

2-SPORET FRAFARTER I SIGNALREGULEREDE KRYDS



AFGANGSSPECIALE UDARBEJDET AF:

Andreas Wichmann Storm



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

9. juni 2022



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Ingeniør- og naturvidenskabelige fakultet

Institut for Byggeri, By og Miljø

Thomas Manns Vej 23

9220 Aalborg Øst

<https://www.build.aau.dk/>

Titel:

2-sporet frafarter i signalregulerede kryds

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

Februar 2022 - Juni 2022

Forfatter:

Andreas Wichmann Storm

Vejleder:

Harry Lahrman

Sidetæl: 58

Bilag: 20

Afsluttet: 9. juni 2022

Synopsis:

Kandidatspecialet undersøger sammenhængen mellem minimumslængden af to-sporet frafarter i signalreguleret kryds og trafikken i tilfarten. Rapporten indledes med de gældende anbefalinger der er på området i forskellige lande. Der er den grad forskel på de anbefalinger der er givet ved hvert land, hvor nogle lande ikke vil give et konkret bud på en længde og andre lande med anbefalede længder der er betydeligt kortere at de danske anbefalinger. Der er flere undersøgelser i litteraturstudiet der påpeger at der er en sammenhæng mellem anvendelsesgraden af sporet der bortfalder efter krydset og længden af frafarten.

Undersøgelsen foretages på baggrund af empirisk data, der er indsamlet ved hjælp af videooptagelser. I projektet indgår 1868 køretøjer fordelt 132 kø-situationer.

Undersøgelsen viser at der ikke er sket en ændring i følgetiden for ligekørende. Derudover er der intet i resultaterne der indikere at der skulle være en sammenhæng mellem anvendelsesgraden af vognbanen der forsætter efter krydset og længden af frafarten. Ud fra en regressionsanalyse er der opstillet en model der beskriver sammenhængen mellem minimumslængden og antallet af personbilenheder i kø. Modellen estimerer generelt længder der er kortere end dem Vejdirektoratet anbefaler,

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af Andreas Wichmann Storm på kandidatuddannelsen Veje og Trafik ved Aalborg Universitet. Afgangsspecialet er udarbejdet i perioden 1. februar til den 9. juni 2022, hvor sammenhængen mellem trafikintensitet og længden af 2-sporet frafarter i signalreglerede kryds, med efterfølgende sporbortfald, undersøges.

Kandidatspecialet er primært bygget op omkring et litteraturstudie, indsamling af empirisk data samt en bearbejdning af det indsamlede data. Hertil har Vejdirektoratet været behjælpelige med droneoptagelser af flere signalregulerede kryds, som er anvendt under dataindsamlingen. På baggrund af dette skal der rettes en stor tak til følgende personer, som hver især har taget sig tid til at bidrage til projektet:

- Poul Greibe, Vejdirektoratet
- Steen Lauritzen, Vejdirektoratet
- Christian Potter, Vejdirektoratet
- Kenny Dolleris, Trafikverket
- Richard Webster, Nations Highways
- Ulla Buje, Aalborg Universitetsbiblioteket

Aalborg, 9. juni 2022
Andreas Wichmann Storm

Læsevejledning

Rapporten er inddelt i tre hoveddele. Den første del (kap.1-3) beskriver baggrunden for projektet, problemstillingen, de metoder der anvendes til at besvare problemformuleringen samt nuværende anbefalinger på området. Anden del (kap.4-5) præsenterer resultaterne fra de anvendte metoder fordelt på et litteraturstudie og databehandling. I den sidste del (kap.6-7) diskuteres blandt andet det indsamlede data, styrker og svagheder ved den opstillede model, for til sidst at foretage en sammenligning af modellen med resultaterne fra litteraturstudiet samt de nuværende anbefalinger på området.

Det forventes, at læseren i forvejen har et vist kendskab til Veje og Trafik, samt en grundlæggende forståelse for fagtermer, metoder og modeller.

Undervejs i rapporten refereres der til figurer og tabeller ved kapitelnummer, sammen med et fortløbende indeks. Figurer uden kildehenvisning er udarbejdet af undertegnede.

Harvard-metoden anvendes som kildereferencesystem i projektet. Dette fremgår som [Efternavn, årstal]. Er referencen placeret før punktum, refereres der til den enkelte sætning. Er kilden placeret efter punktum, refereres der til hele afsnittet. I tilfælde hvor der ikke haves årstal for en kilde anvendes senest opdaterede år eller [Forfatter, N/A], hvis der intet år for kilden haves. Bagerst i rapporten er en liste over den anvendte litteratur, sorteret i alfabetisk rækkefølge, efter forfatterens efternavn.

I kandidatspecialet anvendes en række værktøjer. GIS-værktøjet QGIS anvendes til illustration af kort, AutoCAD anvendes til skitsering af tegninger. Mastra anvendes til trafiktal, Excel til databehandling og til videobehandlingen er der anvendt programmet RUBA.

Bagerst i rapport er en række bilag som supplere projektets anvendte metoder og resultater heraf. Dette omfatter blandt andet metodeopstilling, regressionsanalyse og mailkorrespondance.

Abstract

Traffic on the Danish roads has primarily been increasing since 2019, except for the COVID-19 pandemic, where traffic has been declining. Traffic data from the first quarter of 2022 indicate that the traffic on the Danish roads is again increasing. The increasing demand from traffic creates congestion on Danish roads. Congestion on the roads is a general challenge and a study prepared for the Danish Road Directorate estimates that road users spend an average of 360,000 hours a day queuing. Congestion most often occurs because of bottlenecks in the infrastructure, such as at the intersections in the city. The impact of bottlenecks in relation to congestion and traffic flow, has increased significantly over the last 20 years. Road congestion and limited resources to expand infrastructure require less costly action. The capacity of the intersection can be increased by adding extra lanes in the direction needed it for.

The master's thesis examines the relationship between the minimum length of two-lane exits in signalized intersections and the traffic in the approach. The report begins with the current recommendations in the field in different countries. There is a degree of difference in the recommendations given by each country, where some countries will not give a concrete bid for a length and other countries with recommended lengths that are significantly shorter than the Danish recommendations. There are several studies in the literature study that point out, that there is a connection between the degree of use of the track that lapses after the intersection and the length of the exit lane.

The study is conducted based on empirical data collected using video recordings. The project includes 1868 vehicles in 132 queue situations. The study shows that there has been no change in the following time for straight drivers. In addition, there is nothing in the results indicating that there should be a correlation between the degree of application of the lane that continues after the intersection and the length of the exit. Based on a regression analysis, a model has been set up there describes the relationship between the minimum length and the number of passenger car units in line. The model generally estimates lengths that are shorter than those recommended by the Danish Road Directorate.

Indholdsfortegnelse

Forord	i
Læsevejledning	i
Abstract	i
1 Projektformulering	1
1.1 Projektbaggrund	1
1.2 Problemformulering	4
1.3 Problemafgrensning	5
2 Metode	7
2.1 Anbefalinger	7
2.2 Litteraturstudie	8
2.3 Udpegning af kryds	10
2.4 Dataindsamling	13
2.5 Databehandling	15
2.6 Statistiske test	18
3 Anbefalinger	19
3.1 Danmark	19
3.2 Norge	20
3.3 Sverige	20
3.4 England	22
3.5 USA	23
3.6 Australien	23
3.7 Opsamling på danske og udenlandske anbefalinger	24
4 Litteraturstudie	25
4.1 Signalregulerede kryds med udvidede tilgange	25
4.2 Anvendelsesgraden af vognbanen der bortfalder efter krydset	26

4.3	Estimeret minimumslængde af frafartsstrækninger	28
4.4	2-sporede frafarter i Danmark	33
5	Resultater	39
5.1	Empirisk data	39
5.2	Følgetider	40
5.3	Sammenhæng mellem sporbenyttelsen og trafikken	42
5.4	Tidsafstande mellem køretøjer	44
5.5	Hastigheds-flow i kilestrækningen	45
5.6	Trafik-flow	46
5.7	Opbygning af model	48
6	Diskussion	51
6.1	Datagrundlag	51
6.2	Modellens styrker og svagheder	52
6.3	Sammenligning med andre modeller	53
7	Konklusion	54
A	Oversigt over kryds med sporreduktion i frafarten	59
B	Regressionsmodel	65
C	Kameraopsætnig	71
D	Mailkorrespondance	75

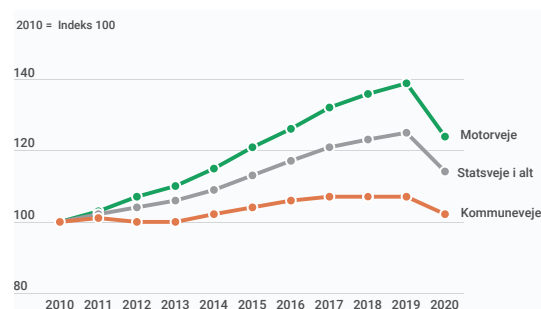
1 | Projektformulering

1.1 Projektbaggrund

Danmark er et land med mange forskellige transportmuligheder og har en infrastruktur i verdensklasse. Hvis infrastrukturen ikke løbende opgraderes så den matcher udviklingen i transportarbejdet, vil der i fremtiden være alt for mange bilister der holder i kø. Investeringer i transport og infrastruktur skal styrke samfundet og gøre det rigere på længere sigt. [Transportministeriet, 2021] Trafikarbejdet på de danske veje har været stigende siden 2010. Antallet af kørte kilometer i perioden 2010-2020 for henholdsvis motorveje, statsveje og kommuneveje er illustreret på figur 1.1

I 2019 var trafikken steget med en procent på landsplan, hvor trafikken alene på statsvejnettet steg med 1,8 procent. Den stigende efterspørgsel på vejtransporten frem til 2019, hænger tæt sammen den positive udvikling der var i den danske økonomi på det tidspunkt. Behovet for transport af både mennesker og gods stiger når ledighedsprocenten er lav, privatforbruget og investeringer stiger samt handlen med udlandet vokser. [Vejdirektoratet, 2022]

Overordnet set blev der i det første kvartal af 2022 tilbagelagt 1,4 procent færre kilometer, sammenlignet med første kvartal af 2019 (Før COVID-19). Det samlede fald i andelen af tilbagelagte kilometer i første kvartal af 2022 skyldes primært faldet i januar og februar måned, hvor der i marts måned var en stigning på 0,8 procent, sammenlignet med marts måned i 2019. Det var første gang siden november måned i 2019 at der er registreret en stigning i vejtrafikken. [Brinch-Pedersen, 2022a]

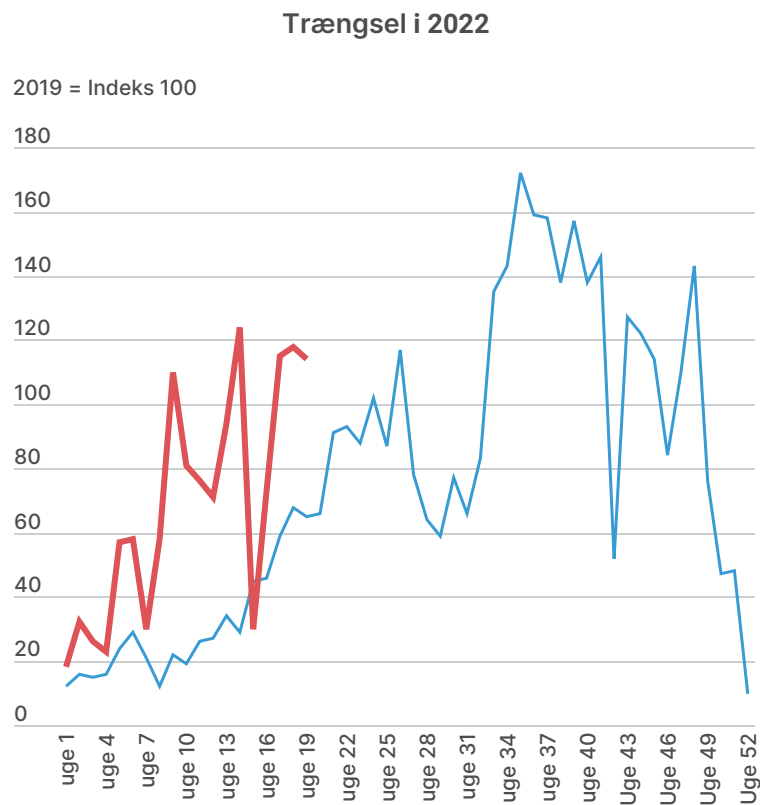


Figur 1.1: Indekseret antal kørte kilometer i perioden 2010-2020. [Brinch-Pedersen, 2022b]

1.1.1 Trængsel

Den stigende efterspørgsel på trafikken skaber trængsel på de danske veje. Trængslen i vejtrafikken er et udtryk for en reducere i trafikanternes rejsehastighed og fremkommelighed, set i forhold til normalsituationen. Det er selve trafikmængden der er den mest betydende faktor for trængslen, hvor faktorer såsom ulykker, vejarbejde og vejret også kan have en indflydelse. [Brinch-Pedersen, 2022b]

På figur 1.2 er trængselindekset for 2021 og de første 20 uger af 2022 illustreret.



Figur 1.2: Ugentlige trængselindeks for 2022 samt alle uger i 2021. Den røde graf er trængselindekset fra 2022 og den blå er fra 2021. [Brinch-Pedersen, 2022b]

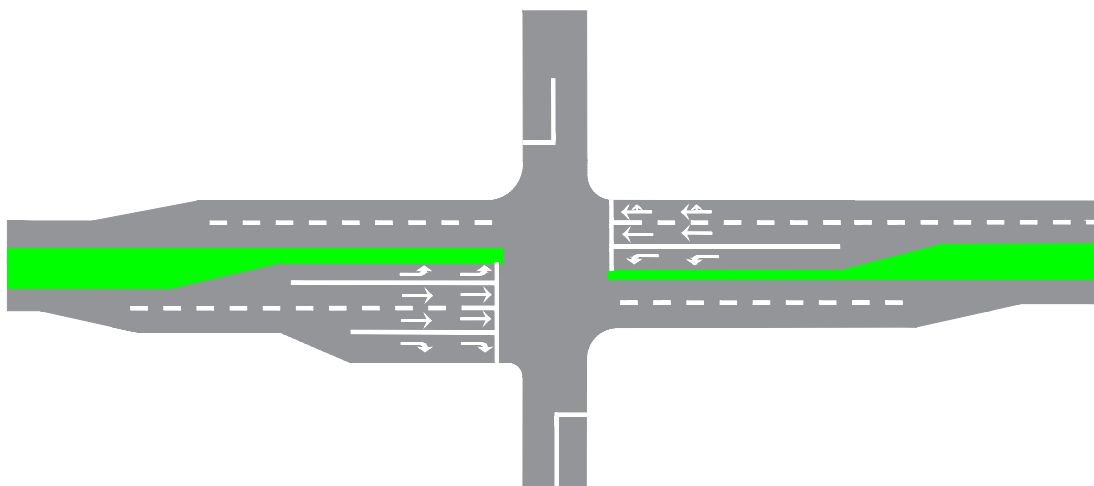
Trængslen på figur 1.2 er indekseret således at en typisk uge 2019 (uden ferie- og helligdage) er sat som indeks 100. [Brinch-Pedersen, 2022b] På figur 1.2 kan der observeres et større udsving i grafen for 2022 ved uge 7 og 16, hvilket skyldes henholdsvis vinterferien og påskeferien. Det kan ligeledes observeres at trængselindekset i 2022 er markant højere end trængselindekset i 2021, for de første 20 uger af året. Dette er der en naturlig forklaring på, da Danmark mere eller mindre var lukket ned i foråret 2021. Trængselindekset i 2022 er ved at nærme sig et niveau der svare til indeks 100, hvilket kan være en indikation på at trafikken er ved at være på samme niveau som før COVID-19.

Trængslen på de danske veje er en betydelig udfordring, som i hverdagen både er til gene for trafikanterne og for transporten i erhvervslivet. En opgørelse Vejdirektoratet har fået foretaget, viser at trafikanterne i gennemsnit bruger 360.000 timer om dagen på at holde i kø. Vejdirektoratet arbejder med forskellige måder hvorpå trængslen kan reduceres, blandt andet ved at udbygge vejnettet og lave forsøg med kørsel i nødspor.

Trængsel opstår oftest som følge af flaskehalse på vejenettet, som for eksempel tilkørselsramper ved motorveje eller kryds i byen. Påvirkningen fra flaskehalse, i forhold til trængsel og trafikafvikling, er steget betydeligt de sidste 20 år, hvilket målinger af rejsetider også viser. [Hansen et al., 2014]

1.1.2 Signalregulerede kryds med udvide tilgange

Trængslen på vejene og få midler til udbygning af vejnettet, kræver tiltag der er mindre omkostningsfulde. En af løsningerne til at afhjælpe trængslen på vejnettet, er ved at øge kapaciteten i signalregulerede kryds, således at flere trafikanter kan afvikles under hvert omløb. Dette kan gøres på flere forskellige måder, blandt andet ved en justering af signalplanen, samordne kryds eller ved at udbygge krydset. I tilfælde hvor en udbygning af infrastrukturen ikke kan undgås, kan en forholdsvis billig og mindre pladskrævende løsning være at udbygge krydset, således at der tilføjes en ekstra vognbane i den retning hvor kapaciteten ønskes øget. Dette kan udføres på flere måder, men i de fleste tilfælde vil den ekstra vognbane starte ved krydsets tilfart og afsluttes i frafarten. Der er tilfælde hvor signalregulerede kryds anvendes som en overgang mellem to -og fire-sporet veje og her vil udvidelsen i den ene retning komme i tilfarten og i den anden retning afsluttes udvidelsen i frafarten. Sådanne kryds benævnes "Kryds med udvide tilgange". [Tarawneh, 2000] En principskitse af et kryds med udvide tilgange er illustreret på figur 1.3.



