre spor ved stoplinje (snit A) set i forhold til antal pe i kø.

3.3 Gaps mellem køretøjer

De analyserede gap er målt mellem køretøjer, hvor begge spor betragtes som én strøm. Alle gap er målt mellem køretøjer (bagende af forreste køretøj til forende af bagerste køretøj)

Tabel 5 viser det gennemsnitlig gap (sekunder) mellem køretøjer målt i snit D (ved kilestrækningens ophør). Tabellen er opgjort for forskellige antal køretøjer i kø pr omløb. Krydsene er sorteret med stigende længde fra stoplinje til snit D og tabelcellerne er farvet efter deres værdi (grøn = stort gap / rød = lille gap).

Afstand fra A-D (m)	Krydsnr	Ant ktj i kø pr omløb						
		0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34
158	3	1,58	1,18	0,96	0,90	0,87	0,82	
201	5	1,52	1,43	1,24	1,10			
201	6	2,59	1,69	1,10	0,88	0,69		
231	4	1,82	1,42	1,12	0,99	0,80	0,71	0,93
288	1	1,71	1,33	1,03	1,04	0,88	0,85	
322	7		1,02	1,19	1,10	0,93	0,92	0,90
373	2	1,88	1,03	1,03	1,00	1,01	0,92	

Tabel 5. Gennemsnitlig gap (sek) ved afslutning af kilestrækning (snit D). Afstanden strækker sig fra start af stoplinje (snit A) til slutning af kilestrækning (Snit D).

Gap-værdierne ligger typisk i intervallet 0,9-1,3 sekunder.

Af tabellen ses, at antal køretøjer i kø har indflydelse på gap-værdien. Jo flere køretøjer i kø pr omløb, jo mindre bliver det målte gap i snit D.

Strækningslængden fra snit A til snit D synes også at have betydning, især ved trafikmængder > 15 kt i kø pr omløb. Her er ses de laveste gap-værdier for de korteste strækningslængder.

Ved lav trafikmængde (0-4 og 5-9 ktj. i kø pr omløb) synes kryds med mellemlang afstand til snit D (200-300m) at have de største gap-værdier. Kryds med de længste afstande (>300m) har lidt lavere gennemsnitlig gap.

Tabel 6 viser variationen (standardafvigelsen) i de målte gap i snit D. Jo mindre variation desto tættere må det formodes, at køretøjerne kører, hvilket er et udtryk for trafikafvikling ved høj intensitet.

		Ant ktj i kø pr omløb						
Afstand fra A-D (m)	Krydsnr	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34
158	3	0,73	0,64	0,52	0,41	0,41	0,39	
201	5	0,48	0,55	0,46	0,36			
201	6	1,49	1,23	0,64	0,57	0,51		
231	4	0,80	0,76	0,65	0,61	0,51	0,31	0,34
288	1	0,73	0,61	0,68	0,59	0,57	0,42	
322	7		0,54	0,74	0,66	0,53	0,56	0,43
373	2	1,82	0,56	0,57	0,62	0,63	0,48	

Tabel 6. Variation i gennemsnitlig gap (sek.) ved afslutning af kilestrækning (snit D).

Af Tabel 6 ses, at når trafikmængden pr omløb stiger, reduceres variationen i gap. Derudover ses en svag tendens til, at kryds med kort afstand til snit D har lidt lavere variation, hvilket primært ses for trafikmængder større end 20 ktj. pr omløb.

Tabel 7 viser det gennemsnitlige gap (sekunder) i snit C (hvor den 2-sporede strækning ophører). Tabellen er opdelt på kryds opgjort efter strækningslængden frem til snit C samt trafikmængden pr omløb.

		Ant ktj i kø pr omløb						
Snit C (m)	Krydsnr	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34
112	3	1,39	0,94	0,88	0,81	0,75	0,71	
136	4	1,53	1,31	0,96	0,90			0,90
146	5	1,26	1,20	0,95	0,86			
158	6	2,35	1,55	1,01	0,81	0,59		
165	1	1,42	1,06	0,88	0,90	0,85	1,17	
183	2	1,01	0,81	0,85	0,85	0,89	0,78	
232	7		0,84	1,10	1,07	0,87	0,89	0,83

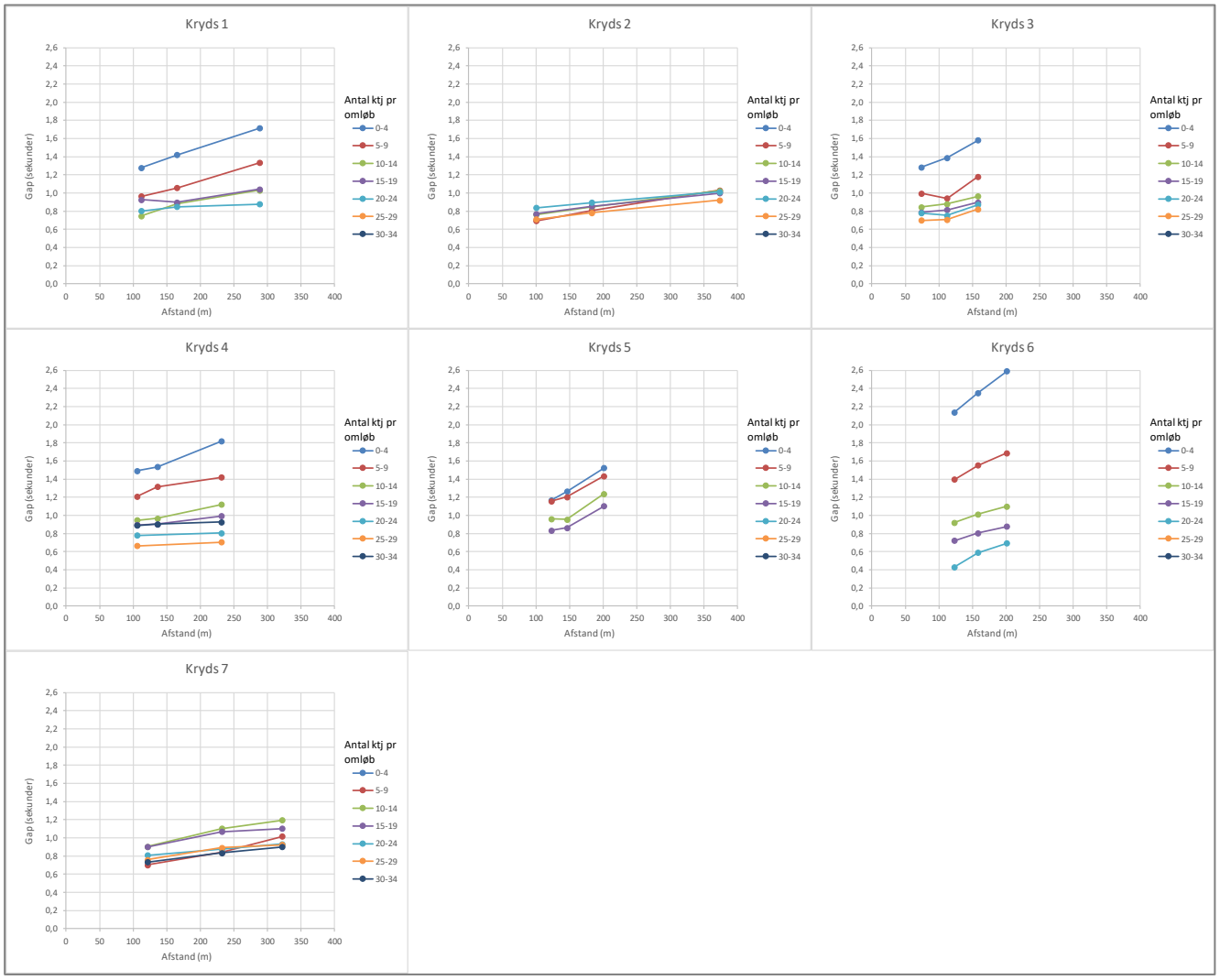
Tabel 7. Gennemsnitlig gap (sek.) i snit C.

Igen ses, at øget trafikmængde giver mindre gaps. Kryds 3 (som har den korteste afstand til snit C) har de korteste gaps, mens der ikke ses nogen entydig forskel på de resterende kryds.

Variationen i gaps målt i snit C viser ingen systematik i forhold til trafikmængde eller længden til snit C.

Figur 10 viser det gennemsnitligt målte gap i de respektive kryds for snit B, C og D opdelt på trafikmængden.

Generelt ses, at gap-værdierne øges, når afstanden til kryds øges. De højeste gap-værdier findes således i snit D. Desuden ses, at gap-værdierne mindskes når trafikmængden øges. For nogle kryds har trafikmængden stor betydning for gap-værdierne, hvilket kan ses i f.eks. kryds 6. Kryds 6 er endvidere karakteriseret ved en stor andel af tunge køretøjer (13% i K6 mod 2-5% i de 6 øvrige kryds).



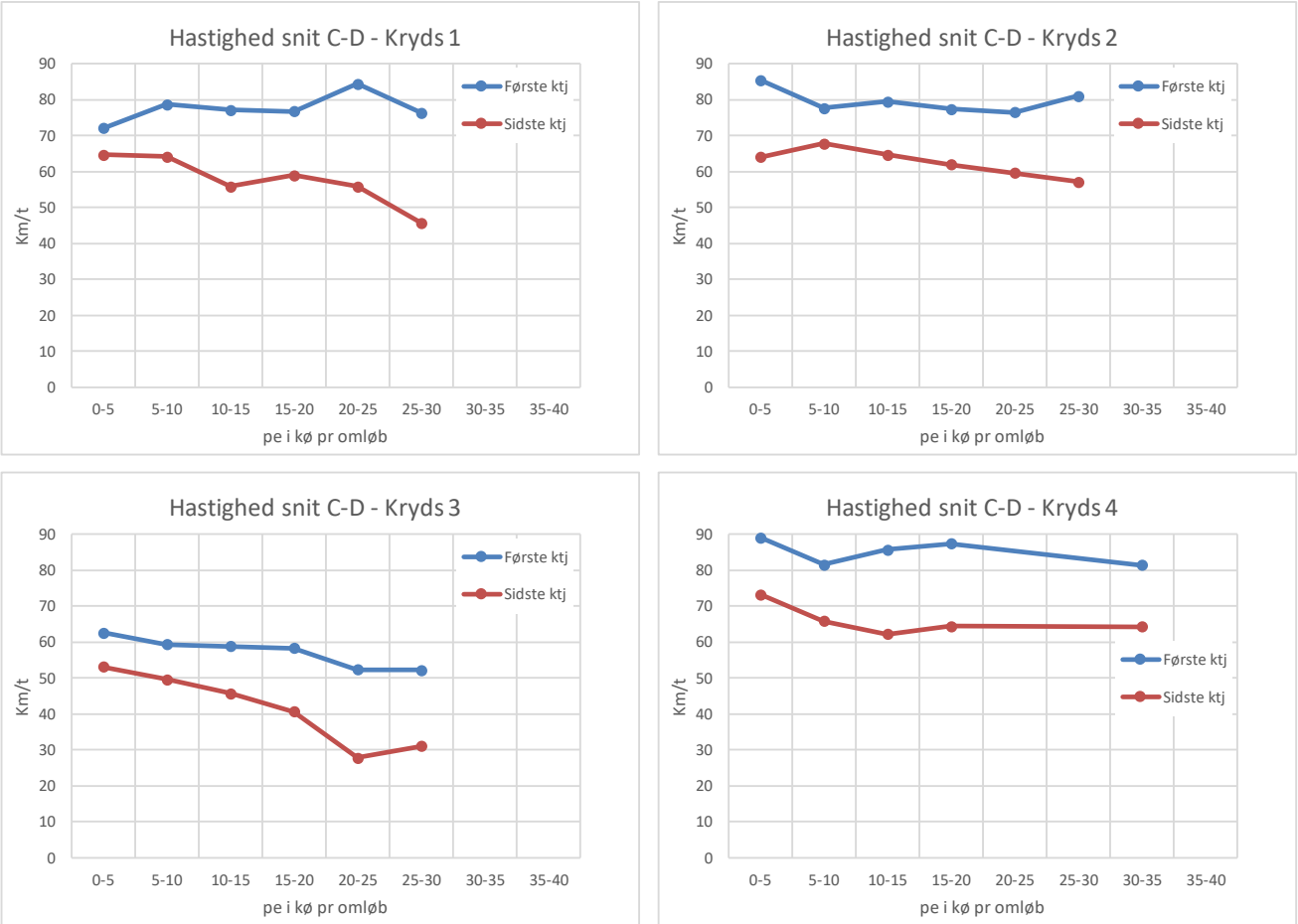
Figur 10. Målt gap i kryds 1-7 i snit B, C og D ved forskellig trafikmængde.

3.4 Speed-flow relation (kilestrækningen)

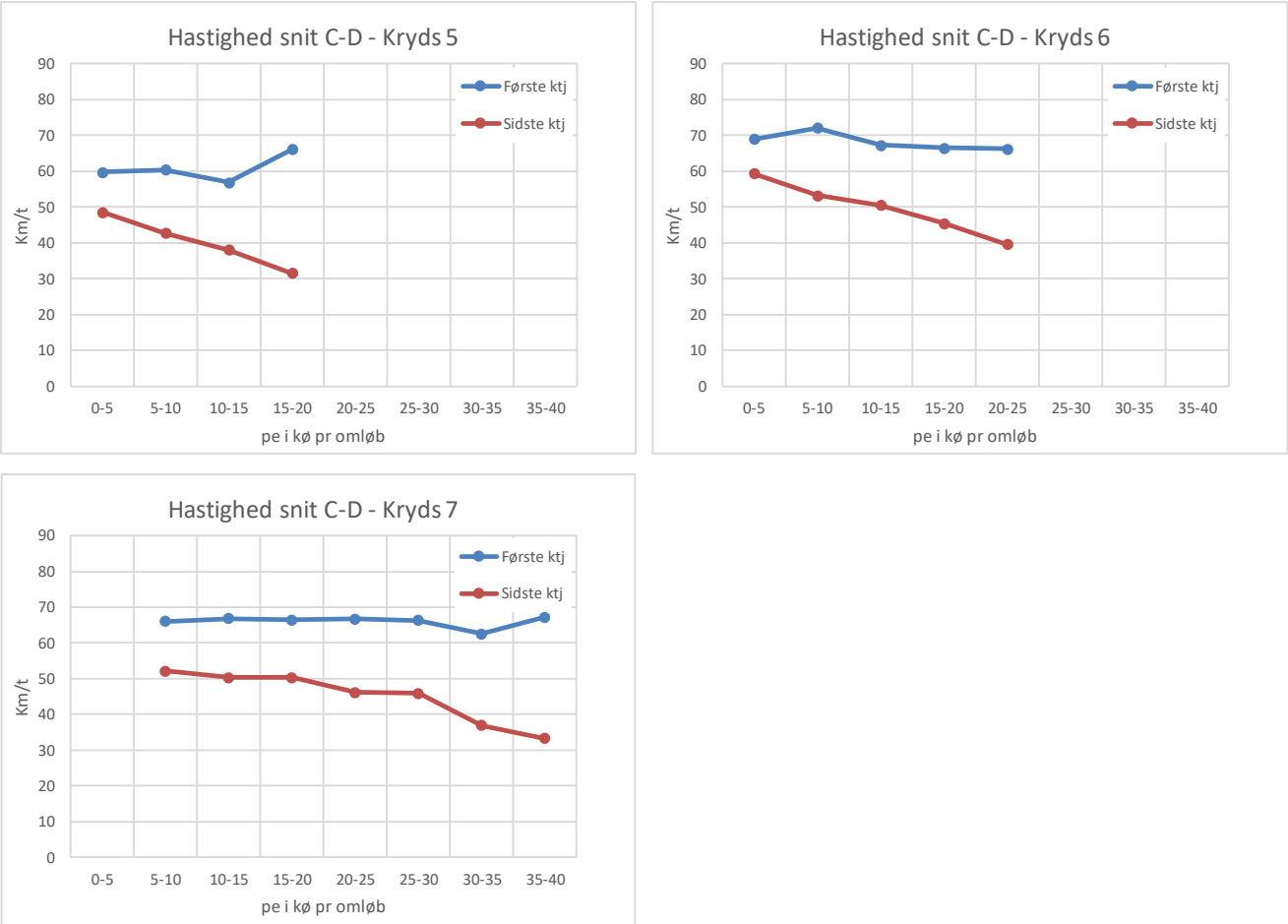
Figur 11 og Figur 12 viser speed-flow relation for henholdsvis det første og det sidste køretøj i køen på delstrækningen mellem snit C-D (kilestrækningen). Bemærk at hastighedsgrænsen for de fleste kryds er 70 km/t, se Tabel 1.

Hastigheden for det første køretøj må forventes at være rimelig uafhængig af antallet af pe i kø pr omløb idet de første køretøj, kan accelerere forholdsvis uhindret i frafartssporene.

Det sidste køretøj vil derimod været påvirket af trafikafviklingen i frafarten (og ved sporbortfaldet), og derfor vil hastigheden af det sidste køretøj i stor grad udtrykke, hvor godt trafikafviklingen fungerer. Lav hastighed, set i forhold til hastigheden for det første køretøj, er således et udtryk for dårlig trafikafvikling.



Figur 11. Speed-flow relation for første og sidste køretøj i kø (kryds 1-4) målt på delstrækningen mellem snit C-D (kilestrækningen).



Figur 12. Speed-flow relation for første og sidste køretøj i kø (kryds 5-7) målt på delstrækningen mellem snit C-D (kilestrækningen).

Af figurerne ses, at:

- hastigheden for det første køretøj er ca. 10-30 km/t højere end hastigheden for det sidste køretøj
- hastigheden er faldende ved stigende trafikmængde (antal pe i opstartskø)
- hastigheden for det sidste køretøj er mere påvirkelig af trafikmængden end hastigheden for det første køretøj
- Ved lav trafikmængde er hastighedsforskellen mellem første og sidste køretøj ca. 5-15 km/t, mens hastighedsforskellen ved stor trafikmængde er 15-35 km/t

For at undersøge hvordan hastighedsforskellen mellem første og sidste køretøj afhænger af trafikmængden (antal køretøjer i kø pr omløb) og afstanden til snit D, er der lavet lineære regressionsanalyser.

Hastighedsforskellen mellem første og sidste køretøj udtrykkes ved en hastigheds-reduktionsfaktor. Hvis reduktionsfaktoren f.eks. er 0,75, betyder det at sidste køretøj har en hastighed på 0,75 x hastigheden af det første køretøj. Jo større hastighedsreduktionsfaktoren er, jo mere påvirkes det sidste køretøjs hastighed som følge af trafikmængden, krydsgeometri og sporreduktion.

Modellen har en $R^2 = 0{,}28$ (ikke specielt højt) og har følgende form:

$$H_{faktor} = 0{,}84 + 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot Dist_D \cdot N + 1{,}35 \cdot 10^{-4} \cdot Dist_D - 0{,}017 \cdot N$$

Hvor $Dist_D$ er afstand fra snit A til snit D og N er trafikmængden i kø ved opstart.