Figur 1.3: Principskitse af signalregulerede kryds med udvide tilgange.

Figur 1.3 viser en principskitse af et kryds med udvidede tilgange. Venstre side af figuren viser et eksempel på en vognbane der tilføjes i krydsets tilfart og afsluttes i frafarten, med den separat højresvingbane. Højre side af figuren viser et tilfælde hvor strækningen før krydset allerede har to vognbaner og hvor den ekstra vognbane bortfalder efter krydset. Der er på højre side af tegningen kombineret højresving- og ligeudbane. Selve udformningen og dimensionerne på krydset kan variere alt efter den givne situation.

I hvor høj grad disse ekstra vognbaner øger kapaciteten for den gennemkørende trafik, afhænger af anvendelsesgraden. En ligelig fordeling af trafikken mellem vognbanerne vil medføre maksimal udnyttelse af begge vognbaner og dermed en maksimal udnyttelse af kapaciteten i krydset.[Tarawneh, 2000]

1.2 Problemformulering

Kryds med udvide tilgange er et flittigt anvendt virkemiddel til at øge kapaciteten i vejnettet. I kryds med udvide tilgange fletter de to gennemgående spor sammen til ét spor efter krydset. Er denne strækning for kort vil der kunne forekomme en tilbagestuvning til det signalregulerede kryds, hvilket må anses som værende uhensigtsmæssigt.

I dag bestemmes den anbefalede minimumslængde af 2-sporet frafarter ud fra et tabelopslag, med udgangspunkt i tilfartens grøntid. I den danske vejreglhåndbog 'Kapacitet og serviceniveau' [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019] er følgende anbefalede minimumslængder angivet, hvilket fremgår af tabel 1.1

Tabel 1.1: Anbefaldede minumslængder af frafartssporet, baseret med udgangspunkt i grøntiden. [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]

Tilfartens grøntid	Længde af 2-sporet frafart
20 sekunder	100 meter
30 sekunder	140 meter
40 sekunder	180 meter
50 sekunder	220 meter
60 sekunder	260 meter

Der findes imidlertid ingen beregningsmodeller for bestemmelse af længden for 2-sporet frafarter, inden sammenfletningen til ét spor. På baggrund af dette er der udarbejdet følgende problemformulering:

Hvilken effekt har trafikintensiteten på længden af frafarten?

Det må antages at den nødvendige strækningslængde afhænger af grøntidens varighed, men også af trafikintensiteten for den gennemgående trafik. I projektet foretages der målinger af trafikafviklingen på en række 2-sporet flettestrækninger efter signalregulerede kryds, for at få et indblik i trafikintensitetens påvirkning af trafikafviklingen efter krydset. I forbindelse med projektet undersøges det om følgetiden for den gennemgående trafik i udvalgte kryds, stemmer overens med den følgetid der er angivet Vejreglerne. Dette har indflydelse på andelen af trafik der kan afvikles under hvert omløb og er derfor en betydende faktor for trafikafviklingen efter krydset.

Til besvarelse af problemformuleringen er der opstillet følgende supplerende problemstillinger:

- Hvordan fordeler trafikken sig mellem vognbanerne?
- Hvordan påvirker andelen af tungtrafik brugen af det ekstra spor?
- Hvilken påvirkning har længden af frafarten på valget af vognbane?
- Hvordan forholder andre lande sig til udformningen af kryds med udvidede tilgange?

Det overordnede formål med studiet er at udvikle en model til dimensionering af længden af 2-sporet frafarter, med udgangspunkt i foretaget målinger, samt teoretiske overvejelser.

1.3 Problemafgrensning

I specialet tages der udelukkende udgangspunkt i kryds med udvidet tilgange for ligeudkørende trafikanter, hvilket gøres med henblik på at få et datamateriale med samme udgangspunkt. Derudover er det kun kryds udenfor tættere bebygget områder der indgår i analysen, da kryds i byen kan være kompliceret at analysere. Trafikafviklingen i kryds indenfor tættere bebygget områder kan i højere grad være påvirket af andelen af bløde trafikanter, tilbagestuvning for omkringliggende kryds samt ind -og udkørsler langs krydsets til -og frafarter. Disse faktorer vil påvirke trafikafviklingen i krydsets frafart, hvilket gør det kompliceret at konkludere om trafikafviklingen er påvirket af sammenfletning eller en af de andre faktorer.

2 | Metode

Dette kapitel har til hensigt at beskrive de metoder der anvendes i forbindelse med at vurdere trafikafviklingen i to-sporet kryds, med efterfølgende sporbortfald i frafarten. Følgende metoder er anvendt:

- Anbefalinger
- Litteraturstudie
- Udpegning af kryds
- Databehandling
- Statistiske test

Anbefalinger til hvordan udformningen af kryds med flere frafarter og efterfølgende sporbortfald er undersøgt i Danmark og andre lande for at få en forståelse for hvordan udformningen af frafarten bestemmes i dag og med hvilke anbefalinger. *Litteraturstudie* anvendes til at undersøge hvilke erfaringer der tidligere er med anvendelsen af kryds med flere spor og efterfølgende sporbortfald. Litteraturstudiet anvendes til at få en forståelse for hvilke faktorer der kan påvirke trafikafviklingen i kryds med flere frafarter og hvordan trafikken påvirkes. Dette er væsentligt for at kunne opstille en model til bestemmelsen af minimumslængderne til frafarten baseret på trafikken. *Udpegning af kryds* har til formål at udpege hvilke kryds der skal indgå i analysen og som modellen skal tage sit udgangspunkt i. Data indsamles i form af videooptagelser, som skal anvendes til at observere trafikafviklingen i udvalgte kryds og hvordan faktorer såsom tung trafik, trafikintensitet og varierende længder af frafarten påvirker trafikafviklingen. *Databehandling* af det indsamlede data skal anvendes til at kunne besvare problemformuleringen. Den indsamlede data skal igennem en række processer før de kan anvendes til at opstille en model for minimumslængden af frafarten. *Statistiske test* anvendes til at opstille en model og bestemme hvor præcis modellen er i forhold til det data der er indsamlet.

Resultaterne fra undersøgelserne afrapporteres i forskellige kapitler undervejs i rapporten, der primært skal gøre rede for de anbefalinger der er givet ved forskellige lande, faktorer der påvirker trafikafviklingen og opstille en model til bestemmelse af minimumslængder af frafarten.

2.1 Anbefalinger

De gældende anbefalinger fra en række nordiske lande samt andre lande, hvor anbefalingerne enten er skrevet på dansk, norsk, svensk eller engelsk er undersøgt, med henblik på at klarlægge hvilke anbefalinger der er til kryds med udvidede tilgange. Derudover er der taget kontakt til de styrelser, fra de enkelte lande, der udarbejder anbefalingerne for at få en forståelse for hvordan anbefalingerne skal tolkes. Her har det været muligt at få kontakt til *Vejdirektoratet* i Danmark, *Trafikverket* i Sverige og *National Highways* i England, som hver især har uddybet hvordan anbefalingerne skal tolkes og anvendes. Det har ikke været muligt at få en kommentar fra de øvrige landes styrelser, på trods af gentagende henvendelser.

2.2 Litteraturstudie

Der er udarbejdet et litteraturstudie for at undersøge erfaringerne med anvendelsen af kryds med udvidede tilgange. De udenlandske og danske erfaringer anvendes til bestemmelsen af hvilke faktorer der er interessant at undersøge i forbindelse med udarbejdelsen af en eventuel model. Erfaringerne fra udlandet og Danmark er opdelt i to separate litteraturstudier, med hver deres søgestrategi. Det danske litteraturstudie er primært baseret på en alternativ søgedatabase, da der er begrænset dansk litteratur tilgængeligt på området. Det er udenlandske litteraturstudie er baseret på en systematisk litteratursøgning, som hovedsageligt skal danne grundlaget for rapporten.

2.2.1 Søgestrategi

I februar 2022 blev der foretaget litteratursøgninger i fire hoveddatabaser, som omfattede TRID, Science Direct, Scopus og Scholar. Derudover er der foretaget litteratursøgninger ved to alternative søgedatabaser, som omfatter Traffitec og Primo. Der er opstillet en række nøgleord, som har til formål at sikre relevansen for den fundne litteratur. De nøgleord der er anvendt i forbindelse med litteraturstudiet kan aflæses af tabel 2.1:

Tabel 2.1: Anvendte engelske og danske nøgleord i litteraturstudiet.

Engelske	Danske
Signal*	Signalanlæg
Intersection OR Junction	Sporbortfald
Through	Frafart
Lane	
Reduction	
Capacity	

Ud fra nøgleordene i tabel 2.1 er der opstillet følgende søgeformular for det udenlandske litteraturstudie:

Signal AND (Intersection OR Junction) AND Through AND Lane AND reduction AND Capacity*

I søgeformularen er der anvendt 'AND' mellem nøgleordene, som indikerer at artiklerne skal indeholde et af nøgleordene indenfor hver kategori. Der anvendes 'OR' mellem to sammenlignelige nøgleord, som indikerer at artiklerne kun skal indeholde et af ordene, for at komme i betragtning. Ved nøgleordet "signal" anvendes et asterisksymbol, som betyder at alle gradbøjninger af ordet godtages. Søgeformularen er blevet justeret i forhold til den konkrete database der anvendes, for at matche den specifikke struktur og de krav der er stillet til hver database. Science Direct har en begrænsning på antallet af boolske operatorer der kan anvendes i søgeformularen og godtager ikke brugen af asteriske symboler. Derfor er der ved søgedatabasen Science Direct anvendt følgende søgeformular:

(Signal OR Signalized) AND (Intersection OR Junction) AND Through AND Lane AND reduction AND Capacity

Duplikeret og irrelevant litteratur frasorteres, og referencelister inden for udvalgte artikler er blevet undersøgt, med henblik på at finde anden relevant litteratur til studiet.

2.2.2 Inklusions- og eksklusionskriterier

Der er blevet foretaget en omhyggelig screening af litteraturen, med det formål at sikre dets relevans til emnet. Til screeningen er der opstillet en række forudbestemte inklusions- og eksklusionskriterier, som skal afgøre om litteraturen er relevant for studiet eller ej. Konkret indhold i litteraturen skal opfylde følgende kriterier for at indgå i litteraturstudiet:

- Litteraturen skal være udgivet på dansk, engelsk, svensk eller norsk
- Litteraturen skal omhandle 2-sporet frafarter
- Den geometriske udformning skal være beskrevet
- Frafartssporene skal flette sammen efter krydset

Litteraturstudiet er ikke tidsbegrænset, da litteratur af ældre dato kan indeholde relevant information vedrørende hvilke faktorer der påvirker trafikafviklingen og på hvilken måde.

2.2.3 Systematisk litteratur gennemgangsproces

Resultaterne fra den opstillede søgeformular kan ud fra hver database aflæses af tabel 2.2.

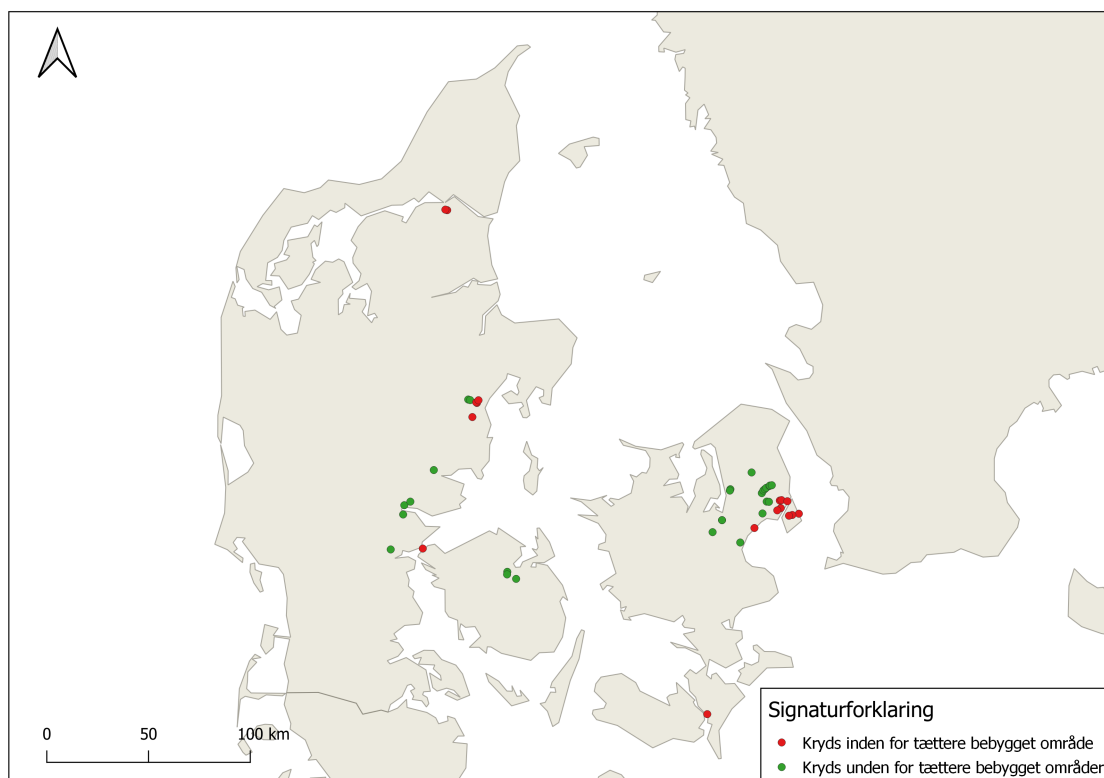
Tabel 2.2: Andelen af relevant litteratur der er udtrukket fra database.

Hoveddatabaser	
TRID	19
Scopus	55
Science Direct	162
Google Scholar	271
Alternative databaser	
Traffitec	3
Primo	302

Efter en sammenligning af resultaterne i tabel 2.2 fra hver database, er der fundet 116 dubletter. Efter dubletter er fjernet er der i alt udtrukket 696 artikler fordelt på de seks databaser, hvoraf titel og resume er gennemlæst i 139 af artiklerne. Litteraturen ekskluderes når inklusionskriterierne ikke er tilstede og hvis litteraturen ikke er fuldt tilgængelig. Efter en gennemgang af litteraturen, er 67 hele artikler blevet vurderet for berettigelse, hvoraf referencelister fra relevante artikler er gennemgået og potentielt materiale er inddraget i litteraturstudiet. Der er i alt 24 publicerede artikler der matchede alle kriterierne og som danner grundlaget for litteraturstudiet.

2.3 Udpegning af kryds

Kryds med udvidede tilgange etableres ofte med det formål at undgå kapacitetsproblemer. Sporudvidelsen øger kapaciteten i grøntiden, da trafikken kan afvikles gennem flere spor. Dette studie har til formål at undersøge trafikafviklingen i kryds med udvidede tilgange og undersøge hvordan forskellige faktorer påvirker trafikafviklingen. Der er foretaget en analyse af 44 kryds, hvoraf de 32 kryds er udpeget i samarbejde med Vejdirektoratet og de resterende er udpeget ved brug af Google Maps. Krydsenes geografiske placering kan ses på figur 2.1.



Figur 2.1: Placering af de analyserede kryds der indgår i studiet.

Krydsene på figur 2.1 er blevet analyseret i forhold til en række faktorer som kan have afgørende betydning for trafikafviklingen i frafarten. Faktorerne krydsene er analyseret ud fra fremgår herunder:

- Sporkombination
- Længden af frafarten
- Årsdøgntrafikken i den retning med sporbortfald
- Andelen af tung trafik
- Byzone eller landzone
- Sammenfletning eller vognbaneskit
- Skiltning og afmærkning i krydsets til- og frafart
- Antal spor før krydset

Det vurderes at være interessant at undersøge hvordan trafikken fordeler sig mellem den vognbane der bortfalder efter krydset og den der fortsætter. Det vurderes på forhånd at faktorer såsom kombineret svingspor/ligeud, trafikintensiteten og andelen af tung trafik, kan påvirke

fordelingen af trafik mellem vognbanerne. Derudover kan antallet af vognbaner før krydset have indflydelse på fordelingen, da det vil kræve en fysisk handling af trafikanten, hvis det ønskes at anvende det ekstra spor. Ligeledes er det interessant at skelne mellem kryds placeret i by- og landzone. By kryds kan være kompliceret at analysere, grundet påvirkninger fra for eksempel ud- og indkørsler i nærheden af krydset og andelen af bløde trafikanter. Skiltning og afmærkningen af krydset kan have en betydning for trafikafviklingen i både til- og frafarten, da skiltning og afmærkning kan være med til lede trafikanterne sikkert og hurtigt gennem krydset.

Da trafikafviklingen i kryds beliggende inden for tættere bebygget områder kan være kompliceret at analysere, frasorteres disse. Dette reducere andelen af potentielle kryds fra 44 til 27 kryds. Krydsene placeret uden for tættere bebygget områder er rangeret i forhold til årsdøgntrafikken, med henblik på at udvælge de kryds der skal indgå i selve analysen. Årsdøgntrafikken er en vigtig faktor, da modellen skal kunne tage højde for kryds med både lave og høje trafikintensiteter. Derudover er der i udvælgelsen af kryds taget højde for der skal være forskellige længder af frafarter, således det kan observeres hvordan længden af frafarten påvirker trafikafviklingen. Data vedrørende de kryds der har indgået i foranalysen fremgår i bilag A.