Resultatet kan ses i Tabel 8. Her er hastighedsreduktionsfaktoren angivet opdelt på trafikmængden i kø ved opstart og afstanden til snit D (kileslut).

Af tabellen ses, at øget trafik giver større hastighedsreduktioner for sidste køretøj, og at mindre afstand til snit D ligeledes giver en større hastighedsreduktion.

Eksempelvis vil en situation med 20 pe i kø ved opstart i et kryds med 300 m til kileslut give en hastighed for sidste køretøj på 0,71 x hastigheden af første køretøj.

Afstand til snit D (m)	Trafik i kø pr omløb (Antal pe)					
	5	10	15	20	25	30
150	0,80	0,74	0,68	0,61	0,55	0,48
200	0,82	0,76	0,70	0,64	0,59	0,53
250	0,83	0,78	0,73	0,68	0,62	0,57
300	0,84	0,80	0,75	0,71	0,66	0,62
350	0,86	0,82	0,78	0,74	0,70	0,66
400	0,87	0,84	0,80	0,77	0,74	0,71

Tabel 8. Hastighedsreduktion for sidste køretøj (set i forhold til første køretøj) ved forskellig trafikmængde og afstand fra stoplinje til kileslut.

Resultaterne kan bruges til en skønsmæssig vurdering af trafikafviklingen afhængig af krydsgeometri og trafikmængde.

Ønskes et højt serviceniveau, hvor alle trafikanter i kø ved opstart skal kunne accelerere næsten uhindret med høj hastighed frem til kileslut, skal krydset have en lang strækning med 2-sporet frafart og kilestrækning. Er trafikmængden derimod knap så stor, eller accepteres en reduktion i hastighed for det sidste køretøj, kan længden reduceres.

Andre forhold kan også spille ind på hastigheden, som fx:

- Andel af tung trafik
- Udformning af sporbortfald (højre eller venstre spor bibeholdes)
- Skiltning af vognbaneforløb (formentlig mindre betydning)
- L_{kile} vs. L_{2spor}. Hvor lang skal L_{kile} være i forhold til L_{2spor}.
- Tilladt hastighedsgrænse
- Bredde af det spor der fortsætter efter sporbortfald

Disse forhold er ikke vurderet nærmere i nærværende undersøgelse, idet datamaterialet bliver for spinkelt at konkludere på.

3.5 Acceleration ved opstart

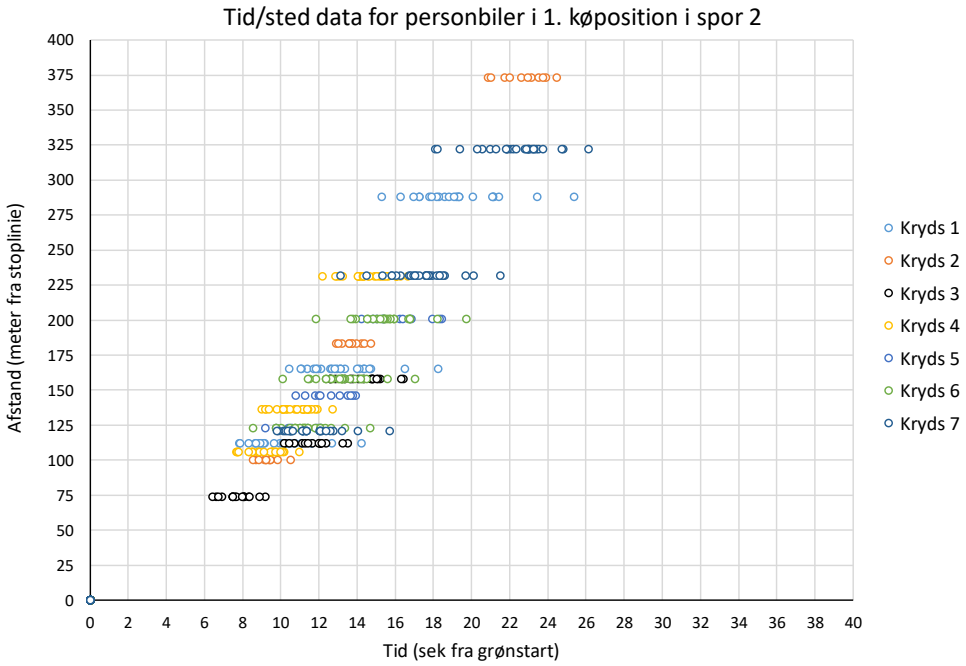
Ud fra de registrerede data er det muligt at vurdere igangsætningen ved opstart fra stoplinjen, når grønfasen begynder. Derved kan det fx vurderes, hvor lang en strækning en personbil skal bruge på at overhale et eventuelt tungt køretøj placeret i nabosporet.

For udvalgte omløb er tidskode for grønfase start, samt tidskode for passage ved snit B, C og D analyseret. Kun køretøjer i 1. køposition er medtaget således, at der kun ses på køretøjer med fri mulighed for acceleration ved opstart.

Kun omløb hvor det samlede antal køretøjer i kø er begrænset er medtaget, således at trafikmængden ikke kan tænkes at påvirke trafikafviklingen.

Der er set på personbiler placeret i 1. køposition i spor 2 (venstre tilfartsspor) samt tunge køretøjer placeret i 1. køposition i spor 1 (højre tilfartsspor).

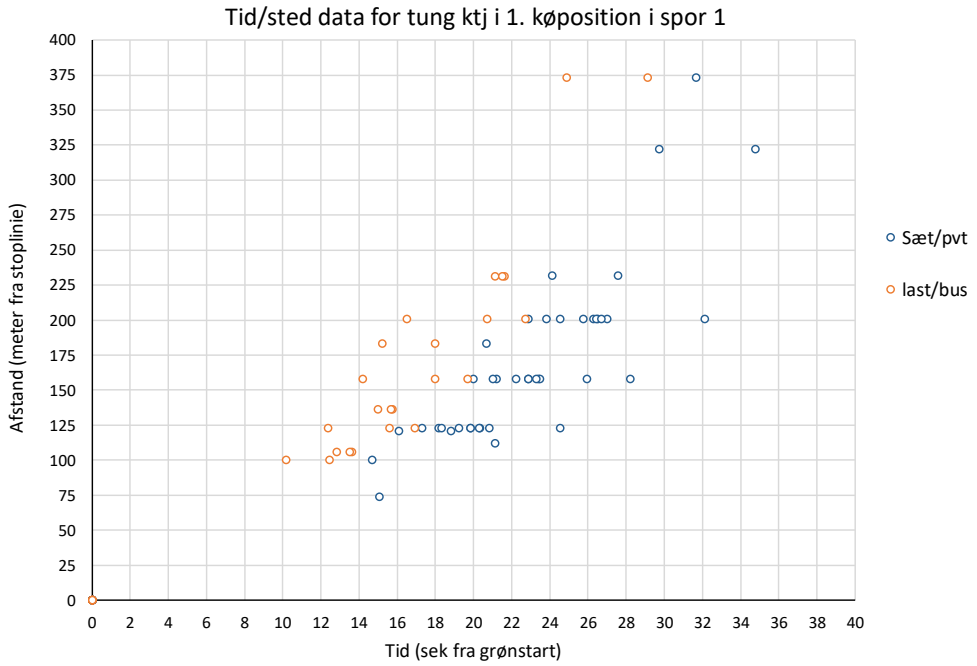
Figur 13 viser de registrerede tider ved passage af snit A, B, C og D for personbiler i spor 2 placeret i 1. køposition. Data er opdelt på de forskellige kryds og vist med respektive afstande i forhold til stoplinje. Tid/sted data fra i alt 141 personbiler indgår i figuren.



Figur 13. Tid/sted data for personbiler i 1. køposition i spor 2.

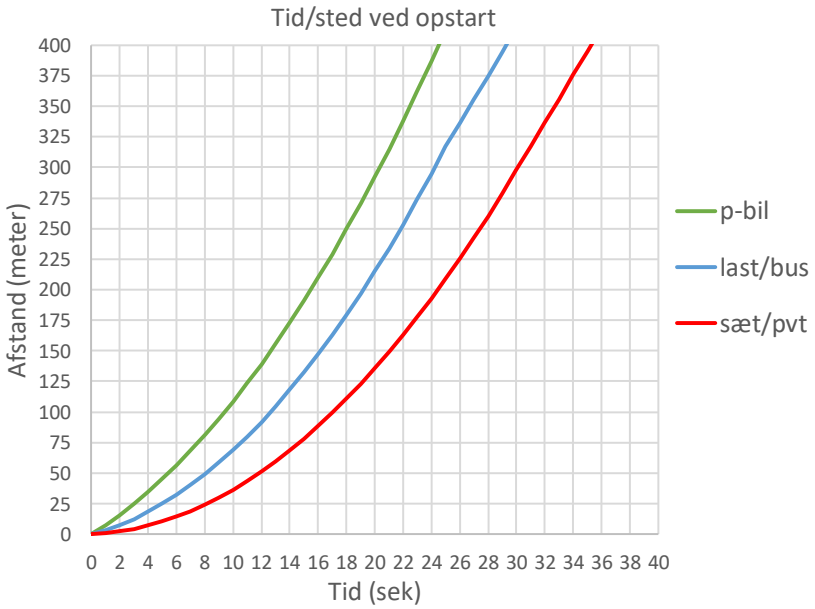
Ikke overraskende ses der nogen spredning i data, samt en mindre forskel i tid/sted data for de forskellige kryds. Det vurderes dog, at data for alle kryds kan slås sammen og betragtes som en samlet gruppe, hvori gennemsnitsværdier kan udregnes.

Figur 14 viser de tilsvarende tid/sted data for tunge køretøjer i spor 1. Antallet af observationer er her mere begrænset, og der indgår data fra i alt 14 sæt/pvt og 8 last/bus. Af figuren ses at lastbil/bus har en større acceleration end sæt/pvt.



Figur 14. Tid/sted data for tunge køretøjer i 1. køposition i spor 1.

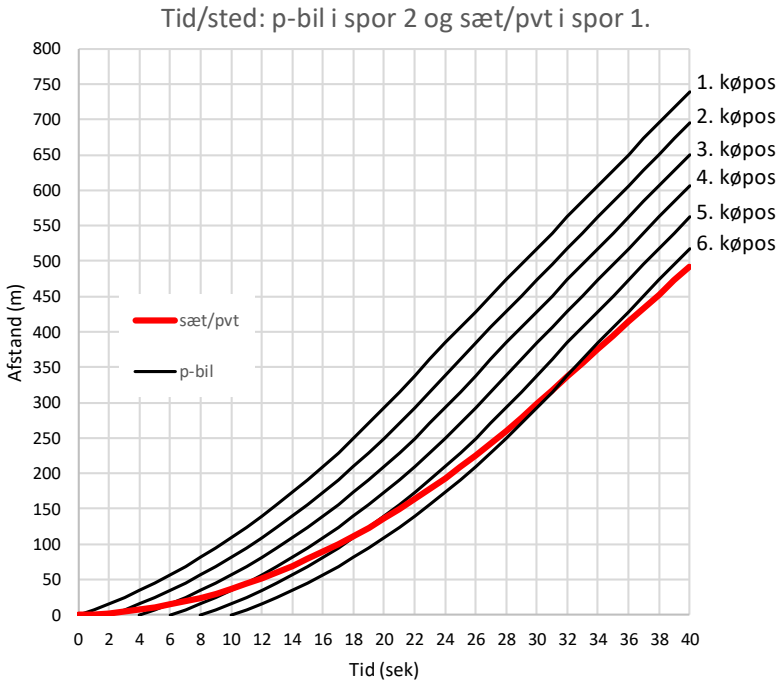
Baseret på data fra Figur 13 og Figur 14 er der beregnet nogle omtrentlige gennemsnitsværdier for tid/sted data for henholdsvis p-bil, last/bus og sæt/pvt, se Figur 15. Det antages at maksimal hastighed er 80 km/t for p-bil og 70 km/t for tunge køretøjer.



Figur 15. Gennemsnitlig tid/sted data for personbil, lastbil/bus og sættevogn/påhængsvogntog ved opstart fra stoplinje.

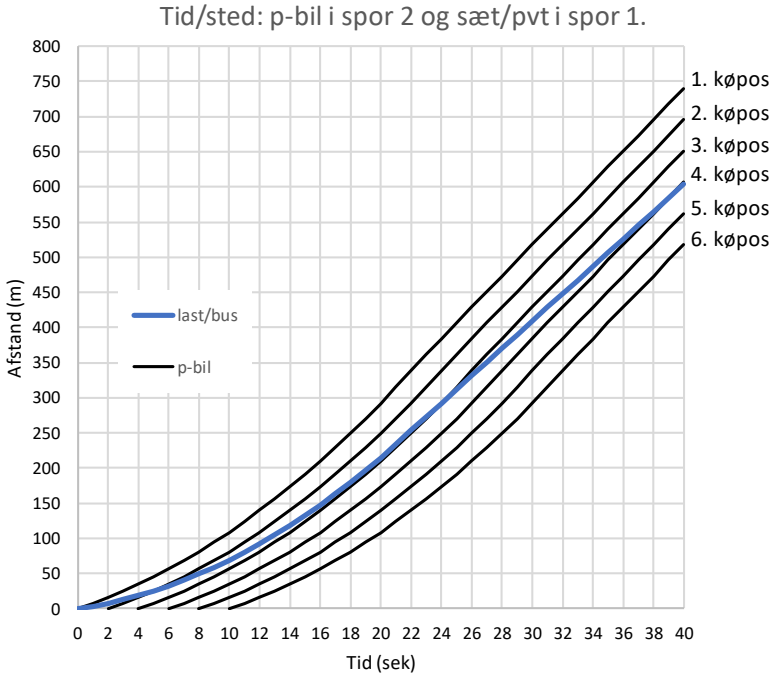
I en situation med flere køretøjer i spor 2 og et enkelt tungt køretøj i spor 1 vil tid/sted data se ud som vist i Figur 16. Det antages, at personbiler i spor 2 har en konstant headway på 2 sek., og at de accelererer op til en maksimal hastighed på 80 km/t.

Af figuren ses, at 4 personbiler vil kunne overhale en sæt/pvt på de første ca. 50 meter. Personbilen i 5. køposition vil overhale efter ca. 125 m mens personbilen i 6. position kræver ca. 325 m.



Figur 16. Tid/sted data med op til 6 personbiler i spor 2 og en sæt/pvt i spor 1.

Den tilsvarende figur med en last/bus i spor 1 ses i Figur 17. Af figuren ses, at en personbil i 3. køposition har overhalet en last/bus efter ca. 300 m, og først efter ca. 550 m vil en personbil i 4. køposition have overhalet.



Figur 17. Tid/sted data med op til 6 personbiler i spor 2 og en last/bus i spor 1.

Resultaterne fra Figur 16 og Figur 17 kan bruges til at vurdere længden af den 2-sporede frafart afhængig, af hvor nemt det skal være for personbiler at overhale eventuelle tunge køretøjer under opstart.

3.6 Observeret flow ved kileslut (snit D)

Kapaciteten af en strækning med sporbortfald (2->1 spor) er i andre undersøgelser fundet til ca. 1.750-1.850 pe/t. Disse værdier gælder i situationer med kø opstrøms sporbortfaldet.

For de undersøgte kryds er der ikke en vedvarende trafikbelastning ved sporbortfaldet, der muliggør en måling af kapaciteten på samme måde. Trafikintensiteten i frafartssporene er i høj grad styret af signalet, hvorfor der ses høj belastning i en periode svarende til ca. grøntiden, hvorefter intensiteten falder markant i rødtiden.

Trafikflowet i kortere intervaller kan dog analyseres for at vurdere, om der er forskel krydsene imellem. Tabel 9 viser f.eks. det målte flow i snit D (målt over perioder på minimum 20 sek.). Flowet er målt fra første til sidste køretøj i køen og omregnet til 20 sekunders perioder. I gennemsnit afvikles der 16,3 pe/20 sek., og der ses kun mindre forskelle krydsene imellem. Kryds 5 og kryds 6 har et lidt lavere flow, men ellers ses ingen sammenhæng mellem længden af frafartsspor og det observerede flow.

Afstand fra snit A til snit D (m)	Krydsnr	Gns. flow pr 20 sek. (pe)
158	3	16,7
201	5	14,1
201	6	15,3
231	4	16,7
288	1	17,0
322	7	16,5
373	2	16,5
Gns. alle		16,3

Tabel 9. Observeret flow (gns.) målt fra første til sidste ktj i køen.

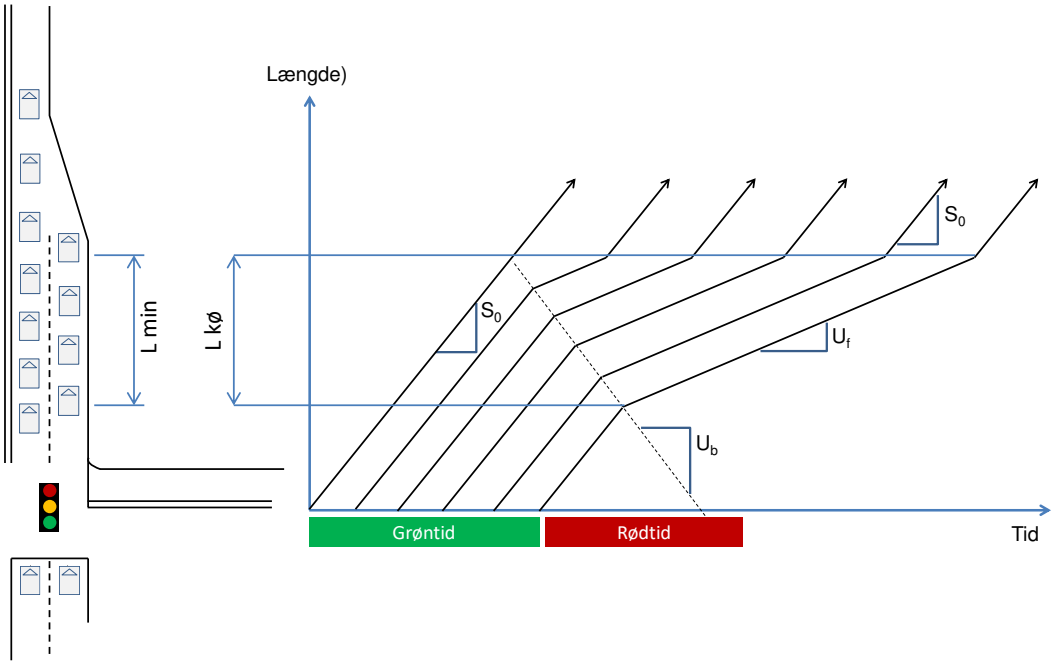
Opregnes flowet til timetrafik, idet der tages højde for at 20 sek. flow ikke er vedvarende trafikbelastning, fås et omtrentlig flow på 2.000 pe/t, hvilket svarer nogenlunde overens med, hvad der kan forventes.