Det er vurderet at fem kryds, som er placeret forskellige steder i landet, er tilstrækkelig for dataanalysen. Det endelig valg af krydslokaliteterne er foretaget på baggrund af følgende kriterier:

- Der skal være to ligeudgående spor og efterfølgende sporbortfald i krydsets frafart
- Tilstrækkelige trafikmængder
- Krydsets placering skal være uden for tættere bebygget områder
- Varierende længder af frafartssporet
- Variation i hvilket spor der bortfalder efter krydset
- Passende afstande til omkringliggende kryds

Med udgangspunkt i ovenstående kriterier er følgende kryds blevet udvalgt til at indgå i studiet:

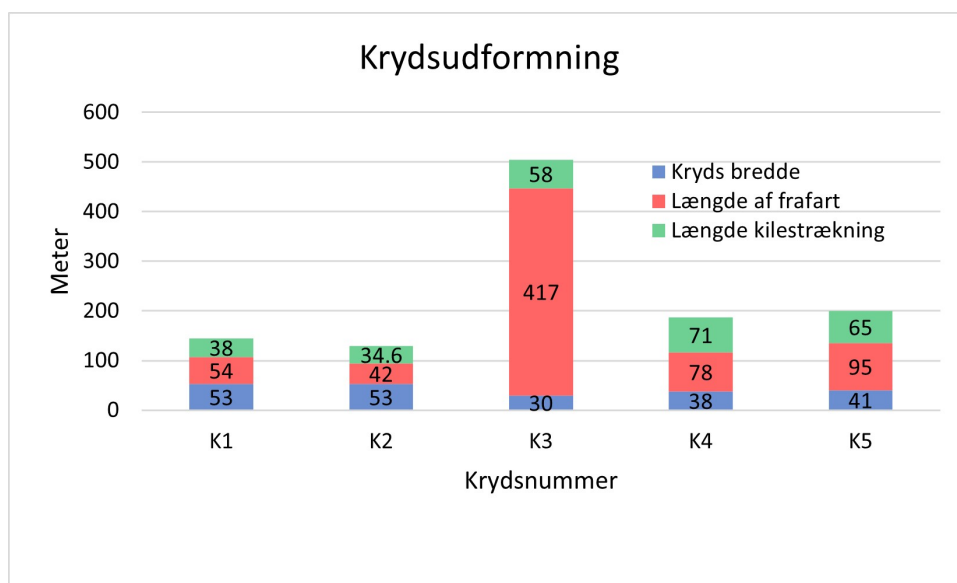
- K1: Motorringvej 4/Klausdalsbrovej, 2750 Ballerup.
- K2: Viborgvej/Åby Ringvej, 8210 Aarhus
- K3: Motorringvej 4/Krebsdammen, 2730 Herlev
- K4: Silkeborgvej/Bygholm Bakker, 8700 Horsens
- K5: Juelsmindevej/Horsensvej, 7120 Vejle

I tabel 2.3 fremgår data vedrørende de fem udvalgte kryds.

Tabel 2.3: Hoveddata for de fem udvalgte kryds sorteret i forhold til ÅDT.

Kryds nr.	ÅDT (ktj)	Frafart (m)	Kile-strækning (m)	Sporbortfald	Skiltning af sporbortfald	Bredde frafart (m)	Bredde af kilestrækning(m)
K1	27.442	54	38	Venstre	Ja	6,5	3,6
K2	26.116	41,5	34,6	Midt	Nej	7,6	4,4
K3	25.092	417	58	Højre	Nej	6,5	3,5
K4	18.572	78	71	Midt	Ja	6,9	3,9
K5	14.010	94,5	65	Venstre	Ja	5,9	4,5

Det fremgår af tabel 2.3 at der er varierende længder af både frafarten og kilestrækningen. Der er ligeledes en vis variation i bredden af frafarten, hvor bredden ved kilestrækningens afslutning er mere konstant. På figur 2.2 er krydsgeometrien for de fem udvalgte kryds illustreret ud fra bredden af krydsområdet, længden af frafarten og kilestrækningen.



Figur 2.2: Placering af de analyserede kryds der indgår i studiet.

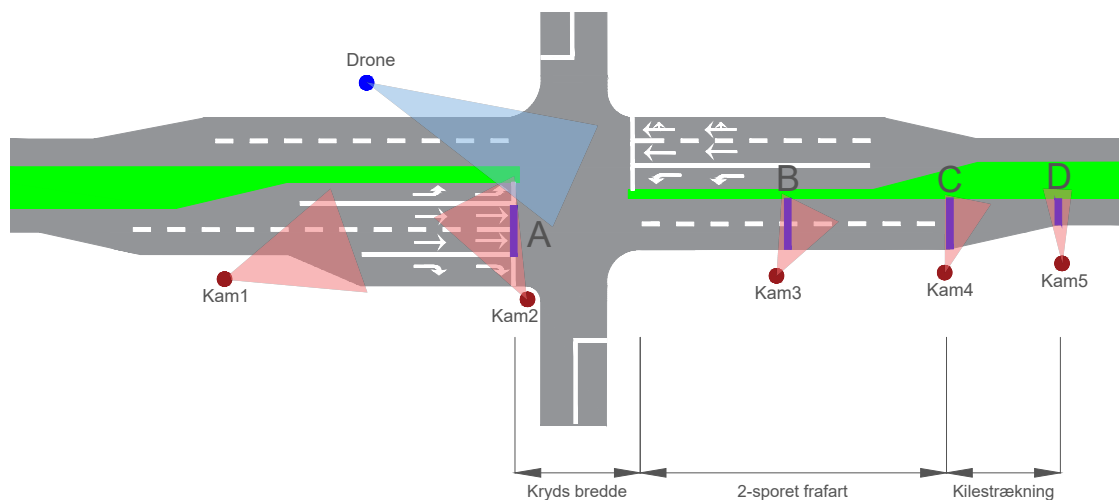
På figur 2.2 spænder den samlede længde, fra krydsets stopstreg til afslutningen af kilestrækningen, fra 129 meter (K2) til 505 meter (K3)

2.4 Dataindsamling

Der indhentet en række data i form videooptagelser fra spidstimen i hvert af de fem udvalgte kryds i tabel 2.3. Vejdirektoratet har været behjælpelige med droneoptagelser i tre af krydsene, hvor de resterende er optaget med actionkameraer. Videooptagelserne skal dække trafikanternes færden fra ankomsten til krydset og til trafikanterne har passeret afslutning af kilestrækningen. Der indsamles tidskoder fra fire forskellige målesnit i krydset, som skal anvendes til at bestemme trafikanternes forsinkelse. De fire snit er som følgende:

- Passage af stopstregen (snit A)
- Passage halvvejs gennem frafarten (snit B)
- Passage i det punkt hvor afmærkningen i frafarten ophører og kilestrækningen begynder (snit C)
- Passage ved afslutningen af kilestrækningen (snit D)

På figur 2.3 kan en principskitse af kameraopsætningen ses og derudover fremgår placering af de fire målesnit A, B, C og D.



Figur 2.3: Principskitse af kameropsætning samt placering målesnitne A,B,C og D.

For de kryds der optages med actionkameraer, opstilles der i alt fem kameraer, der skal dække trafikanternes færden fra ankomsten til krydset og til den sidste trafikant har passeret afslutningen af kilestrækningen. Hvert kameras fokuspunkt er som følgende:

- Kam1 filmer trafikanternes ankomst til krydset og viser samtidig hvornår hovedsignalet skifter til grønt.
- Kam2 filmer trafikanterne i snit A og anvendes til at notere passagetider over stopstregen.
- Kam3 filmer trafikanterne halvvejs gennem frafartsstrækningen.
- Kam4 filmer snit C, som er det punkt hvor afmærkningen ophører i frafartsstrækningen.
- Kam 5 filmer snit D, som er det punkt hvor frafartstrækningen er snævret ind til et spor.

Figur 2.3 viser en situation hvor der både anvendes actionkmaera og droneoptagelser. Under dataindsamlingen er der enten anvendt drone eller actionskamera og ikke begge på samme tid.

Videooptagelserne fra hvert kamera er stemplet med en tidskode, således det muligt at synkronisere optagelserne. Dette gør det muligt at følge den enkelte trafikants færden gennem

krydset, fra ankomsten i tilfarten til afslutningen af kilestrækningen. På figur 2.4 fremgår et eksempel på en af de foretaget optagelser der er synkroniseret og derfor muligt at følge den samme trafikant i hvert målesnit.



Figur 2.4: Synkronisering af videokameraerne gør det muligt at følge den enkelte trafikants færden gennem de fire målesnit. Billederne stammer fra optagelserne der er foretaget i krydset Klausdalsbrovej/Motorringvej 4 den 21. april 2022.

For hvert kryds er der blevet foretaget videooptagelser under spidstimen. I tabel 2.4 fremgår dato, tidspunkt samt om der anvendt actionkamera eller drone til videooptagelserne.

Tabel 2.4: Dato og tidspunkter for de udførte videooptagelser samt om der er anvendt aktionkamera eller droneoptagelser.

Kryds	Dato	Tidsrum	Analyseret tidsrum	Anvendt udstyr
K1	21. april 2022	15.00-16.30	15.00-15.43	Actionkamera
K2	28. april 2022	14:30-16.30	15.02-16.17	Drone
K3	20. april 2022	16.00-17.05	16.00-16.44	Actionkamera
K4	29. april 2022	07.00-09.00	07.06-08.12	Drone
K5	9. maj 2022	06.40-08.05	06.45-07.48	Drone

I bilag C fremgår kameraernes placering langs krydset eller dronens placering, afhængig af hvilken metode der er anvendt.

2.5 Databehandling

For at kunne opstille en model til estimeringen af minimumslængden af frafarten, baseret på trafikintensiteten, er kø-situationer for hvert omløb registreret, som skal anvendes til den efterfølgende analyse. Alle trafikanter der har holdt stille i krydsets tilfart, betragtes som værende en del af køen. En kø-situation starter fra det tidspunkt hovedsignalet skifter til grønt og afsluttes når det bagerste køretøj i køen passere afslutningen af kilestrækningen. Kø-situationerne er defineret ud fra følgende:

- Der skal som minimum være to ligeudkørende trafikanter, der har holdt stille for rødt i krydset.
- Ligeudkørende trafikanter der har holdt stille for rødt i krydset, betragtes alle som værende en del af køen.
- Afviklingen af køen starter i det tidspunkt hvor hovedsignalet skifter til grønt.
- Køen betragtes som værende afslutten, når det sidste køretøj i køen passere afslutningen af kilestrækningen.

Ud fra optagelserne fra actionkameraerne og droneoptagelserne, er der for hver kø-situation registreret følgende data:

- Tidspunkt for hvornår hovedsignalet skifter til grønt, som samtidig er starttidspunktet for afviklingen af køen.
- Fordelingen af køretøjer ved passage af stopstregen i henholdsvis venstre og højre vognbane. Derudover er køretøjerne fordelt på køretøjstyper, så det er muligt at skelne mellem let og tung trafik.
- Tidskode for passage af snit B og C fordelt på henholdsvis venstre og højre vognbane i frafarten.
- Tidskode for passage af snit D.

2.5.1 Personbilenheder

Under registreringen af trafikken i krydsene opdeles køretøjerne ud fra køretøjstype. Under et omløb i et signalreguleret kryds færdes flere forskellige køretøjskategorier, som hver især har nogen karakteristikker der bestemmende for hvor hurtigt køretøjet afvikles i krydset. Derfor er det nødvendigt at omregne køretøjerne fra hvert enkelt trafikstrøm om til personbilenheder, således at alle køretøjerne har samme enhed. Denne omregning foretages ved at anvende personbilækvivalenter for hvert køretøjskategori, som skal bruges ved omregningen fra køretøjer til personbilenheder. Der skelnes mellem følgende køretøjstyper:

1. Store knallerter og motorcykler
2. Person- og varebiler
3. Lastbiler og busser
4. Sætte- og påhængsvogntog

Personbilækvivalenterne bestemmes ud fra køretøjskategorien og længdegradienten fra primær- eller sekundærvejen og kan aflæses i tabel 2.5. [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]

Tabel 2.5: Personbilækvivalenter for de enkelte køretøjskategorier. [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]

Længdegradient primær-/sekundærvej	Køretøjskategori			
	Stor knallert/ motorcykel	Person- og varevogn	Lastbiler og busser	Sætte- og påhængs- vogntog
Stigning: 40 ‰	0,7	1,4	3,0	6,0
Stigning: 20 ‰	0,6	1,2	2,0	3,5
0	0,5	1,0	1,6	2,6
Fald: 20 ‰	0,4	0,9	1,2	2,0
Fald: 40 ‰	0,3	0,8	1,0	1,2

Det tages ikke højde for længdegradienten ved omregningen fra køretøjer til personbilenheder, da denne ikke er kendt.

2.5.2 Følgetider

Registreringen af køretøjernes passage af stopstregen, gør det muligt at analysere følgetiden i krydset for ligeudkørende trafikanter.

Følgetiden er en betydende faktor i beregningen af krydsets grundlæggende kapacitet. Følgetiden defineres som den tidsmæssige afstand mellem to på hinanden følgende køretøjer, der kører ud i krydset. Følgetiderne er baseret på hvilken manøvre der foretages i krydset og fremgår af tabel 2.6 [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]

Tabel 2.6: Følgetider for de enkelte motortrafikstrømme. [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]

Venstresving uden vigepligt	Venstresving med vigepligt	Ligeud	Højresving uden vigepligt	Højresving med vigepligt
1,9 sekunder	2,5 sekunder	1,8 sekunder	2,4 sekunder	2,8 sekunder

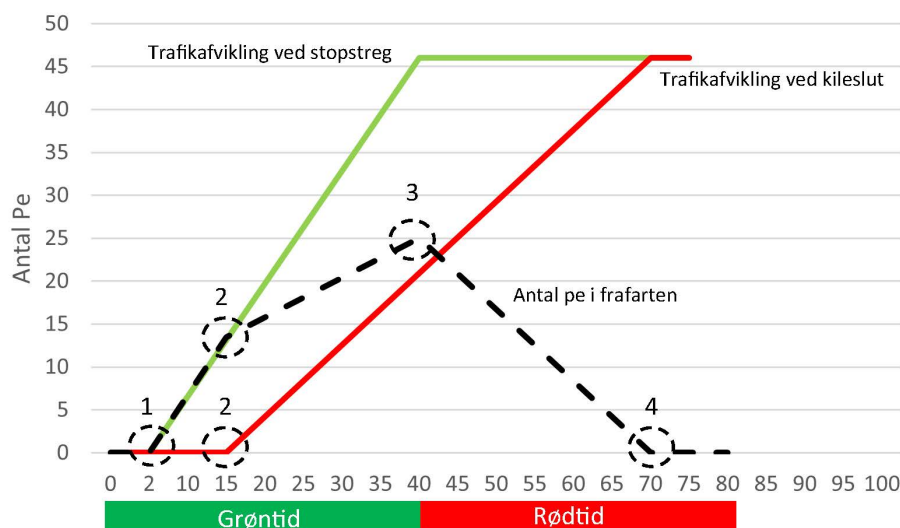
De registrerede tidskoder for ligeudkørende over stopstregen i de fem udvalgte kryds, sammenholdes med den følgetid der er angivet i tabel 2.6. Dette gøres med henblik på at vurdere om den observerede følgetid stemmer overens med den følgetid der er angivet i vejreglhæftet 'Kapacitet og serviceniveau' [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019].

2.5.3 Trafikafvikling

Det indsamlede data analyseres med det formål at undersøge om der er en sammenhæng mellem trafikafviklingen og længden af frafarten. Til denne analyse vil følgende faktorer undersøges nærmere:

- Anvendelsen af vognbanen der bortfalder efter krydset, sammenlignet med antallet af personbilenheder i køen. Det antages på forhånd at andelen af tung trafik og længden af frafarten har en vis påvirkning på valget af vognbane.
- Passagetiden mellem de fire målesnit. Det forventes at der er en sammenhæng mellem passagetiden mellem hvert målesnit og kapaciteten i frafarten.
- Hvor på frafartsstrækningen trafikanterne vælger at flette ind i den vognbane der forsætter efter krydset.
- Tiden det tager at afvikle en kø, set i forhold til antallet af personbilenheder, andelen af tung trafik samt længden af frafarten.

Med udgangspunkt i det indsamlede data og analyser, undersøges det om det er muligt at estimere en længde af frafarten der hensigtsmæssig for trafikafviklingen. Princippet bag estimeringen af frafartens minimumslængde er illustreret på figur 2.5.



Figur 2.5: Principskitse af trafikafviklingen i kryds med to-sporet frafarter.

Der er primært fire punkter (se figur 2.5) under afviklingen af trafikken i krydset, der kommer til at have en afgørende indflydelse på længden af frafarten. De er som følgende:

1. Tidspunktet det første køretøj passere stopstregen
2. Tidspunktet det første køretøj passere afslutning af kiletrækningen. Det er samtidig dette punkt hvor stigning i antallet af personbilenheder i frafarten reduceres, da afviklingen af trafikken i frafarten påbegyndes
3. Tidspunktet hvor hovedsignalet skifter til rødt, hvilket medføre at der ikke ankommer flere personbilenheder i frafarten. Dette er samtidig det tidspunkt der er bestemmende for minimumslængden af frafarten.
4. Tidspunktet hvor al trafikken i frafarten er afviklet.

2.6 Statistiske test

Til at fortolkningen af data anvendes forskellige statistiske test. Ved fortolkningen af gennemsnit fra et datasæt anvendes beskrivende statistik, hvor der er fokus på de såkaldte positionsmaal, det vil sige enkelte punkter i datafordelingen. Dette omhandler hovedsageligt gennemsnittet, medianen og konfidensintervaller i et datasæt, som kan udtrykkes gennem simple mål for skævheden og spredningen. [Vejrup-Hansen, 2014]

2.6.1 Multipel regression

Til at undersøge sammenhængen mellem minimumslængden af frakørsen og de forklarende variable, anvendes regressionsanalyse. I en regressionsanalyse undersøges sammenhængen mellem en responsvariabel (y) og en eller flere forklarende variable. Ved anvendelse af regressionsanalyse er det muligt at bestemme værdien af responsvariablen på baggrund af de forklarende variable. Analysen giver et indblik i den enkelte forklarende variables indflydelse på responsvariablen samt signifikansniveauet. På baggrund af regressionsanalysen opstilles et matematisk udtryk for sammenhængen mellem responsvariablen og de forklarende variable. I en multipel regressionsanalyse undersøges sammenhænge af typen:

$$y = a + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots \quad (2.1)$$

Hvor y forklares af to eller flere uafhængige variable. For at det skal give mening at måle sammenhængen mellem hver forklarende variable og responsvariablen (y), er det en forudsætning at der uafhængighed (ingen korrelation) indbyrdes mellem de forklarende variable. Hvis der er afhængighed tilstede blandt de forklarende variable, er der tale om multikollinearitet, som blandt statistikere vurderes at være tilstede ved korrelationskoefficienter på 0,7 eller derover. Der er en række modelforudsætninger som skal være tilstede før modellen kan accepteres. De er som følgende: [Vejrup-Hansen, 2014]

1. Samvariation. Der foretages hypotesetest (F-test) for samvariation, hvor estimerede hældninger undersøges, med henblik på at teste om minimum en af hældningerne er statistisk signifikant.
2. Koefficient hældninger forskellige fra nul. Der foretages en T-test for at teste for signifikante hældningskoefficienter, hvor den estimerede hældning skal have et konfidensinterval der ikke indeholder 0.
3. Gennemsnittet for residualerne skal være lig med nul og være normalfordelt omkring nullen.
4. Det er et krav at residualerne skal vise varianshomogenitet, hvilket vil sige at der skal være konstant varians.
5. Der skal være uafhængighed mellem residualerne, hvilket vil sige at der ikke må være en tendens omkring nullen.
6. Ingen multikollinearitet.

3 | Anbefalinger

Udformningen af 2-sporet frafarter i signalregulerede kryds er undersøgt i følgende lande:

- Danmark
- Norge
- Sverige
- England
- USA
- Australien

Der er foretaget en gennemgang af anbefalingerne vedrørende den geometriske udformning af 2-sporet frafarter i kryds. Beskrivelserne er baseret på håndbøger/vejregler fra de pågældende lande, samt udtalelser fra enkelte instanser der har ansvaret for vejnettet. Dette er gjort med henblik på at opnå en bredere forståelse for de enkelte anbefalinger og hvordan de skal fortolkes.

3.1 Danmark

I den danske vejregl håndbog 'Kapacitet og serviceniveau' [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019] fremgår det hvilken længde frafarten som minimum bør have, for at frafarten kan rumme den trafik der afvikles under et omløb, således at kapaciteten i krydsets tilfartsspor ikke påvirkes. De anbefalede længder af 2-sporet frafarter afhænger af tilfartens grøntid og det anbefales at anvende minimum 100 meter frafartsstrækning, når tilfarten har 20 sekunders grøntid. Derefter stiger den anbefalede længde med 40 meter for hvert 10. sekund frafartens grøntid øges. Anbefalingerne der er angivet i de danske vejregler fremgår af tabel 3.1

Tabel 3.1: Minumslængde af frafartssporet i følge danske vejregler.

Tilfartens grøntid	Længde af 2-sporet frafart
20 sekunder	100 meter
30 sekunder	140 meter
40 sekunder	180 meter
50 sekunder	220 meter
60 sekunder	260 meter

Ved at overholde de anbefalede længder i tabel 3.1 viser beregninger at trafikafviklingen i krydsets frafartsspor, ikke vil påvirke kapaciteten i krydsets tilfartsspor. Den anbefalede længde til kilestrækningen i overgangen mellem den 2- og 1-sporet del, anbefales at have en længde på 100-150 meter. Vejdirektoratet; Trafitec [2019]

3.2 Norge

I den norske vejreglhåndbog 'Geometrisk utforming av veg- og gatekryss' [Vegdirektoratet, 2014] bestemmes den anbefalede minimumslængde af frafartssporet, ud fra den skilte hastighed i krydset, hvor der skildres mellem hastighedsgrænser på ≤ 50 km/t og ≥ 60 km/t. De anbefalede længder fremgår af tabel 3.2. [Vegdirektoratet, 2014]

Tabel 3.2: Minumslængde af frafartssporet og kilestrækningen efter signalregulerede kryds med sporbortfald.

	Hastighedsgrænse	
	≤ 50 km/t	≥ 60 km/t
Frafartsstrækning	20 meter	30 meter
Kilestrækning	40 meter	50 meter

3.3 Sverige

I vejregelhåndbogen "Vägar och gators utformning, RÅD" [Trafikverket, 2022] fremgår der ingen anbefalede længder til 2-sporet frafartsstrækninger efter signalregulerede kryds. Det er kort beskrevet at det kan overvejes at øge antallet af vognbaner, for at reducere omløbstiden i hårdt belastede kryds. Derudover kan det overvejes om der er mulighed for at samordne flere kryds med henblik på opnå en mere jævn belastning af krydset. Det at øge antallet af spor i et kryds kan være forbundet med en række ulemper: [Trafikverket, 2022]

- Længere krydsningsafstande.
- Længere sikkerhedstider.
- Krydset kan være sværere at forstå.

Kenny Dolleris, der er ansat som National planlægger i vejdesign ved "Trafikverket", uddyber (e-mail, 30. marts 2022, Bilag D) at VGU hovedsageligt varetager nybyggeri og større ombygninger og derfor er 2-sporet frafarter i signalregulerede kryds ikke yderligere beskrevet. Trafikverket får ofte henvendelser vedrørende mindre tiltag der kan forbedre kapaciteten i signalregulerede kryds og ved kryds med udvidede tilgange ønskes en så lang strækning som muligt og gerne omkring 250 meter. Der er ingen empiriske mål der kan understøtte bestemte frafartslængder under visse forhold, men i praksis er frafarten begrænset af forholdene på det aktuelle sted. Oftest er der ikke plads nok til en tilfredsstillende frafartslængde, fordi trafikflowet i krydset ikke undersøgt grundigt nok i den indledende fase af krydssets planlægning.

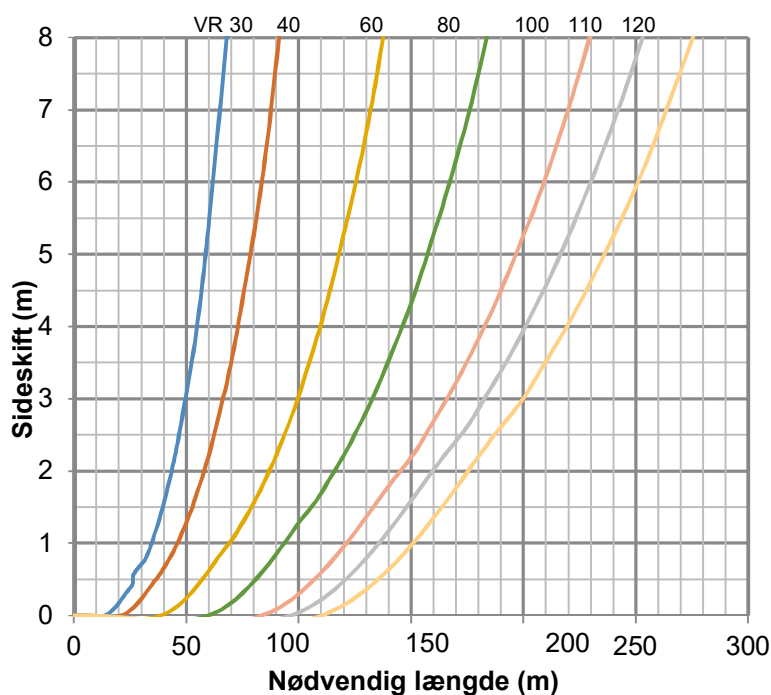
Det kan være svært at finde nogle "typiske cases" der kan anvendes som vejledende designkrav. Dette skyldes at hver placering er unik og derfor varierer udformningen af krydset, frafarten og kilestrækning også fra hvert kryds. I Sverige skiltes bortfaldet oftest med "E15, Sammanvävning" (Ingen køretøjer har fortrinsret), men hvis det vælges at skilte det som et vognbaneskift, vil det ligeledes have indflydelse på længden af frafarten. Kenny Dolleris mener at det vil være en fordel at det er venstre vognbane der bortfalder efter krydset, da det oftest er denne vognbane der kan tiltrække de lidt mere vovede bilister. Denne type trafikanter har også nemmere ved at finde en acceptabel tidsafstand til at foretage flettemanøvre, uanset hvordan kilestrækningen er udformet.

I et signalanlæg ”pakkes” trafikken ved rødt og frigives koncentreret gennem mindre tidsintervaller. Behovet for at tilføje en ekstra vognbane er oftest størst for ligeud kørende trafikanter, men kan i nogle tilfælde også gøre sig gældende for svingende trafikanter. Lange grøntider reducerer incitamentet til at anvende den ekstra vognbane, når trafikanterne indser at det er muligt at passere krydset indenfor grøntiden. Korte grøntider medføre en begrænset mængde af tætpakket trafik i frafarten og giver en større mulighed for at trafikanterne kan foretage en sikker flette manøvre. Tilgængelighed vil kortere grøntider ligeledes resulterer i mere ventetid i krydset og længere kø i krydsets tilfarter.

Kapacitetsforbedringen i kryds med udvidede tilgange kan være markant, men hvis udformningen ikke er udført korrekt, opnås en ringe udnyttelse af det ekstra spor. Dette kan medføre kapacitetsnedbrud ved sammenfletningen under spidsbelastningen, som netop er det tidspunkt hvor der er behov for kapaciteten. Der kan opnås et højt trafikflow i kryds med udvidede tilgange, men ved kapacitetsnedbrud er det oftest kun muligt at afvikle 1000-1500 køretøjer i timen, hvilket vil medføre en tilbagestuvning i frafarten.

Længden af frafarten er påvirket af tilfartens længde, udformningen af krydset, samt hvilken bane der bortfalder efter krydset. Når der foretages en vognbaneudvidelse i et kryds, ønskes det at den ekstra vognbane benyttes i et rimeligt omfang. Det er dog ikke altid at en ligelig fordeling af trafikken mellem vognbanerne er den mest fordelagtige, da dette blandt andet kan medføre en øget frafartens længde. Herudover afhænger fordelingen af trafikken i vognbanerne af det omgivende trafiksystem, destinationspunkter og vejtype. Det kan være interessant at undersøge trafikken der tilgår frafarten fra andre retninger, når der er rødt for de ligeud kørende. Der kan være tilfælde hvor der er separat højre- eller venstresving fra de andre retninger i krydset, der kan påvirke den efterfølgende trafikafvikling i frafarten. Nogle steder fungerer en kort frafart bedre end det umiddelbart skulle tænkes og andre steder har en forkert udformning resulteret i en udnyttelse der var tæt på nul, selv med længere frafartsstrækninger.

Der er ligeledes ingen anbefalinger til længden af kilestrækningen angivet i vejregelhåndbogen "Vägar och gators utformning, RÅD"[Trafikverket, 2022]. Figur 3.1 kan anvendes i forbindelse med bestemmelsen af kilestrækningens længde og kan estimeres på baggrund af bredden på vognbanen der bortfalder og hastighedsgrænsen i krydset.



Figur 3.1: Anbefalede kilestrækningslængde med hensyntagen til planlægningshastigheden og vognbanebredden. [Trafikverket., 2020]

3.4 England

I designmanualen "Geometric design of at-grade priority and signal-controlled junctions" [National Highways, 2021] er der ingen anbefalinger til minimumslængden af frafartsstrækninger efter signalregulerede kryds. Det er kort beskrevet hvordan kilestrækningen bør udformes og her anbefales det at kilestrækningen begynder umiddelbart efter krydset og har en længde svarende til 100 meter

Richard Webster, der er ansat som teknisk rådgiver i "Nations Highways" uddyber (e-mail, 21. marts, 2022, Bilag D), at det er op til den enkelte rådgiver at overveje hvilken længde der vil være passende mellem krydset og kilestrækningen, ud fra følgende faktorer:

1. Trafikflow i hver vognbane.
2. Hastighedsgrænsen i krydset samt efter.
3. Andelen af tung trafik i hvert trafikflow.
4. Overordnede forhold og andre begrænsninger.
5. Resultater af mikrosimuleringsmodeller og interaktion mellem overhalinger i hver bane.

Derudover påpeger Richard Webster at det ikke er sikkert, at en fastlagt længde i designmanualen ville være egnet til alle scenarier og derfor er dette ikke angivet. Richard Webster henviser til designmanualen "Geometric design of roundabouts" [National Highways, 2020], hvor der er angivet en optimal udformning af 2-sporet frafarter efter en 2-sporet rundkørsel, der muliggør overhaling i frafartstrækningen efter rundkørslen. Længden benævnes "Differential Acceleration Lane (DAL)" og her anbefales en minimumslængde på 250 meter. Dette kan være en god indikator til hvilken længde der bør vælges, hvis det ønskes at tunge køretøjer ikke skal påvirke trafikafviklingen efter krydset.

3.5 USA

I den amerikanske stat New Jerseys designmanual "Roadway Design Manual"[Department of transportation, 2015] er det beskrevet hvordan signalregulerede kryds med efterfølgende sporbortfald bør udformes. Der anbefales en minimumslængde af frafartsstrækningen der er baseret på hastighedsgrænsen i krydset eller på baggrund af grøntiden. Minimumslængder der er baseret på hastighedsgrænsen fremgår af tabel:

Tabel 3.3: Minumslængde af frafartssporet efter signalregulerede kryds med sporbortfald.

Hastighedsgrænse	Frafart
≤ 40 mph	380 feet
45 mph	560 feet
50 mph	760 feet
55 mph	960 feet
60 mph	1170 feet

Minimumslængden kan ligeledes estimeres ud fra følgende formel:

$$L_2 = 12 * G \quad (3.1)$$

Hvor:

- L_2 , er minimumslængden af frafartsstrækningen
- G , er minimum grøntiden i krydset

Minimumslængderne baseret på enten tabel 3.3 eller ligning 3.5 er gældende fra stopstregen til kilestrækningens begyndelse. Den anbefalede minimumslængde af kilstrækningen er 300 feet (91,44 meter)

3.6 Australien

I den australske designmanual "Unsignalised and Signalised Intersection"[Aumann og Whitehead, 2021] er det angivet at vognbanen der bortfalder efter krydset skal have en tilfarstlængde der gør det muligt at opretholde et konstant trafikflow over stoplinjen under hele grøntiden. Trafikken der afvikles under hvert omløb kan estimeres ud fra den maksimale grøntid, der er tildelt fasen der betjener vognbanen der bortfalder efter krydset.

Hvis det antages at en fase har 40 sekunders grøntid og den gennemsnitlige følgetid er to sekunder, så er det muligt at afvikle 20 køretøjer under et omløb. I Australien forudsættes det at hvert køretøj fylder otte meter, hvilket medføre at tilfarten som minimum skal være 160 meter lang. Det bør undersøges om køen i den gennemgående bane vil blokere for adgangen til vognbanen der bortfalder efter krydset, for at sikre at der kan opretholdes et konstant trafikflow i begge vognbaner. Det er ligeledes vigtigt at frafartsbanen har en længde der kan håndtere trafikken der afvikles under hvert omløb. Det anbefales at længden af frafartsbanen bør være baseret på cirka fire til seks sekunders rejsetid ved den hastighed der er angivet i

krydset, derudover skal længden af kilestrækningen tillægges. Det anbefales at længden af kilestrækningen bør beregnes ud fra følgende formel:

$$T_m = (V * Y) / (3.6 * S) \quad (3.2)$$

Hvor:

- T_m er kilestrækningens længde
- V , er hastighedsgrænsen i krydset
- S , er den tværgående bevægelseshastighed, hvilket kan fastsættes til 0,6 m/s
- Y , er bredden af vognbanen der bortfalder

3.7 Opsamling på danske og udenlandske anbefalinger

En opsamling på de anbefalinger der er fundet fremgår at tabel 3.4.

Tabel 3.4: Oversigt for udformning af sporbortfald efter signalregulerede kryds.