3.7 Teoretisk beregning af 2 sporet frafartlængde

I bilag 2, er vedlagt et eksempel på en teoretisk metode til beregning af minimumslængder for 2-sporede frafarter. Metoden er udviklet og beskrevet i ” *Length requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections.”* Matthew J. A. Buckley, E.I.T and Jeffrey R. Riegner, P.E:, AICP, PTOE. Fra ITE 2006 Technical Conference and Exhibit Compendium of Technical Papers, San Antonio Texas, 2006.

Kort beskrevet bestemmes minimumslængden af den 2-sporede frafart ud fra en simplificeret tilgang, hvor der tager udgangspunkt i speed-flow-density sammenhænge, længde af grøntid og den grundlæggende kapacitet af en 1- eller 2-sporet strækning.

Ved beregning af minimumslængden af den 2-sporede frafart antages, at den 2-sporede strækning kun lige er lang nok til at ”rumme” de køretøjer, som afvikles for grønt. Det sidste køretøj, som passerer stoplinjen for grønt, vil således ankomme til bagenden af køen (som følge af sporbortfaldet) på den anden side af krydset, se Figur 18.



Figur 18. Tid/sted data til beregning af længde af 2-sporet frafart (eksempel fra Bilag 2).

45 sek. grøntid vil således kræve ca. 170 m 2-sporet frafart for at kunne ”rumme” de køretøjer, som bliver afviklet, uden at køen ”flyder over” med opstuvning tilbage i krydset til følge.

Benyttes metoden beskrevet i bilag 2, fås nogle minimumslængder afhængig af grøntidens længde som følger:

15 sek. grøntid: 57 m
30 sek. grøntid: 113 m
45 sek. grøntid: 170 m

De beregnede minimumslængder er forholdsvis korte (og kortere end de fleste kryds som er undersøgt), men beregningen forudsætter som tidligere nævnt også, at begge frafartsspor er fyldt op, når grøntiden slutter.

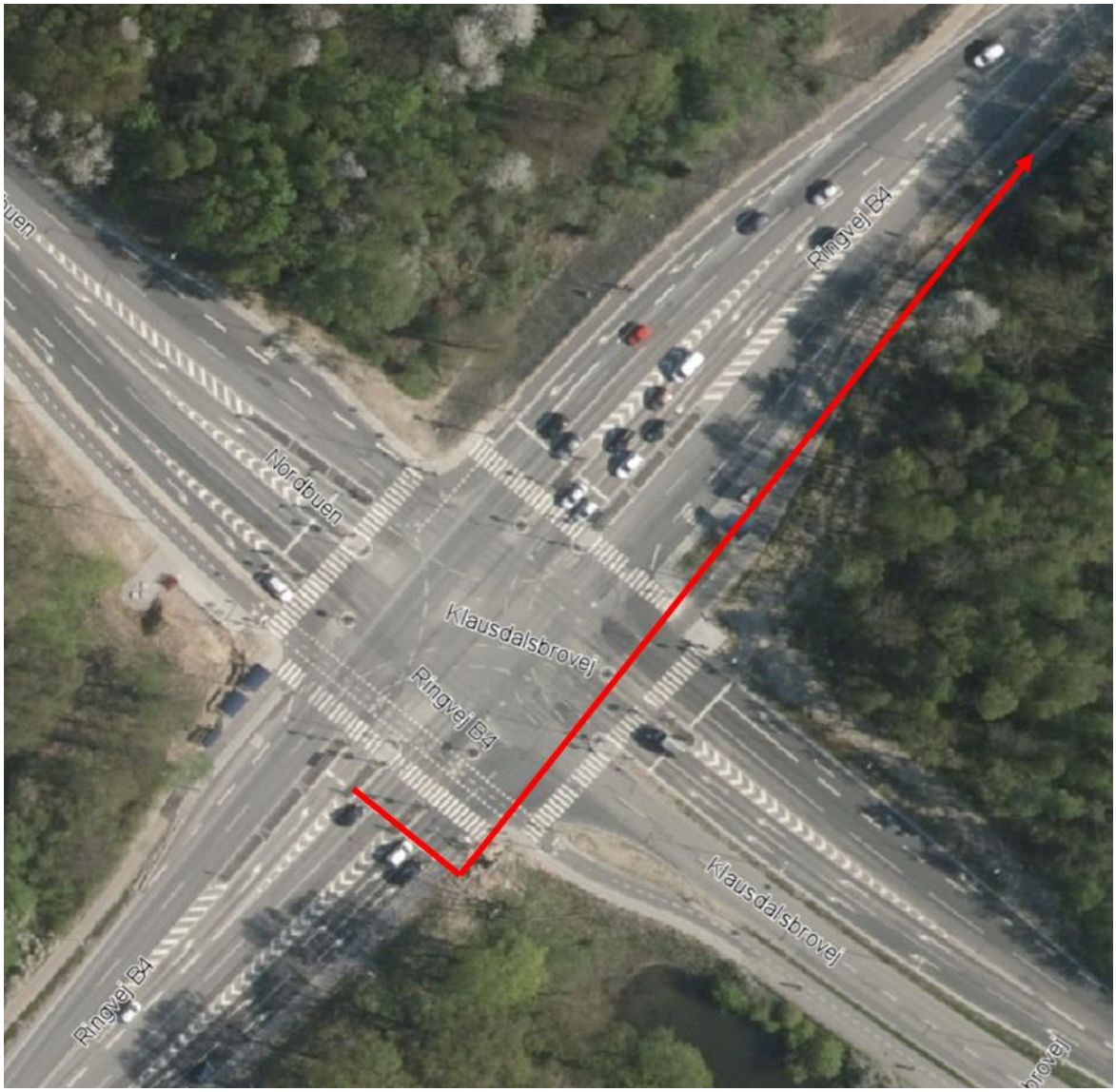
Bilag 1 De syv analysestrækninger

Nedenfor følger et luftfoto af hver af de syv strækninger der indgår i undersøgelsen. Den røde streg indikere stopstreg og længden af den 2 sporede strækning (til kilestart).