Land	Anbefalet minimumslængde af frafartsstrækning	Anbefalet minimumslængde af kilestrækning
Norge 	20 meter	40 meter
Sverige 	Ingen anbefalinger angivet, men der tilstræbes efter 250 meter	Ingen anbefalinger angivet
England 	Ingen anbefalinger angivet. Det er op til den enkelte rådgiver	100 meter
USA 	380 feet (115,82 meter)	300 feet (91,44 meter)
Australien 	Estimeres ud fra 4 til 6 sekunders rejsetid ved den skilte hastighed	Beregnes ved hjælp af en formel
Danmark 	100 meter	100-150 meter

4 | Litteraturstudie

I dette kapitel beskrives forskellige fremgangsmåder til hvordan minimumslængden af 2-sporet frakørsstrækninger kan estimeres, samt hvilke faktorer der kan påvirke længden. Dette inkluderer brugen af sporet der bortfalder efter krydset, opbygningen af signalplanen og den geometriske udformning af sporbortfaldet. Til sidst beskrives den fremgangsmåde der danner grundlag for de anbefalinger der er angivet i den danske vejreglhåndbog "Kapacitet og serviceniveau" Vejdirektoratet; Trafitec [2019], hvilket ligeledes fremgår af kap 3

4.1 Signalregulerede kryds med udvidede tilgange

Signalregulerede kryds med udvidede tilgange har en del lighedspunkter med traditionelle kryds med enkeltsporet tilgange. Der er dog nogle unikke karakteristika ved kryds med udvidede tilgange der kræver opmærksomhed, når krydset skal udformes og planlægges. Her tænkes der primært på at trafikanterne skal trække ud i det ekstra spor inden krydset og flette sammen igen efter krydset. Disse vognbaneskift påvirker trafikafviklingen i krydset, samt sikkerheden og udformningen af krydssets elementer. [Nevers et al., 2011]

Nevers et al. har udarbejdet designmanualen "Guidelines on the Use of Auxiliary Through Lanes at Signalized Intersections" [Nevers et al., 2011] til kryds med udvidede tilgange, ved at nærstudere 22 kryds i USA med flere tilfarter og efterfølgende sporbortfald. I forbindelse med udarbejdelse af designmanualen er følgende forskellige geometriske udformninger undersøgt:

- Kryds med et gennemgående spor og et kombineret højre/ligeud spor.
- Kryds med et gennemgående spor, samt et ekstra spor til ligeudkørende trafik og en separat højresvingsbane.
- Kryds med to gennemgående spor, samt en kombineret højresvings/ligeud bane.
- Kryds med to gennemgående spor, samt et ekstraspør for ligeudkørende og en separat højresvingsbane.

De fundamentale geometriske designprincipper for et traditionelt kryds med et enkelt sporet tilgange, gør sig ligeledes gældende for kryds med flere til- og frakørsler:

- Den geometriske udformning af krydset skal imødekomme trafikanternes forventninger
- Skiltningen og afmærkningen skal bidrage med at lede trafikanterne sikkert igennem krydset i sammenspil med den geometriske udformning.
- Der skal være tilstrækkelige oversigtsforhold tilstede i krydset, så trafikanterne kan træffe sikre beslutninger og/eller foretage en nødbremsning.
- Udkørsler skal helst være placeret uden for krydsområdet, således at dette ikke påvirker trafikafviklingen i krydset.

Disse principper er noget der relaterer sig til anvendelsesgraden af vognbanen der bortfalder efter krydset, til- og frakørslernes længder og afmærkningen i krydset. [Nevers et al., 2011]

4.2 Anvendelsesgraden af vognbanen der bortfalder efter krydset

Trafikanter vil oftest forsøge at reducere rejsetiden når de færdes i trafikken og derfor er de mere tilbøjelige til at vælge det ekstra spor, når der er en risiko for at de skal vente et omløb eller når køen er kortere i den anden vognbane. [Nevers et al., 2011]

Følgende parametre kan have en indvirkning på valget af vognbane:

- Til- og fartssporets længde.
- Skiltning og afmærkning.
- Trafikbelastningen i det gennemgående spor.
- Signalplanen
- Højresvingende trafik.
- Udkørsler langs til- og frafarter.

Hvis tilfartssporets længde er for kort, er der en større risiko for at vognbanen blokeres af den øvrige trafik og derfor ikke mulig at benytte for de andre trafikanter. Længere tilfartsbaner vil tiltrække flere bilister til at anvende vognbanen, hvilket vil medføre at der vil være et behov for en længere frafartsbane. Korte frafartsbaner får bilisterne til at føle at der er ikke plads nok til at kunne foretage en sikker sammenfletning og derfor vil der være flere der trafikanter der fravælger at benytte den. Derudover kan korte frafartsbaner medføre at flere trafikanter vælger at foretage en flettemanøvre samtidig med at der acceleres, hvilket øger risikoen for sammenstød i frafartsbanen. Frافartsbaner der er for lange øger området for eventuelle konflikter og kan resultere i uforventede vognbaneskit langtfra krydset. [Nevers et al., 2011]

Der kan igennem skiltning og afmærkning opnås en højre anvendelse af sporet der bortfalder efter krydset, som samtidig kan lede bilisterne til at foretage en sikker sammenfletning i frafartsbanen. På den anden side kan en forvirrende skiltning og afmærkning have den modsatte effekt. Trafikflowet i det gennemgående spor kan ligeledes medføre at flere trafikanter vælger at benytte det ekstra spor. Denne konklusion er tidligere blevet bekræftet igennem flere forskellige studier i brugen af korte vognbaner. Derudover vil en lav effektiv grøntid påvirke kapaciteten i tilfartssporet, hvilket medfører at flere bilister er tilbøjelige til at vælge det ekstra spor. Omløbstiden har ligeledes en indvirkning på brugen af det ekstra spor, da længere omløbstider resulterer i at der er flere bilister i kø ved hvert omløb, som igen medfører at flere bilister vælger det ekstra tilfartsspor. [Nevers et al., 2011]

Udkørsler langs til- og frafarten skaber en potentielt risiko for at svingende trafik påvirker trafikafviklingen i krydset, da svingende bilister blokerer for den gennemgående trafik. Den samme effekt opleves ved vognbaner hvor både højresvingende trafik og ligeudkørende kombineres. [Nevers et al., 2011]

Mccoy og Tobin har gennem observationer i brugen af spor der bortfalder efter signalregulerede kryds, evalueret hvordan længden af til- og frafartsbaner påvirker brugen af vognbanen. I forbindelse med studiet er der foretaget undersøgelser i hvordan bilisterne anvender vognbanerne i fem signalregulerede kryds, hvor de ekstra spor havde en længde fra 244-366 meter. Ud fra de observationer der blev foretaget kan det konkluderes at de eksisterende faktorer for brugen af den vognbane der bortfalder efter krydset, generelt er overestimeret. Derudover kan det konkluderes at en minimumslængde af frafarten der er baseret på kølængden i tilfarten, er for kort til at opnå en ligelig fordeling af anvendelsen mellem vognbanerne.

Der var på forhånd en formodning om at faktorer såsom trafik, geometri og signalplanen, kunne have en påvirkning på anvendelsen af sporet der bortfalder. Derfor er der anvendt multipel regressionsanalyse, med brugen af vognbanen som den afhængige variabel og faktorer såsom trafik, geometri og signalplan, som de uafhængige variable. Som et resultat af regressionsanalysen blev følgende formel til at udtrykke anvendelsen af den vognbane der bortfalder efter krydset, fundet statistisk signifikant ($p=0,01$): [Mccoy og Tobin, 1982]

$$STR = 1,24 + 0,00058 * (D_a + D_b) - 0,021 * G \quad (4.1)$$

Hvor:

- STR, er gennemsnittet af bilister der anvender det ekstra spor per omløb
- D_a , er længden af tilfarten
- D_b , er længden af frafarten
- G, er grøntiden for fasen der betjener den gennemgående trafik

Der er et behov for yderligere forskning i anvendelsesgraden af ekstra spor, hvor påvirkningen fra forskellige længder, signalplaner og trafikmængder bør undersøges mere. [Mccoy og Tobin, 1982]

Tarawneh har undersøgt hvordan forskellige faktorer påvirker anvendelsen af det ekstraspor. Det kunne ud fra undersøgelsen konkluderes at længere frafartsstrækninger, mindre højre svingende trafik og stigende forsinkelser, alle er faktorer der øger anvendelsesgraden. [Tarawneh, 2000] Hurley havde en lidt anderledes tilgang til at estimere anvendelsesgraden af de ekstra spor, ved at opfatte brugerne som to grupper. Der var de trafikanter der var tvunget til at anvende sporet og så var der dem der havde et valg. Hurley anvender regressionsanalyse til at udvikle modeller der kunne estimere fordelingen af køretøjer der ikke er tvunget til at anvende sporet, mellem de to vognbaner. Hurley kunne konkludere at brugen af det ekstraspor er påvirket af trafikmængden, højresvingende trafik og længden af frafartsspor. [Hurley, 1996] Lee et al. har foretaget en omfattende undersøgelse af 94 kryds med sporbortfald i North Carolina i 2005. Formålet med undersøgelsen var at udvikle modeller til forudsigelse af vognbaneudnyttelsen for sporbortfald ved seks forskellige krydstyper. Derudover blev det vurderet hvordan sporbortfald påvirkede sikkerheden i nærheden af krydset. Undersøgelsen viste at frafartsstrækningen sammen med trafikintensiteten, korrelere positivt med vognbaneudnyttelses-faktoren. [Lee et al., 2005]

Nevers et al. har indhentet data fra 22 kryds i USA med to tilfarts- og frafartsspor, hvor det ene frafartsspor bortfalder umiddelbart efter krydset, for at kunne analysere forholdet mellem trafikken, sikkerheden og udformingen i den type kryds. Resultaterne fra undersøgelsen viste at 24 procent af trafikken i spidsperioden, benyttede det ekstra spor i krydset. På trods af den lave anvendelsesgrad, udgjorde det ekstra tilfartsspor signifikante fordele i form af nedsat ventetid i krydset. Resultaterne viste at den gennemsnitlige ventetid i krydset kunne reduceres med op til 100 sekunder per køretøj, sammelignet med kryds hvor der ikke er to tilfarter.

Uanset den forudsagte anvendelsesgrad af det ekstra spor, vil bilisterne generelt søge den vognbane der vil minimere deres egen kø-position når det er muligt. Den øvre grænse for den typiske gennemstrømning af køretøjer er bedst repræsenteret ved vognbanens kapacitet. Det kan antages at gennemkørende trafik ved ankomst til krydset vil fordeles på en måde, der udligner vognbanernes gennemstrømningshastighed,

Tilfartssporet skal have en længde der kan håndtere den maksimale forventede kølængde (95% fraktilen) i det ekstra spor. Ideelt set bør det være længere end den forventede kølængde i det gennemgående spor, for at sikre at bilisterne har adgang til vognbanen under hele omløbet. Resultaterne fra undersøgelsen indikere at længden af frafartssporet ikke har indflydelse på bilisternes valg i brugen af sporet. Fra et designperspektiv bør længden af frafartssporet være langt nok til at sikre at bilisterne kan accelerer op til en sikker flettehastighed. Andre faktorer der kan påvirke brugen af det ekstra spor, er den skilte hastighed. Jo højere den skilte hastighed er i krydset, jo større bliver hastighedsforskellen mellem køretøjerne i det gennemgående spor og gør det nemmere for bilisterne i det ekstra spor at flette ind. Dette kan medføre at der er flere der benytter det ekstraspør, men kræver ligeledes en større længde for en sikker sammenfletning. Derudover kan oversigtsforholdene i krydset have en indflydelse på brugen af det ekstra spor, da bilister er mere tilbøjelige til at vælge det ekstra spor når flettestrækningen er synlig. [Nevers et al., 2011] "Undersøgelser påpeger at bilisterne undlader at anvende vognbanen der bortfalder efter krydset, da flettemanøvren kan opleves som stressende, hvilket medfører at den estimerede anvendelse af vognbanen oftest overestimeret.

Chamberlin et al. har opstillet en regressionsmodel til estimering af anvendelsesgraden af sporet der bortfalder efter krydset, på baggrund af 25 kryds i Utah. Regressionsmodellen er baseret på fire variabler: Længden af vognbane der bortfalder, trafikken i krydset, tilstedeværelsen af sperate svingbaner og hastighedsgrænsen. Resultaterne fra regressionsmodellen tyder på at der er en sammenhæng mellem vognbanebenyttelsen, trafikintensiteten, geometrien og hastighedsgrænsen. Ved højere trafikintensiteter, tilstedeværelsen af en kombineret svingbane/ligeud og højere hastighedsgrænser, mindsker anvendelsen af vognbanen der bortfalder efter krydset, hvor længere frafarter har en tendens til at øge anvendelsesgraden. Det anbefales at modellen benyttes i kryds med frafartsbaner der er mindre end 120 meter og med en trafikintensitet på mindre end 1000 køretøjer i timen, hvilket skyldes datagrundlaget der er anvendt til estimeringen af regressionsmodellen. [Chamberlin et al., 2022]

4.3 Estimeret minimumslængde af frafartsstrækninger

I 1967 studerede Leisch vejkyds med "udvidede tilgange" og foreslog et sæt af krav til sporbortfald. Der blev foreslået to værdier for minimumslængden for det korte spor, hvilket kan aflæses i tabel 4.1 [Leisch, 1967]

Tabel 4.1: Minumslængde af frafartssporet efter signalregulerede kryds med sporbortfald. [Leisch, 1967]

Acceleration		Sammenfletning	Kilestrækning
Hastighed	Frafartslængde		
40 mph	200 feet	12*G	200 feet
50 mph	525 feet		250 feet
60 mph	900 feet		300 feet

Tabel 4.1 angiver to værdier for frafartsbanen, en fast værdi baseret på hastighedsgrænsen i krydset og en anden værdi der er baseret på grøntiden i krydset. Det anbefales at vælge den største værdi af disse, dog ikke mindre end 200 feet. [Leisch, 1967]

Guel og Asce mener ikke at en frafartslængde der baseret på acceleration som i tabel 4.1 er hensigtsmæssig. Princippet bag en længde der er baseret på acceleration, er at udforme en tilpas længde hvor køretøjer kan accelerere og flette sammen med en trafikstrøm, som færdes med en konstant hastighed. I signalregulerede kryds med to eller flere spor accelerer trafikken samtidig, hvor trafikken i vognbanen der bortfalder prøver at flette med trafikstrømmen i det gennemgående spor. Det er ikke de samme betingelser der gør sig gældende ved en strækning der er baseret på acceleration og frafarter i kryds. [Guell og Asce, 1983]

McCoy og Tobin, der kunne konkludere at længden af frafarten har indflydelse på udnyttelsesgraden af vognbanen, mener ligeledes at de anbefalede frafartslængder i tabel 4.1 er for korte til at opnå en ligelig fordeling mellem vognbanerne. [Mccoy og Tobin, 1982]

Guel og Asce basere estimeringen af frafartslængden på baggrund af en række antagelser:

- Alle køretøjer har det samme forhold mellem acceleration og tid
- Alle køretøjer starter fra en stopposition
- Faste følgetider
- Alle køretøjer accelerer til samme hastighed og fastholder den

Når disse antagelser er opfyldt, vil to på hinanden følgende køretøjer være adskilt med en afstand, der kan udtrykkes ud fra følgende formel: [Guell og Asce, 1983]

$$S = v_f * t_d + d \quad (4.2)$$

Hvor:

- V_f , er hastighedsgrænsen på strækningen
- t_d , er følgetiden
- d , er afstanden til forankørende køretøj

Guel og Asce anvender en teoretisk tilgang til estimeringen af en minimumslængde af frafartssporet og der er derfor ingen data der kan støtte op om resultatet. Ud fra forud defineret faktorer såsom følgetider, kø afstande mellem køretøjerne, acceleration og grøntider er det muligt at estimere en minimumslængden ud fra formel 4.2. Ud fra et eksempel anbefales en samlet længde på 683 meter af tilfarts- og frafartsbanen, men det skal bemærkes at denne afstand afhænger af de værdier der anvendes. En kortere vognbane ville resultere i at køretøjerne accelerere med en lavere hastighed end dem i den primære vognbane og vil derfor reducere kapaciteten af den vognbane der bortfalder efter krydset.

Buckley og Riegner kan ligeledes konkludere at minimumslængden af frafartsspor i signalregulerede kryds afhænger af sporets kapacitet, trafikintensiteten og grøntiden. Som et tillæg til dette undersøges ligeledes omløbstiden i krydset, for at sikre at trafikken ikke tilbageslås og blokere for andre trafikstrømme. Metoden tager udgangspunkt i forholdet mellem simple trafikparametre såsom trafikmængde, hastighed og kapacitet. [Buckley og Riegner, 2006]

Teknikker præsenteret af Daganzo giver en fundamental forståelse af hvordan trafik-flowet påvirkes i kryds med sporbortfald. Ved at anvende tid/sted diagrammer og en simplificeret tilgang til at beskrive trafikflowet, har Daganzo studeret ændringer i trafikflowet ved kryds med sporbortfald. Et tid/sted diagram giver en visuel præsentation af hvordan sporbortfald

påvirker trafikafviklingen og hastigheden hvorved trafikken tilbagestaves i frafarten. [Daganzo, 1997]

Ved at studere grøntid- og rødtidsintervaller er det tydeligt at trafikflowet i frafarten påvirkes af signalanlægget. I begyndelsen af grøntidsfasen øges trafikintensiteten i frafarten, som ved sammenfletningen vil resultere i en chokbølge, der starter lige efter første køretøj har passeret kilstrækningen. Dette sker som et resultat af at trafikintensiteten ved kilstrækningen øges, samtidig med at kapaciteten reduceres. I slutningen grøntiden reduceres trafikflowet til nul og chokbølgen reduceres i takt med det sidste køretøj afvikles. Den nødvendige længde af frafarten er direkte relateret til den bagudvoksende chokbølge. Hvis længden af frafarten er for kort vil trafikken tilbagestaves, hvilket kan resultere i at efterfølgende køretøjer ikke kan tilgå frafarten eller blokere for den øvrige trafik i krydset. Minimumslængden for frafarten, er lig med den kø der genereres i frafartsbanen, som følge af sporbortfaldet. Følgende formel til estimeringen af minimumslængden er udledt fra studiet: [Buckley og Riegner, 2006]

$$L_{min} = \frac{G_{max}}{\frac{1}{S_0} + \frac{1}{U_b}} \quad (4.3)$$

Hvor:

- G_{max} , er den maksimale grøntid
- S_0 , er hastigheden ved kapacitetsgrænsen
- U_b , er den hastighed shockbølgen vokser med, hvilket kan udeledes fra flow/density diagrammet:

$$U_b = \frac{V_{m2}}{(D_{j2} - \frac{V_{m2}}{S_0})} \quad (4.4)$$

Hvor:

- V_{m2} , er kapaciteten for 2-sporet vognbanesegment
- D_{j2} , er jam-density for den 2-sporet strækning (ekstrem trafiktæthed, når trafikstrømmen stopper fuldstændigt, normalt i intervallet 185-250 køretøjer pr. mile pr. vognbane.)"

I perioder med høje trafikintensiteter og ved at anvende værdier fra "High Capacity Manual"[TRB, 2000] fra år 2000, kan formelen for minimumslængden reduceres.

$$L_{min} = 14 * G_{max} \quad (4.5)$$

Formel 4.5 minder om den formel Leisch præsenterede i tabel 4.1. Det skal dog bemærkes at minimumslængden baseret på formel 4.5 er gældende fra frafartens begyndelse og slutter ved begyndelsen af kilestrækningen og minimumslængden baseret på tabel 4.1 er gældende fra stoplinjen, hvilket betyder at bredden er krydset er inkluderet i Leichs anbefaling.

I forbindelse med at estimere en minimumslængde af frafarten, er det en nødvendighed samtidigt at undersøge længden af omløbstiden, således at der ikke afvikles flere køretøjer end strækningen kan håndtere. Omløbstiden skal være lang nok til at alle køretøjer der ankommer til krydset i grøntiden, kan afvikles inden næste grøntidsfase starter.

Udover minimumslængden bør der ligeledes overvejes en maksimal længde af sporet, da det ellers kan opfattes at sporet forsætter efter krydset og en sammenfletning kan forekomme uventet for bilisten. Ud fra foretaget studier, kan det fastsættes at en længde svarende til 400-800 meter er en passende maksimal længde, men det afhænger alt sammen af hastighed, sigtlinjer, udkørsler og aktivitet fra sidevejene. Metoden der beskrives estimerer en minimumslængde, således at bilisterne i det ekstra spor har mulighed for at opnå den skilte hastighed fra stoppositionen og at der skabes tilpas afstande i trafikstrømmen i det gennemgående spor, således at der kan foretages en sikker flettemanøvre.

Tilfartsspore skal have en længde der kan håndtere den kø der dannes i hvert omløb, således at det ekstra spor i krydset ikke blokeres og derfor ikke kan benyttes. Frafarten bør have en længde der gør det muligt for bilister der holder ved stopstregen at opnå den ønskede hastighed før kilstrækningen. Derudover skal længden af frafartssporet frembringe at der forekommer en tilpas afstand mellem køretøjerne, således at det er muligt for trafikanterne at flette ind på den vognbane der forsætter efter krydset på en sikker måde, før kilestrækningen begynder. Derudover kan supplerende skilte tydeliggøre overfor bilisterne, at den ekstra bane er for den ligudkørende trafik og ikke som en kombineret ligeud- og højresvingbane. Pileafmærkning på kørebanes frafart kan være med til at indikere overfor bilisten at vognbanen fletter sammen længere henne og at et vognbaneskit vil være godt at foretage inden kilestrækningen. [Nevers et al., 2011]

Venstresvingende trafik

Shen beskriver en metode til at estimere minimumslængden af frafartsbanen, med udgangspunkt i venstresvingende trafik i et T-kryds. Metoden gør sig gældende i kryds med tre venstresvingsspor, hvor det ene spor bortfalder efter krydset. Metoden består af fem trin: [Shen, 2001]

1. Udvalgte et passende mål for effektiviteten af trafikafviklingen i krydsets frafartsspor
2. Identificere uafhængige variabler, der forventes at påvirke trafikafviklingen i krydsets frafartsspor
3. Udvikle en simulationsmodel der kan evaluere de uafhængige variabelers indflydelse på trafikafviklingen
4. Udarbejde en matematisk udtryk der kan beskrive forholdet mellem trafikafviklingen og de uafhængige variabler
5. Bestemme minimumslængderne af frafartssporet på baggrund af trafikforholdene og signalplanen.

Shen anvender bilisternes forsinkelse til at beskrive effektiviteten af trafikafviklingen i krydsets frafartsspor, hvor der anvendes uafhængige variabler der forventes at have indflydelse på bilisternes forsinkelse i krydset. Længden af frafartssporet anvendes som en af de uafhængige variabler, da det forventes at et længere frafartsspor, vil blandt bilisterne opfattes som en reduktion af den oplevede rejsetid. Derudover forventes det at faktorer såsom grøntiden, andelen af tung trafik og hastighedsgrænsen på strækningen vil have en indflydelse på trafikafviklingen efter krydset. Længden af grøntiden påvirker antallet af køretøjer der kan afvikles under hvert omløb og derfor også trafikafviklingen efter krydset. Når grøntiden øges, vil det ligeledes være nødvendigt at øge frafartsstrækningens kapacitet, så den håndterer den trafik der afvikles fra signalet. Tunge køretøjer påvirker rejsetiden i kryds, grundet de lavere accelerationsværdier og

den øget køretøjslængde. De lavere accelerationsværdier medføre ligeledes at tunge køretøjer har sværere ved at opnå højere hastighedsgrænser og skaber derfor forsinkelse til de øvrige køretøjer i krydset. Det har på det pågældende tidspunkt ikke været muligt at indsamle data fra virkelige kryds, da kryds med tre venstresvingsspor og efterfølgende sporreduktion ikke fandtes på det tidspunkt publikationen blev udarbejdet. Derfor er der udviklet en simulationsmodel i programmet CORSIM, som kan simulere forskellige situationer og vise hvordan de uafhængige variabler påvirker trafikafviklingen. Resultaterne fra simuleringerne er udtrykt ved et kurvediagram med den gennemsnitlige forsinkelse op ad y-aksen og længden af frafartssporet ud af x-aksen. Der er optegnet kurver fra forskellige procentandele af tungtrafik, der viser hvordan middelforsinkelsen påvirkes ved forskellige frafartslængder ud fra standard betingelserne: 10 sekunder grøntid og hastighedsgrænse på 45 miles/time. [Shen, 2001]

Det kan ud fra simuleringerne observeres at forsinkelsen blandt køretøjerne i frafartssporet reduceres i forbindelse med at det øges. Det kan ligeledes observeres at efter en given længde vil det ikke længere have statistisk signifikant effekt på at reducere den gennemsnitlige forsinkelse. Det anbefales at minimumslængden skal være det punkt hvor der ikke længere kan opnås en statistisk signifikant effekt på forsinkelsen. Det kan ligeledes observeres at der er en lineær sammenhæng mellem minimumslængderne og grøntiden. De endelige minimumslængder er blevet bestemt ud fra disse linjer og er opstillet som en opslagstabel, hvor der er forskellige minimumslængder afhængige af grøntiden, hastigheden og andelen af tung trafik. De anbefalede minimumslængder kan aflæses i tabel 4.2 [Shen, 2001]

Tabel 4.2: Minimumslængder af frafartsstrækninger baseret på venstresvingende trafik.4.2 [Shen, 2001]

Grøntid (Sekunder)	Procentandel tung trafik						
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Hastighedsgrænse=35 mph							
10	200	212	223	233	242	249	255
20	214	231	246	260	273	284	294
30	228	249	268	286	303	319	333
40	242	268	291	313	334	354	372
50	256	287	314	340	365	388	411
60	270	305	336	366	395	423	450
Hastighedsgrænse=45 mph							
10	200	215	229	242	254	265	275
20	214	236	256	274	291	305	318
30	228	257	283	306	327	345	362
40	242	278	310	338	364	386	404
50	256	299	337	370	400	426	447
60	270	320	364	403	437	466	490
Hastighedsgrænse=55 mph							
10	205	220	234	247	259	270	280
20	220	243	264	282	299	314	328
30	235	267	294	318	338	358	376
40	250	290	323	350	378	402	424
50	266	313	353	388	418	446	472
60	280	335	382	422	457	490	520

4.4 2-sporede frafarter i Danmark

Poul Greibe og Belinda la Cour Lund har undersøgt hvilken betydning længden af frafarten har for trafikafviklingen i signalregulerede kryds med efterfølgende sporbortfald. Det er samtidig disse undersøgelser der danner grundlag for de anbefalinger der er angivet i vejreglhæftet 'Kapacitet og serviceniveau' [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]. I undersøgelsen indgår syv signalregulerede kryds, som er udvalgt ud fra følgende kriterier:

- Der skal være to gennemgående spor med spor bortfald efter krydset.
- Passende trafikmængder
- Krydsets placering skal enten være i åbent land eller i udkanten af et byområde
- Helst ingen eller begrænset med udkørsler på frafartsstrækningen
- Variende længde af det 2-sporet frafartsspor
- Variende længde af kilestrækningen
- Variation i hvilket spor der bortfalder efter krydset (Venstre, højre eller midtfor)

- Passande afstand fra tilstødende kryds, således at en tilbagestuvning fra andre kryds kan udelukkes.

Der er i forbindelse med databehandlingen registreret kølængder for hvert signalomløb, som defineres ud fra følgende:

1. Mindst to trafikanter fra den gennemgående trafik skal have holdt stille for rødt, inden de køre ind i krydset.
2. Alle gennemgående trafikanter der har holdt for rødt indgår som en del af køen
3. Hvis et køretøj ikke har holdt for rødt anses det som værende en del af køen, hvis det overhaler et køretøj der er en del af køen eller hvis trafikanten ankommer til enden af kilestrækningen mindre end 2 sekunder efter den forankørende trafikant
4. Afviklingen af køen starter i det tidspunkt hvor hovedsignalet for den gennemgående trafik skifter til grønt
5. Køen anses som værende afsluttet når bagenden af det sidste køretøj passere afslutningen af kilestrækningen

Køretøjerne angives i personbilenheder, da der der færdes forskellige typer og størrelser af køretøjer i krydsene. Til omregning af køretøjer til personbilenheder anvendes de anbefalede persobilsækvivalenter der er opgivet i vejreglhæftet 'Kapacitet og serviceniveau' [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]

Ud fra det indsamlede data er det undersøgt om der en sammenhæng mellem trafikafviklingen i krydset og længden af frafartssporet. Disse faktorer er blevet vurderet i forbindelse med undersøgelsen:

1. Valget af spor. Det forventes at andelen af tung trafik, trafikanter i kø, længden af frafarten samt udformningen af kilestrækningen vil have en indflydelse på valget af sporbenyttelse.
2. Tidsafstanden mellem køretøjerne
3. Hvornår på frafartsstrækningen trafikanter vælger at foretage flettemanøvren
4. Tiden det tager at afvikle en kø set i forhold til antallet af køretøjer der holder i kø, andelen af tung trafik, samt længden af frafartsstrækningen og kilestrækningen

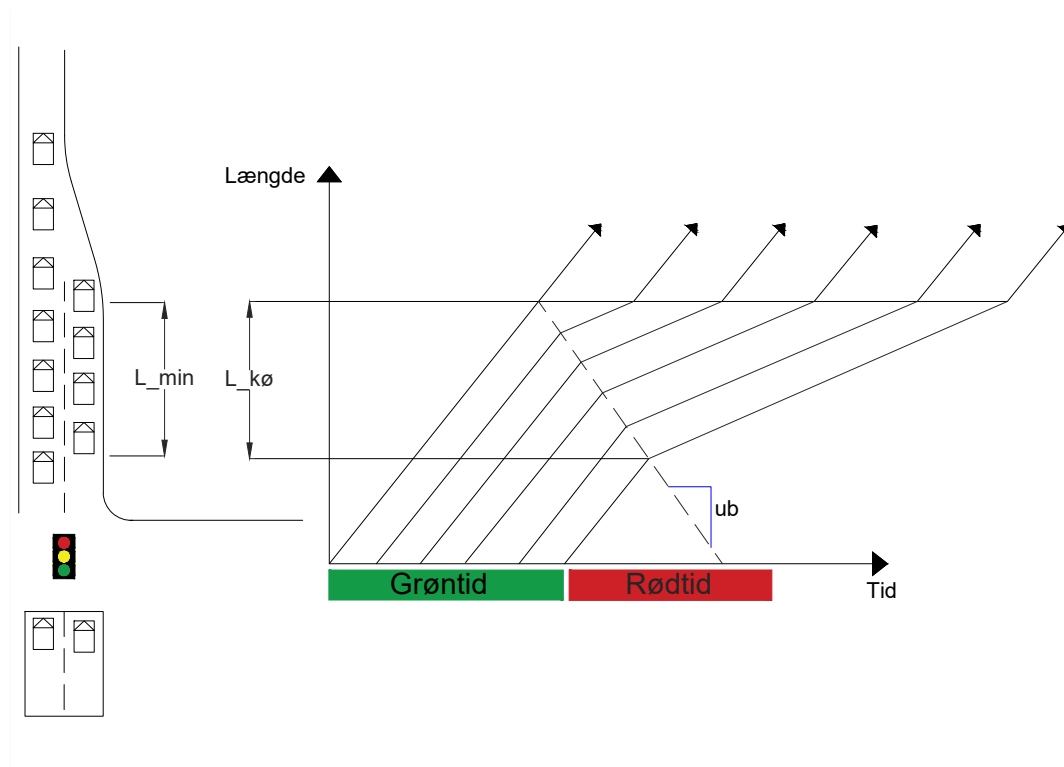
Resultaterne fra undersøgelsen tyder på at der ikke er nogen sammenhæng mellem længden af frafartssporet og hvor trafikanterne fletter ind på det spor der forsætter. Tilgængæld tyder resultaterne på at antallet af trafikanter der vælger at benytte det venstrespor stiger, når ét eller flere tunge køretøjer holder i kø. Antallet af personbilenheder bliver mere ligelig fordelt i takt med at trafikken stiger i krydset. I forbindelse med analyseringen af tidsafstandene mellem køretøjer betragtes begge spor som én trafikstrøm. Det er tydeligt at jo flere køretøjer der holder i kø, jo kortere bliver tidsafstanden mellem køretøjerne. Ligeledes vurderes det at længden på frafartsstrækningen har en betydning for tidsafstanden mellem køretøjerne, specielt ved trafikmængder hvor der er over 15 køretøjer i kø pr. omløb. Her er det tydeligt at det er krydsene med de korteste strækningslængder, der har den mindste tidsafstand mellem køretøjerne. Hastighedsforskellen mellem det første køretøj og det sidste køretøj i hvert omløb betragtes, da dette kan være et udtryk for hvor god trafikafviklingen er i krydset. Det første køretøj i hvert omløb kan accelererer forholdsvis uhindret i frafartssporene, da det ikke påvirkes af andre trafikanter i frafartsstrækningen. Det sidste køretøj i hvert omløb vil derimod i højere grad være påvirket af trafikafviklingen i frafarten og netop derfor kan hastighedsforskellen

mellem disse trafikanter være et godt udtryk for trafikafviklingen i frafarten. Hvis der er en stor forskel på de to trafikanter, er det et udtryk for en ringe trafikafvikling i frafarten. Ud fra resultaterne kan de ses at hastigheden for det bagerste køretøj i højere grad er påvirket af trafikmængden og hastigheden er faldende ved stigende trafikmængder i opstartskøen. Ved lave trafikmængder er der en hastighedsforskel på 5-15 km/t og ved høje trafikmængder er der en hastighedsforskel på 15-35 km/t.

Der er undersøgt to forskellige metoder for at komme med nogle anbefalinger til minimumslængden af den 2-sporede strækning efter krydset. I metode 1 betragtes trafikflowet ved stopstregen og sammenholder dette med trafikflowet ved afslutningen af kilestrækningen.

Der er observeret et gennemsnitligt trafikflow gældende for begge spor, over stopstregen på cirka 1,2 personbilenheder/sekund. Derudover er der observeret et gennemsnitligt trafikflow ved kilestrækningens afslutning på 0,8 personbilenheder/sekund. Dette betyder at der vil ske en ophobning af trafikken på strækningen på 0,4 personbilenheder/sekund, som skal afvikles i den efterfølgende grøntid, således at det første køretøj i næste omløb kan passere uhindret. Hvis man sammenholder trafikflowet med accelerationsværdier ved opstart fra grøn, kan man beregne trafikafviklingen i kryds med 2 frafartsspor, der efterfølgende reduceres til et spor. Følsomheden af beregningsmetoden er undersøgt ved at benytte minimums- og maksimumsværdierne for de observerede trafikflow, som viste at længden af frafartssporet er afhængig af hvilke værdier der anvendes. Der tages udgangspunkt i det værste scenarie og derfor anvendes den maksimale observeret trafikflow ved stopstregen på 1,39 pe/sek og minimumsværdien ved kilestrækningens afslutning på 0,7 pe/sek.

Metode 2 er en mere teoretisk tilgang til beregningen af minimumslængden af 2-sporede frafarter og bestemmes ud fra en simpel betragtning, med udgangspunkt i hastighed-flow-tætheds sammenhænge, grøntider, strækningens kapacitet og hastighed ved kapacitetsgrænsen. I beregningerne antages det at strækningen kun lige er lang nok til at håndtere de køretøjer der afvikles under grøntiden. Dette betyder at de sidste køretøjer der passere stopstegen i grøntiden vil ankomme til bagenden af køen, som er forårsaget af sporbortfaldet. Et eksempel på tid og sted diagram er illustreret på figur 4.1



Figur 4.1: Tid og sted diagram.