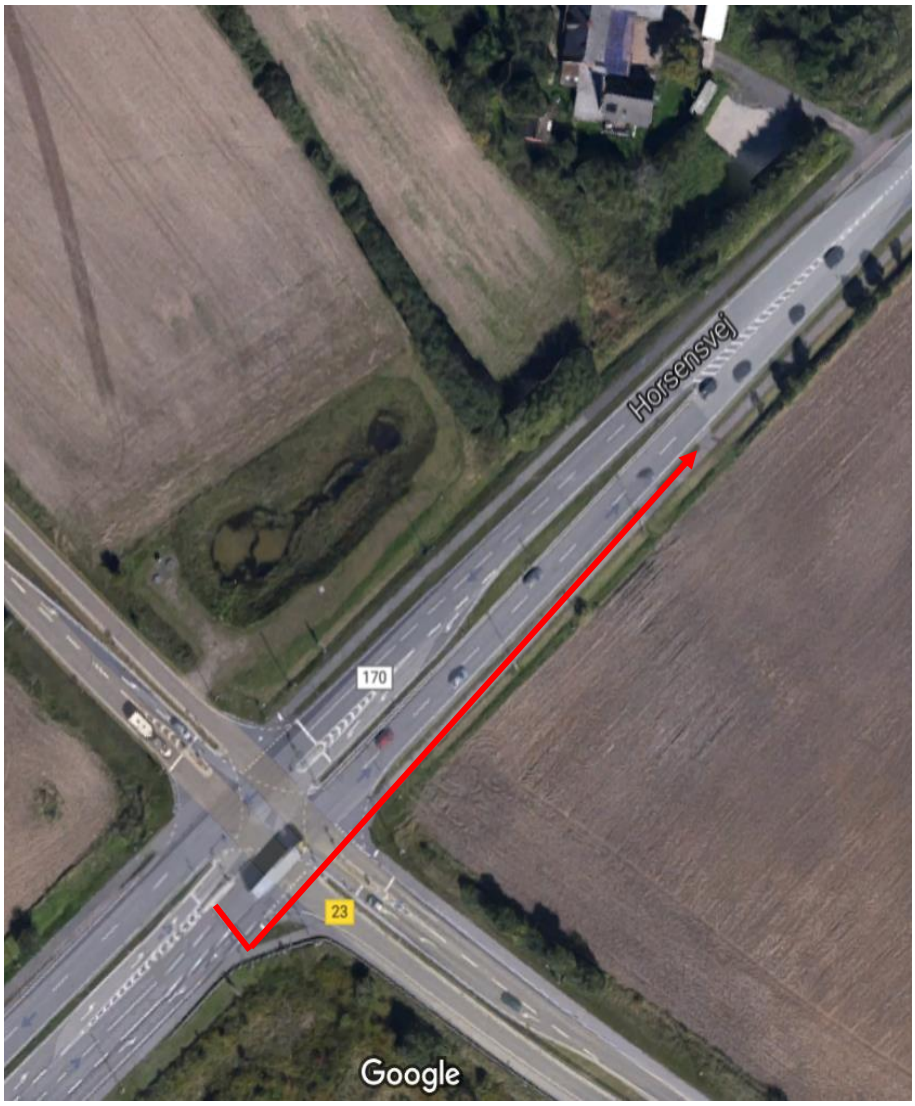
K1. Slangerupvej/Nymøllevej i Allerød

K2. Ring 4/Hillerød MV i Gladsaxe

K3. Ring 4/Klausdalsbrovej/Nordbuen i Ballerup



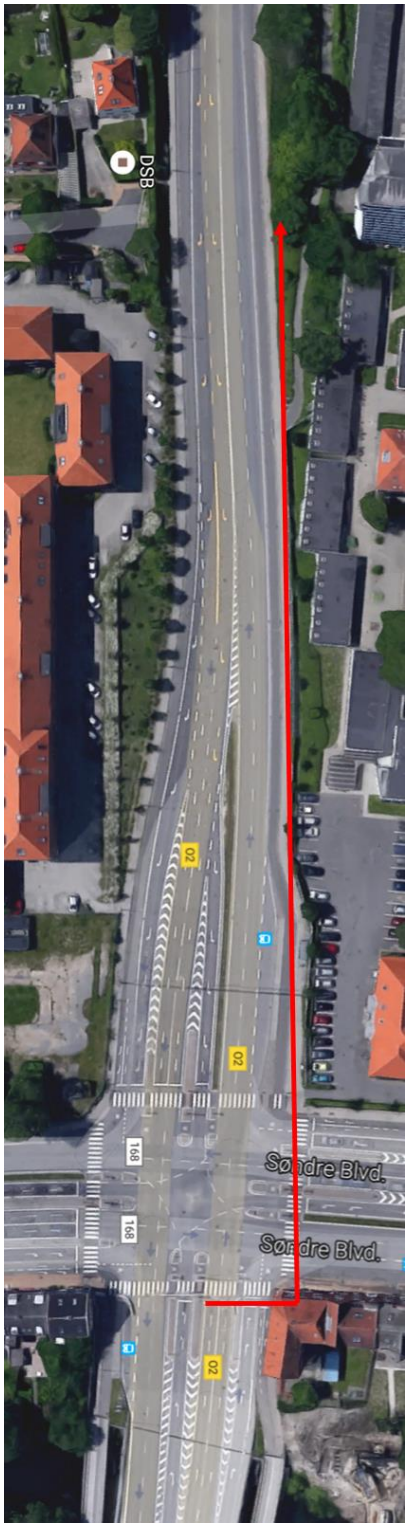
K4. Juelsmindesvej/Horsensvej ved Vejle.



K5. Ishøj Strandvej/Ishøj Stationsvej i Ishøj

K6. Ringvejen/Nørrebrogade/Hjermvej i Holstebro

K7. Tietgensgade/Sønder Boulevard i Odense



Bilag 2 Teoretisk beregning af længde af frafartsspor

Eksempel på beregning af længde af frafartsspor i signalregulerede kryds - Teoretisk procedure.

Reference og inspirationskilde:
Length requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections.
Matthew J. A. Buckley, E.I.T and Jeffrey R. Riegner, P.E:, AICP, PTOE
Fra ITE 2006 Technical Conference and Exhibit Compendium of Technical Papers, San Antonio Texas, 2006

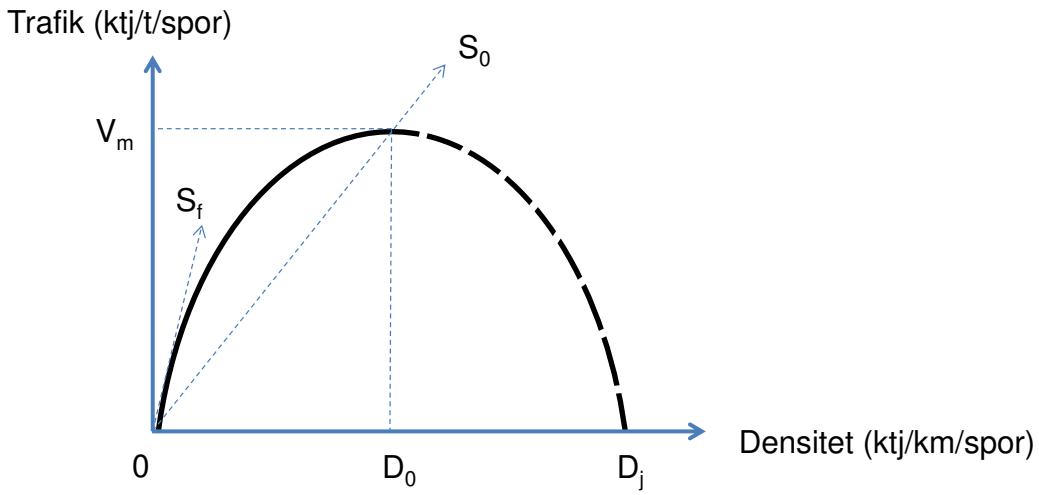
Den grundlæggende sammenhæng mellem trafikparametrene:

V - trafikmængde (kjt/t/spor)
S - hastighed (km/t)
D - densitet (ktj/km/spor)

beskrives ofte ved den fundamentale trafik-flow formel:

V = S x D.

Nedenstående figur viser trafikmængden som funktion af densiteten (flow-density diagram).



Figur 1B. Sammenhæng mellem trafik (V) og densitet (D)

V_m er den maksimale trafikmængde (kapacitetsgrænsen). D_0 er densitet ved kapacitetsgrænsen, og Dj er densitet, når hastighed og trafikflow er 0, også kaldet jam-density.

Hældning af en linje igennem origo og til et hvilket som helt punkt på kurven er hastigheden (S=V/D) ved den givne trafiksituation. S_f er hastigheden ved lav trafik (FFS – freeflow speed), og S_0 er hastigheden ved maks flow.

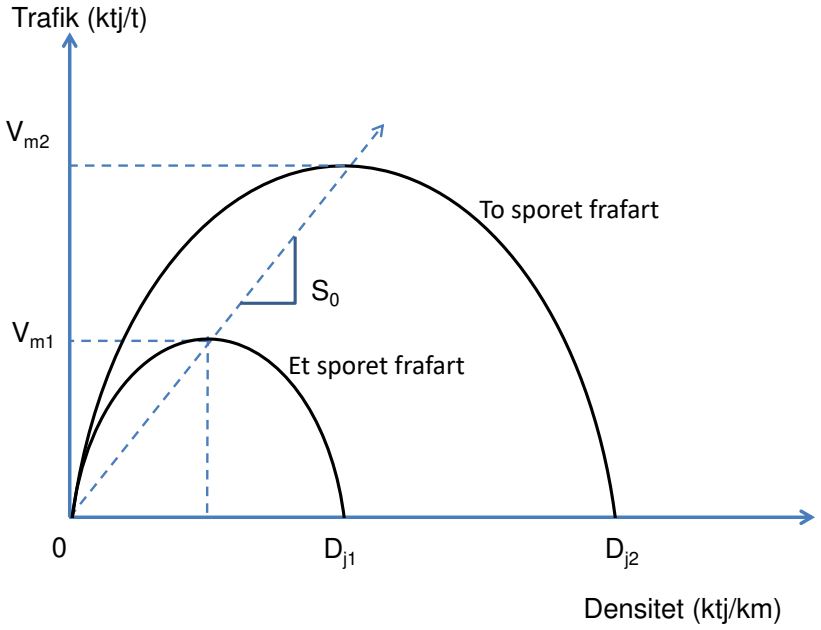
Længden af frafartsspor i signalregulerede kryds kan ud fra disse simple (forsimplede) sammenhænge beskrives på følgende måde:

Figur 2B viser et flow-density sammenhæng for en 1 og 2-sporet strækning.

Bemærk at D (densitet) er opgjort som ktj/km og V (trafik) som ktj/t. Derved bliver kurven for den 2-sporede strækning dobbelt så stor som den 1-sporede strækning.

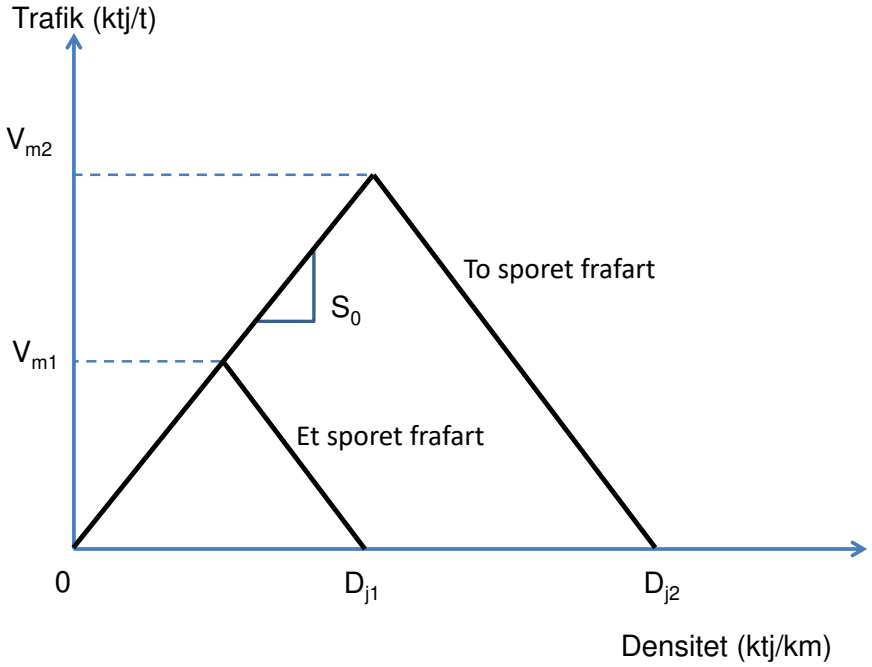
Figur 2B antager dermed, at kapacitet og jam-density er proportionalt med antal spor. For et signalanlæg med en 2 sporet frafart med sporbortfald kan den ”store” kurve repræsentere den 2 sporede frafart, imens den ”lille” kurve repræsenterer den 1-sporede strækning efter sporbortfald.

V_{m1} er kapaciteten af den 1-sporede strækning og V_{m2} af den 2-sporede strækning. Det samme gælder for D_{j1} og D_{j2}. Hastigheden S_0 er den optimale hastighed ved kapacitetsgrænsen.



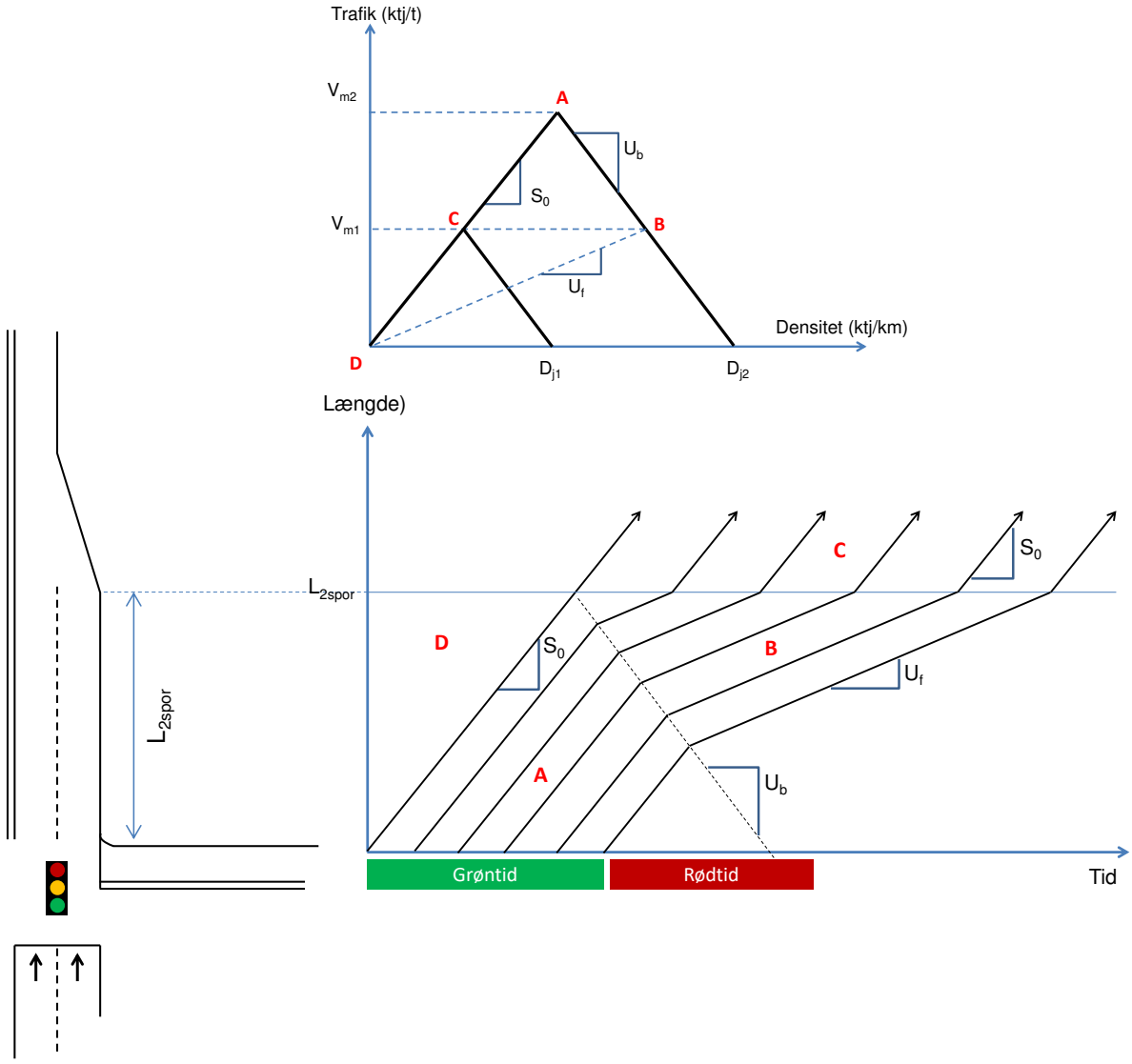
Figur 2B. Generel flow-density sammenhæng for 1- og 2-sporet frafart.

Den nøjagtige flow-density sammenhæng vil afhænge af den konkrete lokalitet og trafiksammensætningen på stedet, og kan derfor vanskeligt beskrives generelt. En forsimplet form, beskrevet ved lineære elementer, kan benyttes ved vurderinger af generelle trafikafviklingssituationer. Figur 3B viser en simplificeret flow-density sammenhæng baseret på lineære relationer.



Figur 3B. Forsimplet stykvis liniær flow-density relation.

For at illustrere fletteadfærd/trafikafvikling ved sporbortfald efter et signalreguleret kryds kan man lave et tid/sted diagram som vist på figur 4B. Figuren er grundlæggende baseret på figur 3B med antaget flow-densitet sammenhæng (også vist øverst i figuren). Nederst i figuren er vist køretøjernes placering i tid og sted efter opstart i krydset. Tid/sted diagrammet giver en visuel præsentation af, hvordan sporbortfaldet giver en flaskehals og dermed kø bagud i systemet. Hastigheden, hvormed køen opbygges, beskrives ved den stiplede linje (hældning Ub).



Figur 4B. Simplificeret tid/sted diagram for sporbortfald ved signalregulerede kryds.

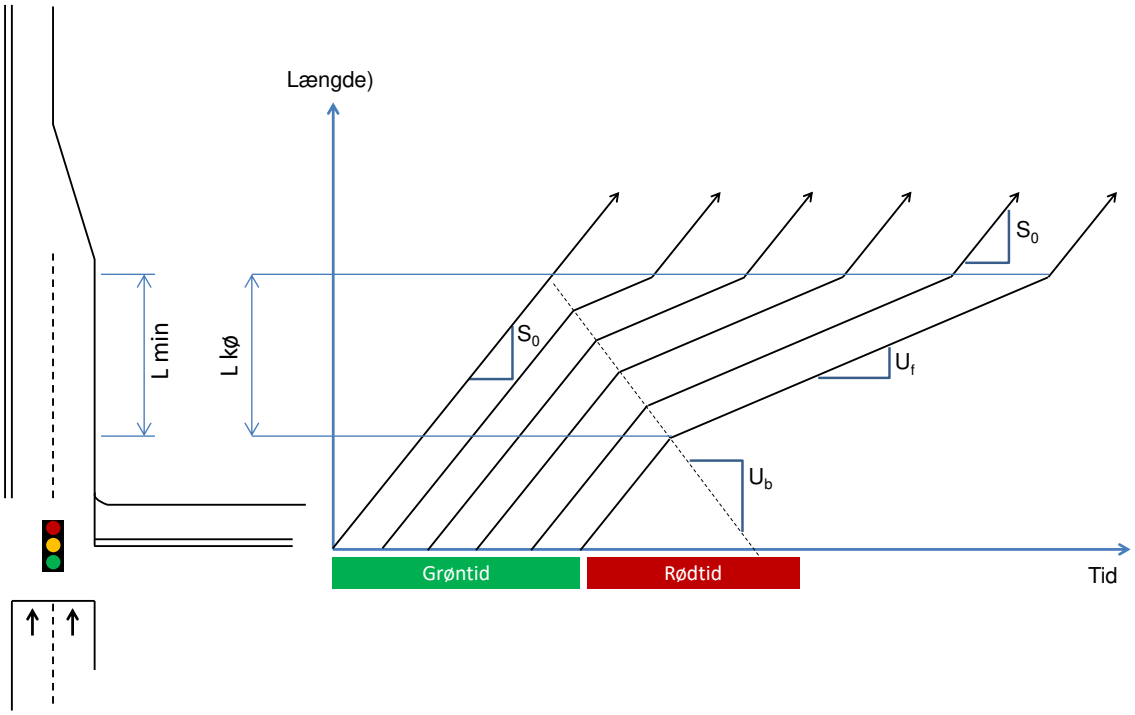
De røde bogstaver A, B, C og D indikerer forskellige trafiktilstande.

- A: Maks trafikflow ved 2 spor
- B: Maks trafikflow ved 1 spor, afviklet på strækninger med 2 spor (2spors densitet)
- C: Maks trafikflow ved 1 spor, afviklet på strækninger med 1 spor (1spors densitet)
- D: Frit flow

I begyndelsen af grøntiden, hvor trafikken øges, går tilstanden fra D til A. Køopbygningen ved flaskehalsen giver øget densitet og mindsket flow. Dette bevirker,

at trafiktilstanden går fra A til B (kø på den 2-sporede strækning), og køen opbygges med en hastighed på U_b. Ved kilestrækningen vil output flow fra den 2-sporede strækning være lig input flow for den 1-sporede strækning. Derved ændres trafiktilstand B til C ved flettesnittet, hvilket giver lavere densitet og højere hastighed på den 1-sporede strækning. Ved slutningen af grøntiden vil inputflow gå mod nul, og køen forbundet med skiftet fra A til D, B til D og C til D, vil flytte sig nedstrøms med en hastighed på Uf.

Den nødvendige længde af den 2-sporede strækning er direkte forbundet med længden af den opbyggede kø ved sporbortfaldet. Er længden af de 2 spor for kort, vil kø opbygges bagud og ud i krydset. Minimumlængden for strækningen med 2 spor (L_{min}) er lig maksimum længden af køen som følge af flaskehalsen ($L_{kø}$) – se figur.



Figur 5B. Minimumslængde af 2-sporet frafart illustreret ud fra tid-sted diagram.