På figur 4.1 kan hældningen fra køens tilbagestuvning aflæses ud fra faktoren 'ub' og det er derfor muligt at bestemme hvornår kapaciteten i frafarten er opbrugt. Her antages det at køen starter i overgangen fra 2-spor til kilestrækningen. Denne metode giver kortere strækningslængder ved lave grøntider, hvor der ved større grøntider er større strækningslængder, når der sammenlignes med metode 1. Baseret på resultaterne fra begge metoder anbefales de minimumslængder der fremgår af Vejreglerne. Hvis det ønskes at forbedre fremkommeligheden og serviceniveauet efter krydset anbefales det at øge længden af strækningen. Resultaterne er baseret på at kilestrækningen er udført over en passende længde svarende til 100-150 meter. [Greibe og Lund, 2018]

Poul Greibe og Belinda la Cour Lund har i en anden undersøgelse udarbejdet en hastighedsreduktionsfaktor, som kan anvendes til at foretage en skønsmæssig vurdering af trafikafviklingen i signalregulerede kryds med efterfølgende sporbortfald. Ved at foretage lineære regressionsanalyser på hastighedsforskellen mellem det første og sidste køretøj, er det undersøgt om der er en sammenhæng mellem hastigheden i frafarten og trafikmængden, samt afstanden til kilestrækningens afslutning.

Hastighedsforskellen mellem det første og sidste køretøj under hvert omløb, kan udtrykkes ved en hastighedsreduktionsfaktor. En faktor på 0,75 betyder at det sidste køretøj har en hastighed svarende til $0,75 \times$ hastigheden af det første køretøj. En høj reduktionsfaktor er et udtryk for at hastigheden for det sidste køretøj i høre grad er påvirket som følge af trafikmængden, geometrien og sporreduktionen. Ud fra dataanalysen er der udarbejdet følgende udtryk for beregningen af en hastighedsreduktionsfaktor ($R^2=0,28$; ikke særlig god):

$$H_{faktor} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Dist_D \cdot N + 1,35 \cdot 10^{-4} \cdot Dist_D - 0,017 \cdot N \quad (4.6)$$

Hvor:

- $Dist_D$, er afstanden fra stoplinjen til enden af kilestrækningen
- N , er trafikmængden i køen ved fasens opstart.

Modellen for beregningen af hastighedsreduktionsfaktoren kan anvendes til at foretage en skønsmæssig vurdering trafikafviklingen i frafarten afhængig af krydsets geometri og trafikmængde. Andre faktorer som også kan have en indflydelse på hastigheden i frafarten kunne for eksempel være: andelen af tung trafik, udformning af sporreduktionen, skiltning, kilestrækningens længde i forhold til frafartens længden, hastighedsgrænsen og bredden af sporret efter sporbortfaldet. Disse faktorer er ikke undersøgt nærmere i denne undersøgelse, da der ikke har været tilstrækkeligt materiale til at kunne konkludere noget. [Lund og Greibe, 2017]

5 | Resultater

I dette kapitel vil data fra de fem udvalgte kryds blive analyseret og vurderet, med det formål at kunne opstille en model der beskriver sammenhængen mellem længden af frafarten og en eller flere uafhængige variabler. Undervejs i kapitlet vil der blive gjort rede for mængden af kø-situationer der er observeret under registreringen af data og som danner grundlaget for modellens opbygning. Derudover analyseres følgetider, anvendelsesgraden af sporet der bortfalder efter krydset, tidsafstande mellem køretøjerne i flere målesnit, hastigheds-flow, trafik-flow.

5.1 Empirisk data

Optagelserne fra de fem udvalgte kryds er blevet bearbejdet og antallet af registrerede kø-situationer kan aflæses i tabel 5.1.

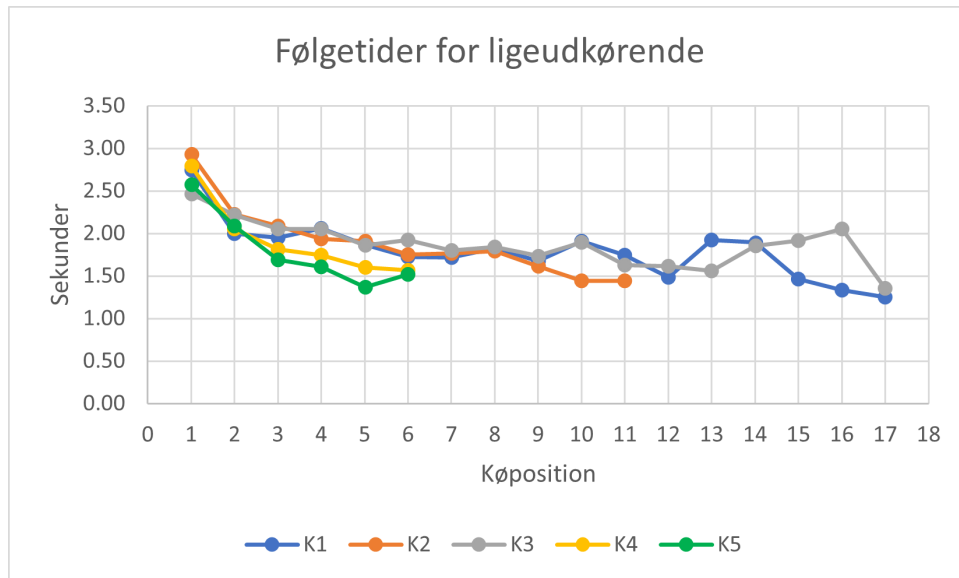
Tabel 5.1: Datagrundlag for registrerede køssituationer fra de udvalgte kryds, herunder andelen af tung trafik samt det gennemsnitlige antal personbilenheder ved hver køsituation.

Kryds nr.	Observeret af kø	Observeret kø UDEN tung trafik	Observeret kø MED trafik	Andel tung trafik	Gennemsnitlig pe i kø	Grøn tid (sek.)
K1	25	21	4	1%	18,30	40
K2	35	30	5	1%	16,11	21
K3	25	17	8	1%	22,27	46
K4	22	16	6	4%	6,53	47
K5	25	20	5	3%	7,18	32

Det fremgår af tabel 6.1 at der er registreret forholdsvis lave andele af tung trafik ved hvert kryds. Dette kan være udfordring i forbindelse med at vurdere hvordan tung trafik påvirker fordelingen mellem vognbanerne. Generelt er der ved flere af krydsene registreret lave værdier i antal personbilenheder i kø. Dette kan ligeledes være en udfordring i forbindelse med at opstille en model til at beskrive længden af frafarten, da kø-situationer med en høj andel af trafik er underrepræsenteret i datagrundlaget.

5.2 Følgetider

Der er som en del af dataanalysen registreret følgetider i hvert af de fem kryds. På figur 5.1 er middelfølgetiden illustreret som en funktion af kø-positionen. Antallet af køretøjer der er registreret i en kø-situation varierer fra kryds til kryds, hvor der er registreret flest køretøjer i kø ved krydset K1 og K3 og færrest i K5.



Figur 5.1: Middelfølgetider for ligeudkørende i hvert kryds

Det fremgår af figur 5.1 at middelfølgetiden er størst for køretøjer i kø-position til og med fire, hvorefter følgetiden forbliver på et mere konstant niveau indtil kø-position ni. Efter kø-position ni opstår der igen en større variation mellem de registrerede følgetider, hvilket kan skyldes datagrundlaget bliver mindre i takt med kø-positionen øges.

Middelfølgetiden for trafikanter i første kø-position er størst, hvilket skyldes at trafikanten både skal være opmærksom på når signalet skifter til grønt og samtidig nå at reagere ved at slippe bremsen og accelerere gennem krydset, hvilket betyder at følgetiden bliver længere end for de efterfølgende trafikanter. Dette samme princip gør sig gældende for køretøjer i anden kø-position, dog med den forskel at bilistens reaktions- og accelerationstid starter når bilisten i første kø-position begynder at køre. Køretøjer i anden kø-position vil passere stopstregen med en højere hastighed, da accelerationsstrækningen er længere. Dette betyder at følgetiden for den anden trafikanter ofte vil være lavere end den er for den første bilist. Køretøjer i tredje og fjerde kø-position følger en ligende proces, dog ankommer de en smule hurtigere til stopstregen end de første køretøjer. Derefter vil effekten for opstartstid og acceleration aftage og de efterfølgende køretøjer har en mere ens følgetid indtil køen afsluttes. Denne proces startes forfra hver gang en kø afbrydes. [Lund et al., 2013]

I tabel 5.2 kan middelfølgetiderne for de enkelte kryds aflæses opdelt efter kø-position. Der er registreret i alt 1868 køretøjer fordelt på de fem kryds.

Tabel 5.2: Middelfølgetider gældende for ligeudkørende opdelt på køposition

Ligeud Køposition	Middelfølgetid i sekunder					
	K1	K2	K3	K4	K5	Alle kryds
1	2,75	2,93	2,46	2,79	2,57	2,70
2	2,00	2,23	2,22	2,05	2,09	2,12
3	1,95	2,08	2,05	1,81	1,69	1,92
4	2,06	1,94	2,05	1,75	1,61	1,88
5	1,87	1,91	1,86	1,60	1,37	1,72
6	1,72	1,75	1,92	1,57	1,52	1,70
7	1,71	1,77	1,80	-	-	1,76
8	1,83	1,79	1,84	-	-	1,82
9	1,68	1,61	1,73	-	-	1,67
10	1,91	1,44	1,89	-	-	1,75
11	1,75	1,45	1,63	-	-	1,61
12	1,48	-	1,62	-	-	
13	1,92	-	1,56	-	-	
14	1,89	-	1,85	-	-	
15	1,46	-	1,92	-	-	
16	1,34	-	2,05	-	-	
17	1,25	-	1,35	-	-	
Antal ob- servationer	455	544	554	139	176	1868

I tabel 5.2 er der beregnet en gennemsnitlig følgetid for alle krydsene til og med kø-position 11, hvilket skyldes at datagrundlaget herefter er baseret på mindre end 40 observationer. Der er udført beskrivende statistik på de registrerede 1868 køretøjer, med henblik på at kunne bestemme en samlet middelfølgetid for ligeudkørende. Den beskrivende statistik fremgår af tabel 5.3.

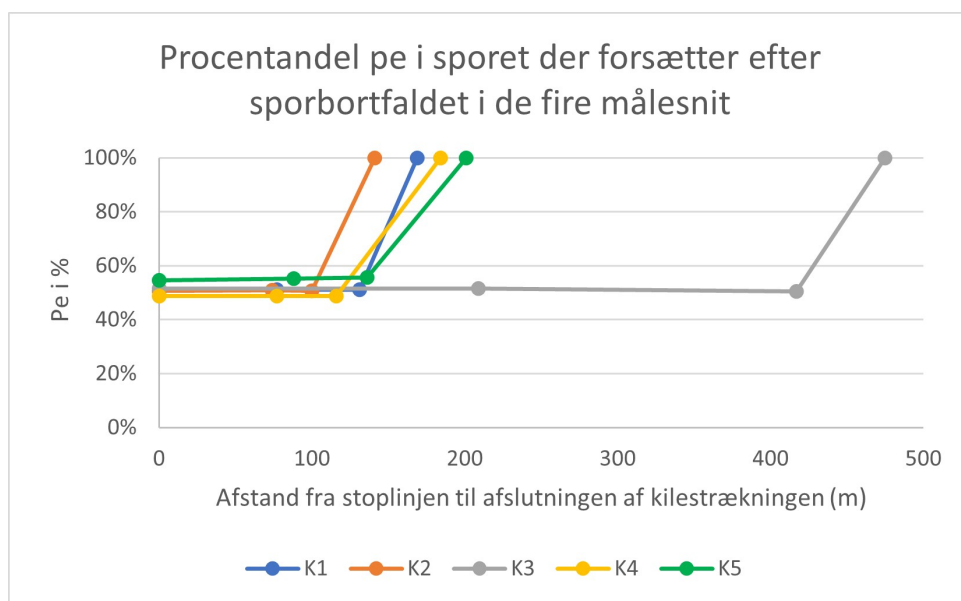
Tabel 5.3: Beskrivende statistik for de registrerede følgetider for ligeudkørende.

Følgetid for ligeudkørende	
Gennemsnit	1,82
Median	1,84
Standardafvigelse	0,87
Stikprøvevarians	0,76
Minimum	0,75
Maksimum	9,34
Antal	1868
Konfidensinterval (95%)	0,04

Det fremgår af tabel 5.3 at gennemsnitlige middelfølgetid baseret på datagrundlaget er beregnet til 1,82 sekunder. Derudover er medianen beregnet til 1,84 sekunder, som er den værdi hvor halvdelen af de registrerede tider ligger henholdsvis over og under. Det at medianen er en smule større end gennemsnittet betyder at data er en smule venstreskæv, hvilket er årsagen til at gennemsnittet bliver trukket en smule ned. Det kan med 95% sandsynlighed konkluderes at middelfølgetiden for ligeudkørende, er inden for intervallet 1,78-1,86 sekunder.

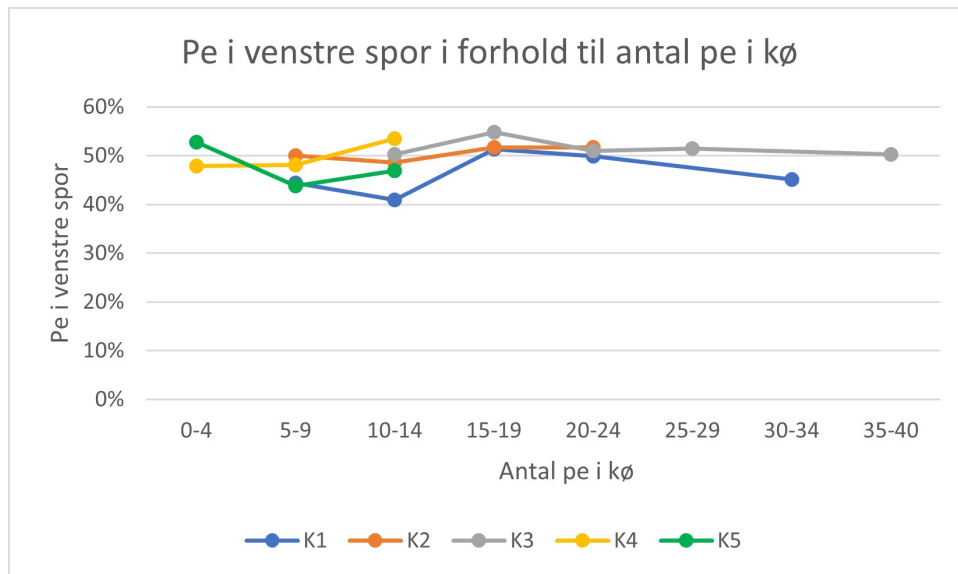
5.3 Sammenhæng mellem sporbenyttelsen og trafikken

På figur 5.2 kan det aflæses hvordan personbilenhederne fordeles i henholdsvis målesnit A, B, C og D. Når trafikanterne passere målesnit D, svarende til afslutningen af kilestrækningen, er alle trafikanterne flettet ind til sporet der forsætter efter krydset.



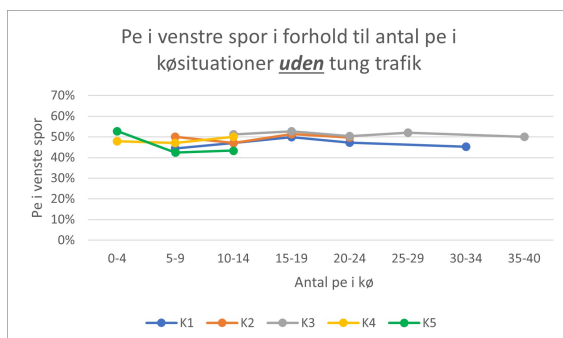
Figur 5.2: Sporbenyttelse i vognbanen der forsætter efter sporbortfaldet i frafarten.

Det fremgår af figur 5.2 at langt største delen af trafikanterne foretager flettemanøvren i målesnit C, hvilket betyder at der tilsyneladende ikke er nogen sammenhæng mellem frafartens længde og hvor trafikanterne foretager flettemanøvren. Det undersøges om der er en sammenhæng mellem antallet af personbilenheder der holder i kø og fordelingen mellem højre og venstre vognbane i krydsets tilfart. På figur 5.3 er fordelingen af personbilenheder i venstrespor illustreret, som en funktion af antallet af personbilenheder i kø.

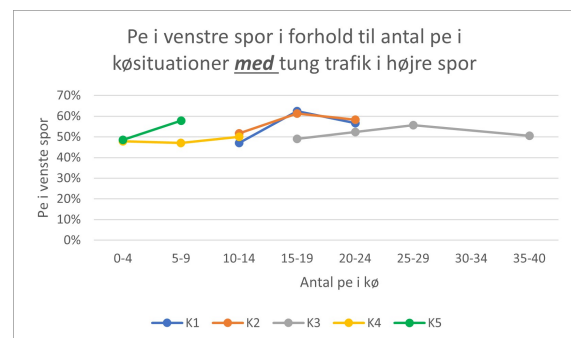


Figur 5.3: Sporbenyttelsen af det venstre spor i målesnit A, baseret på antal personbilenheder i køen.

Figur 5.3 viser at der er en tendens til at fordelingen af personbilenheder mellem vognbanerne i målesnit A opnår en mere ligelig fordeling i takt med at trafikken i tilfarten stiger. Datagrundlaget gør det besværligt at konkludere noget konkret om fordelingen af personbilenheder mellem vognbanerne, da ingen af krydsene er repræsenteret ved alle kø-situationer. Det er ligeledes undersøgt hvordan tung trafik i højrevognbane påvirker anvendelsesgraden af venstrevognbane. På figur 5.4 og figur 5.5 er det illustreret hvordan anvendelsesgraden af venstrevognbane er påvirket ved kø-situationer med henholdsvis uden og med tung trafik i højre vognbane.



Figur 5.4: Personbilenheder i venstrespor i køsituationer hvor der ikke er registreret tung trafik.