L_{min} kan bestemmes ud fra formlen:

$$L_{\min} = \frac{G\max}{\left(\frac{1}{S_0} + \frac{1}{U_b}\right)}$$

Hvor G_{max} er den maksimale grøntid for den ligeudkørende strøm, og S_0 er hastighed ved maks trafikflow, og U_b er hastigheden af den opbyggende kø.

U_b kan bestemmes ud fra:

$$U_b = \frac{Vm2}{\left(D_{j2} - \frac{V_{m2}}{S_0}\right)}$$

Hvor Vm_2 er kapaciteten af den 2 sporede strækning, D_{j2} er jam-density for den 2-sporede strækning, og S_0 er hastighed ved kapacitetsgrænsen.

Benyttes følgende værdier:

V_{m2} = 2 x 1700 ktj/t = 3400 ktj/t
D_{j2} = 250 ktj/km
S_0 = 70 km/t
G_{max} = 45 sek. (0,0125 time)

Da bliver:
U_b = 3400 / (250 - 3400/70) = 16,9 km/t
L_{min} = 0,0125 / (1/70 + 1/16,9) = 170 m

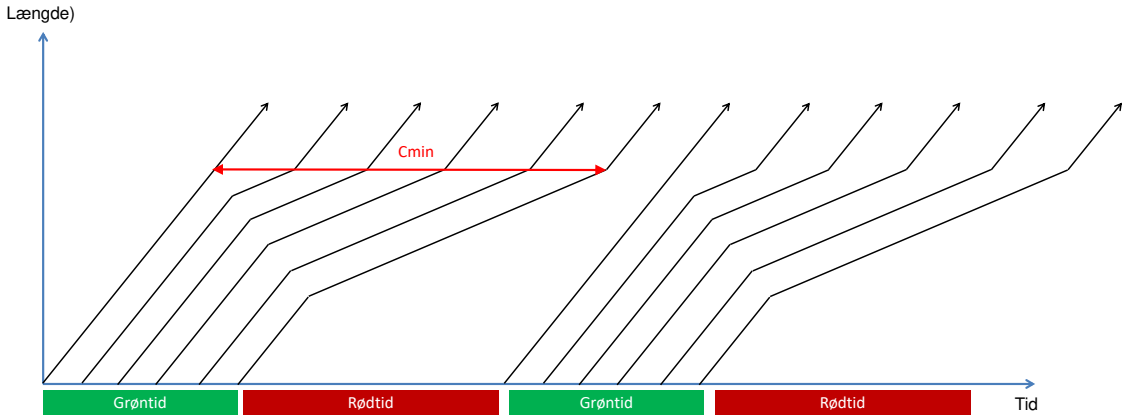
Eller omskrevet på forsimplet form:

L_{min} = 3,78 x G_{max}

Hvor G_{max} er grøntid i sek., og L_{min} er minimumslængden i m.

Udover at beregne den nødvendige længde af den 2-sporede strækning, er minimumsomløbstiden i signalet nødvendig at kende, således at kølængden som følge af flaskehalsen ikke ”flyder over” og påvirker det næste omløb i signalet.

Figur 6B viser hvordan den minimale omløbstid (C_{min}) kan vurderes grafisk i tid-sted diagrammet. C_{min} skal være lang nok til, at den trafik som er kørt ind på den 2-sporede strækning, kan afvikles før trafikken fra den næste grøntidsperiode ankommer.



Figur 6B. Visuel præsentation af minimumsomløbstid (C_{min})

C_{min} kan beregnes på følgende måde:

$$C_{\min} = G_{\max} + L_{\min} \times \left(\frac{1}{U_f} - \frac{1}{S_0} \right)$$

Hvor G_{max} er den maksimale grøntidslængde, L_{min} er den nødvendige længde af den 2-sporet frafart, S_0 er hastighed ved maks flow (ved kapacitetsgrænsen), U_f er hastigheden af køafviklingen (se figur 4B).

Hastigheden af Uf kan bestemmes således:

$$U_f = \frac{V_{m1}}{D_{j2} - \frac{V_{m1}}{U_b}}$$

Fra eksemplet før:
Sættes V_{m1} = 1700 ktj/t, D_{j2} = 250 ktj/km/spor, U_b = 16,9 km/t, G_{max} = 45 sek. (0,0125 t), S_0 = 70 km/t, bliver:

U_f = 1700 / (250 – 1700/16,9) = 11,4 km/t
C_{min} = 0,0125 + 0,170 x (1/11,4 - 1/70) = 0,019 time = 90 sek.

I regneeksemplet er den minimale omløbstid altså det dobbelte af grøntiden – hvilket oe af den 1-sporede strækning, og det samme er jam-density.

Diskussion af metode:

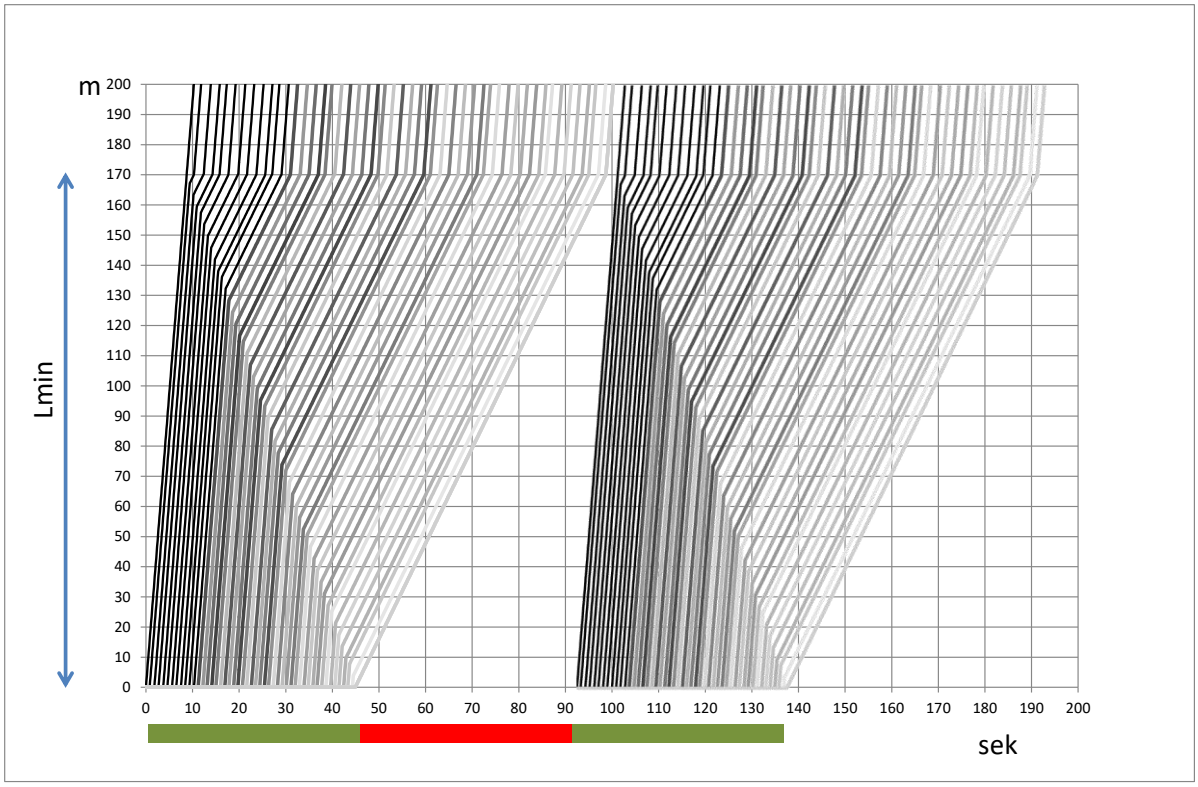
- Man kan diskutere, om den reelle flaskehals er den 1-sporede strækning eller, om det er flettestrækningen (kilestrækningen) frem mod den 1-sporede strækning. I regneeksemplet kan V_{m1} evt. reduceres, så den svarer til kapaciteten af flettestrækningen.

- Metoden er simpel og antager, at alle køretøjer har samme acceleration og samme passagetid ved stopstregen, og at der ikke foretages vognbaneskift på den 2-sporede strækningen. Dette er ikke gældende i en virkelig trafiksituation, specielt ikke på steder hvor der også optræder tung trafik.

- Bemærk at L_{min} afhænger ikke af V_{m1} – dvs., at minimumslængden af de 2-sporede frafarter ikke afhænger af kapaciteten nedstrøms. L_{min} bestemmes alene af hastigheden, hvormed køopbygningen ved flaskehalsen udvikler sig (dvs. af D_{j2}, V_{m2} og S_0)

- I regneeksemplerne antages uendelig meget trafik i tilfarten, hvor der kører trafik ind i krydset i hele grøntiden, hvilket nok er urealistisk.

- Metoden ser alene på kapacitet. Hvad med fremkommelighed/serviceniveau og mulighed for overhaling i situationer, hvor trafikken på den 1-sporede tilfart ikke er på max. Hvor lang skal den 2-sporede strækning være her?



Eksempel på trafikafvikling med 45 sek. grøntid. I alt 48 køretøjer afvikles i de to spor i grøntiden. Længden af de to frafartsspor er 170 m, og køen som følge af sporbortfald giver kø helt tilbage til krydset. Det første køretøj i den efterfølgende

grøntid accelererer frit, og rammer den 1-sporede strækning samme tid og sted som det sidst afviklede køretøj i forrige grøntid.

Reference og inspirationskilde:
Length requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections.
Matthew J. A. Buckley, E.I.T and Jeffrey R. Riegner, P.E:, AICP, PTOE
Fra ITE 2006 Technical Conference and Exhibit Compendium of Technical Papers, San Antonio Texas, 2006