Figur 5.5: Personbilenheder i venstrespor i køsituationer hvor der er registreret tung trafik.

Ved kø-situationer uden tung trafik i højre vognbane, som er fremgår figur 5.4, er anvendelsesgraden nogenlunde jævn og er ikke større grad påvirket af en stigende trafikmængde i krydset. Figur 5.5 viser at der er en tendens til at anvendelsesgraden af venstrevognbane i større grad er påvirket af tilstedeværelsen af tung trafik i højre vognbane. Dette gør sig især gældende for kryds K1, K2 og K5, hvor der generelt er registreret en højere anvendelsesgrad af venstrevognbane, når der sammenlignes med anvendelsesgraden uden tung trafik på figur

5.4. Der er intet i hverken krydsenes geometri eller datagrundlag der kan forklare denne tendens, udover den begrænsede datamængde der er til rådighed med kø-situationer, hvor der er registreret tung trafik i højre vognbane.

5.4 Tidsafstande mellem køretøjer

Tidsafstandene mellem køretøjerne i målesnit C og D er blevet analyseret på samme måde som følgetiderne i målesnit A, hvor begge spor betragtes som en samlet trafikstrøm. Dette vil sige at tidsafstanden måles fra når forenden af et køretøj registreres i et målesnit, til det efterfølgende køretøjs forende registreres i samme målesnit. Dette gøres med henblik på at se hvordan den tidsmæssige afstand mellem køretøjerne påvirkes trafikintensiteten og af længden til henholdsvis målesnit C (afslutning af frafart) og snit D (afslutning af kilestrækningen). De målte tidsmæssige afstande mellem køretøjerne i målesnit D fremgår af tabel 5.4. Krydsene er sorteret efter længden fra stoplinjen til afslutning kilestrækningen, hvor cellerne i tabellen er farvet efter deres værdi. Celler med en grøn farve betyder at der er målt en stor tidsafstand, hvor celler markeret med rød indikere at der er målt en lille tidsafstand.

Tabel 5.4: Gennemsnitlig tidsafstand (sekunder) mellem køretøjerne ved afslutningen af kilestrækningen.

Kryds	Afstand A-D (m)	Køretøjer i kø per omløb							
		0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-40
K2	141		1,33	1,49	1,62	2,00			
K1	169		1,14	1,24	1,20	1,39		1,63	
K4	184	1,67	1,42	1,17					
K5	201	1,75	1,26	0,96					
K3	475			1,26	1,36	1,33	1,25	1,51	1,24

Det fremgår af tabel 5.4 at tidsafstandene mellem køretøjerne er påvirket af antallet af køretøjer der holder i kø. Krydsene med de korteste afstande til afslutningen af kilestrækningen, er stigende i takt med køens størrelse øges. Det modsatte gør sig gældende for krydsene K4 og K5, hvor afstanden til afslutningen af kilestrækningen øges en smule. Tidsafstanden mellem køretøjerne i kryds K3 er ikke umiddelbart påvirket af kølængden i krydsets tilfart, hvor afstanden til målesnit D er øget betragteligt. Udover afstandene til målesnit D har krydsene K2 og K1 også de mindste kilestrækninger (34,6-38,0 meter), hvor kryds K4 og K5 har de største afstande (65-71 meter). Om tidsafstandene ved afslutningen af kilestrækningen er påvirket af længden fra stopstregen til afslutningen af kilestrækningen, længden af kilestrækningen eller af noget helt tredje er umiddelbart svært at konkludere. Derfor er tidsafstanden ved afslutningen af frafarten analyseret for at kunne se hvordan tidsafstanden mellem køretøjerne er påvirket af frafartens længde.

Tidsafstandene mellem køretøjerne i målesnit C fremgår af tabel 5.5. Krydsene er sorteret efter længden fra stoplinjen til afslutning af frafarten, hvor cellerne i tabellen er farvet efter deres værdi. Celler med en grøn farve betyder at der er målt en stor tidsafstand, hvor celler markeret med rød indikere at der er målt en lille tidsafstand.

Tabel 5.5: Gennemsnitlig tidsafstand (sekunder) mellem køretøjerne ved afslutningen af frafartsstrækningen.

Kryds	Afstand A-C (m)	Køretøjer i kø per omløb							
		0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-40
K2	100		1,21	1,17	1,25	1,55			
K4	116	1,28	1,21	0,98					
K1	131		1,07	1,07	1,06	1,23		1,23	
K5	136	1,46	1,12	0,90					
K3	417			1,18	1,25	1,25	1,13	1,37	1,18

Det fremgår af tabel 5.5 at der tilsyneladende ikke er nogen sammenhæng mellem frafartens længde og de beregnede tidsafstande i målesnit D, som fremgår af tabel 5.4. Det fremgår tilgængæld af tabel 5.5 at de beregnede tidsafstande generelt er lavere end de beregnede tidsafstande i tabel 5.4. Dette skyldes højst sandsynligt at langt største delen af trafikanterne foretager flettemanøvren i mellem målesnit C og D, hvilket helt naturligt vil reducere hastigheden mellem køretøjerne og dermed øge den tidsmæssige afstand mellem dem.

5.5 Hastigheds-flow i kilestrækningen

Hastigheds-flow relationen er illustreret på figur 5.6, ved henholdsvis det første og sidste køretøj i køen. Største delen af krydsene har en hastighedsgrænse på 70 km/t, på nær kryds K2 som har en hastighedsgrænse på 60 km/t.

Det må forventes at hastigheden for det første køretøj ikke er påvirket af mængden af personbilenheder der holder i kø, da det første køretøj kan accelerer forholdsvis uhindret gennem frafarten. Derimod må det forventes at sidste køretøj i køen vil være påvirket af køens længde og hastighedsdifferencen mellem det første og sidste køretøj kan være et udtryk for hvor god trafikafviklingen er i frafarten og specielt i kilestrækningen, da det er her det fleste trafikanter foretager flettemanøvren. Jo større hastighedsdifferencen er mellem det første og sidste køretøj, jo ringere er trafikafviklingen i frafarten.



Figur 5.6: Beregnede hastigheds-flow relationer i kilestrækningen for det første og sidste registrerede køretøj i hver køsituation.

Det kan ud fra figur 5.6 ses at:

- Hastighedsforskellen mellem det første og sidste køretøj er cirka 15-50 km/t
- Hastigheden for de sidste køretøj falder i takt med antallet af personbilenheder stiger i køen
- Hastigheden for det sidste køretøj er i højere grad er påvirket af trafikmængden end hastigheden for det første køretøj
- Hastighedsforskellen ved lave trafikmængder er 10-15 km/t og ved større trafikmængder stiger forskellen til cirka 50 km/t.

5.6 Trafik-flow

Trafikafviklingen i kryds kan, udover at betragte hastighedsforskellen mellem det første og sidste køretøj i kilestrækningen, også udtrykkes gennem en betragtning af trafik-flow ved henholdsvis passage af stopstreger og ved afslutningen af kilestrækningen. Trafik-flow over stopstreger kan aflæses i tabel 5.6. Krydsene er sorteret efter længden fra stoplinjen til afslutning kilestrækningen.

Tabel 5.6: Gennemsnitlig trafik-flow ved passage af stopstregen.

Kryds	Afstand A-D (m)	Personbilenheder i kø per omløb							
		0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-40
K2	141		0,85	0,90	0,94	1,06			
K1	169		1,06	0,90	1,02	0,96		1,01	
K4	184	1,19	1,08	1,14					
K5	201	1,17	1,05	1,14					
K3	475			1,06	1,02	1,08	1,12		1,01

Det fremgår af tabel 5.6 at trafik-flowet over stopstregen ikke umiddelbart er påvirket af mængden af personbilenheder i køen, men er generelt over en personbilenhed per sekund. Trafik-flowet ved kilestrækningen kan aflæses i tabel 5.7.

Tabel 5.7: Gennemsnitlig trafik-flow ved afslutningen af kilestrækningen.

Kryds	Afstand A-D (m)	Personbilenheder i kø per omløb							
		0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-40
K2	141		0,85	0,70	0,68	0,67			
K1	169		0,99	0,78	0,84	0,74		0,69	
K4	184	0,92	0,92	0,90					
K5	201	0,91	0,88	0,86					
K3	475			0,88	0,79	0,80	0,85		0,75

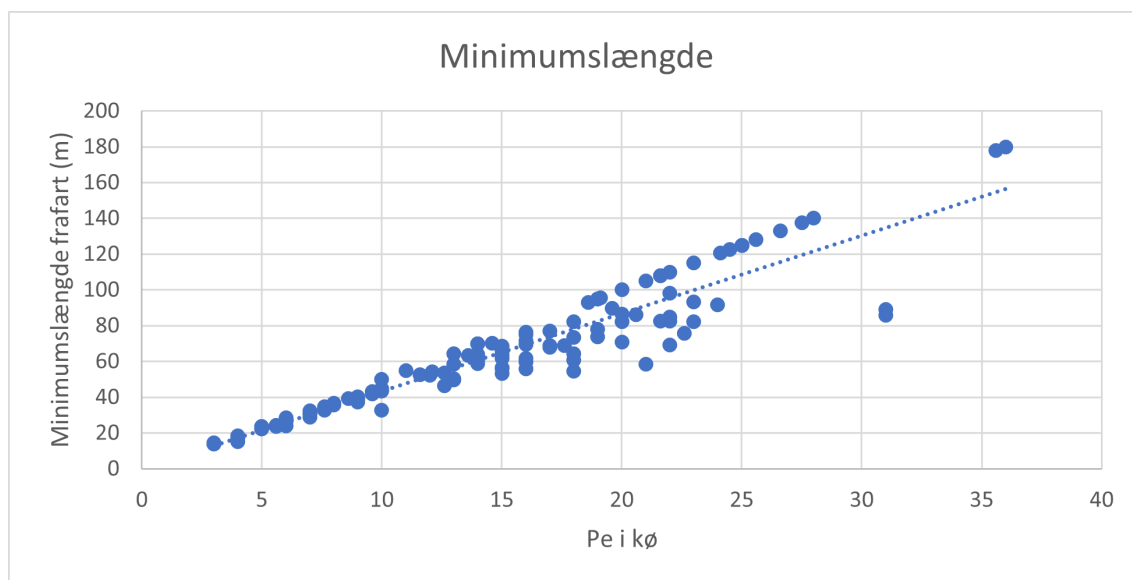
Det fremgår af tabel 5.7 at trafik-flowet ved kilestrækningen er påvirket af trafikmængden ved opstartskøen. Når antallet af personbilenheder er stigende i opstartskøen falder trafik-flowet ved kilestrækningen. Dette stemmer overens med de betragtninger der blev foretaget ved hastigheds-flowet, der viste at hastigheden for det sidste køretøj er påvirket af trafikmængden. Det at der er registret et større trafik-flow ved stopstregen, end der er ved kilestrækningen indikere at der sker en ophobning af personbilenheder i frafarten. Størrelsen den generede kø i frafarten vil afhænge af grøntiden, da dette har indflydelse på antallet personbilenheder der skal passere kilestrækningen. Derudover kan udformingen af kilestrækningen have en afgørende faktor for andelen af personbilenheder der kan afvikles i sekundet. Det er indlysende at der foretrækkes så høj et trafik-flow i kilestrækningen som muligt, da dette vil medføre at ophobningen af personbilenheder i frafarten reduceres. I tabel 5.8 er trafik-flow fra henholdsvis over stopstregen og ved kilestrækningen samlet. Trafik-flowet er udtrykt som en gennemsnitlig værdi og en maksimums -og minimumsværdi.

Tabel 5.8: Observeret trafik-flow ved henholdsvis snit A og D.

	Snit A	Snit B
Gennemsnit	1,03	0,82
Minimum	0,91	0,65
Maksimum	1,29	0,94

5.7 Opbygning af model

For at kunne forklare sammenhængen mellem minimumslængden og en eller flere uafhængige variabler, skal der testes for samvariation også kaldet F-test, det vil sige om det vil være muligt at finde en årsagssammenhæng. Der testes for signifikante hældninger med anvendelse af t-test, og til sidst en test for multikollinearitet, da det skal undgås at flere uafhængige variabler afhænger af hinanden. Der opstilles en lineær regressionsmodel, da tendenslinjen tilhørende denne funktion passer data bedst ($R^2=0,976$). Tendenslinjen og minimumslængder af frafarten ud fra personbilenheder i kø, er illustreret på figur 5.7



Figur 5.7: Sammenhæng minimumslængder af frafart og og antallet af personbilenheder i kø.

Der foretages en multipel lineær regression med følgende forklarende variabler:

1. Længde af frafarten
2. Grøntid for ligeudkørende
3. Personbilenheder i vognbanen der bortfalder efter krydset
4. Personbilenheder i kø
5. Trafikafviklingen i målesnit D
6. Typen af sporbortfald. Er det højre eller venstre vognbane der bortfalder.
7. Er sporbortfaldet skiltet eller ej
8. Bredden af kilestrækningen ved dets afslutning

Vognbanen der bortfalder efter krydset og skiltningen af sporbortfaldet er begge binære variabler. Derfor er disse skrevet om til en dummy variabel, med 0/1 værdier. Omskrivningen fra binær til dummy variabel fremgår af tabel 5.9

Tabel 5.9: Omskrivning af binære til dummy variabler

Variabel	Binær	Dummy
Sporbortfald	Højre	1
	Venstre	0
Skiltning af sporbortfald	Ja	1
	Nej	0

Resultatet fra den udførte multipel regressionsanalyse med alle forklarende variabler fremgår af tabel 5.10.

Tabel 5.10: Beskrivende statistik for de registrerede følgetider for ligeudkørende.

Regressionsstatistik						
Multipel R	0,979					
R^2	0,958					
Justeret R^2	0,956					
SE	7,097					
Observationer	132					
ANOVA						
	fg	SK	MK	F	Signifikans F	
Regression	8	143977	17997,1	357,277	$2,7 E^{-81}$	
Residual	123	6195,87	50,3729			
T-test						
	Koefficient	SE	t-stat	P-værdi	95% konfidensinterval	
Skæring	-41,321	33,803	-1,222	0,224	-108,233	25,59
Længde frafart	0,093	0,030	3,057	0,003	0,033	0,155
Grøntid	-0,767	0,405	-1,894	0,061	-1,568	0,035
Pe i spor	-0,054	0,564	-0,096	0,923	-1,171	1,062
Pe i kø	4,575	0,463	9,876	$2,7E^{-17}$	3,658	5,491
Trafikafvikling D	-1,057	4,028	-0,262	0,793	-9,029	6,916
Sporbortfald	-6,560	5,812	-1,129	0,261	-18,066	4,946
Skiltning	-1,073	4,516	-0,238	0,813	-10,012	7,867
$Kile_{Bredde}$	10,197	6,909	1,476	0,142	-3,478	23,873

Det fremgår af tabel 5.10 at 'Signifikans F' er statistisk signifikant, hvilket indikere at der er nogle af variablerne der kan forklare minimumslængden af frafarten. Derudover kan det observeres at der er flere forklarende variabler der statistiske insignifikante og kan derfor ikke indgå i modellen. Der fjernes en forklarende variabel ad gangen fra modellen,

startende med den forklarende variabel der har den højeste p-værdi. Denne procedure gentages indtil at alle forklarende variabler der indgår i modellen har en statistisk signifikant hældningskoefficient. Følgende forklarende variabler blev fundet statistisk insignifikant i forbindelse med udarbejdelsen af den første regressionsanalyse:

- Grøntid
- Antal personbilenheder i det spor der bortfalder efter krydset
- Trafikafviklingen i målesnit D
- Skiltningen af sporbortfaldet

I bilag... fremgår hele regressionsanalysen for modellen. Der er i analysen tjekket for multikollinearitet mellem variablerne. Denne del af analysen viste at antallet af personbilenheder i kø er stærkt korreleret med minimumslængden af frafarten. Dette giver mening, da længden er afhængig af antallet af personbilenheder der bliver afviklet under hvert omløb. De forklarende variabler må gerne være korreleret med responsvariablen og derfor er dette ikke et problem for modellen. Derudover viste analysen for multikollinearitet at længden af frafarten i mindre grad er korreleret med de forklarende variabler: 'bredden af kilestrækningen', 'typen af sporbortfaldet', 'personbilenheder i kø' og 'længden af frafarten.. På baggrund af dette vurderes det at den forklarende variabel ikke kan anvendes i den endelige model for estimeringen af minimumslængden. Både bredden af kilestrækningen og typen af sporbortfaldet er svagt korreleret med responsvariablen og derfor vurderes det at deres indflydelse på minimumslængden af frafartstrækningen er ubetydelig og derfor vil de ej heller indgå i den endelige model. Den eneste forklarende variabel der er tilbage er antallet af personbilenheder i kø og derfor opstilles en regressionsmodel med udgangspunkt i denne forklarende variabel.

Med udgangspunkt i den nye regressionsmodel, med en variabel, opstilles en model for sammenhængen mellem minimumslængden af frafarten og antallet af personbilenheder i kø.

$$L_{2spor,min} = 4.3434 * pe \quad (5.1)$$

Den opstillede model 5.1 for estimering af frafartens minimumslængde har en determinationskoefficient på $R^2=0,976$, hvilket vurderes at være en acceptabel forklaringsgrad. I tabel 5.11 fremgår forskellige minimumslængder, baseret på modellen.

Tabel 5.11: Minimumslængde af frafartsspolet baseret på antal personbilenheder i kø.

Tilfartens kø-længde	Længde af 2-spolet frafart
10 personbilenheder	44 meter
20 personbilenheder	87 meter
30 personbilenheder	130 meter
40 personbilenheder	173 meter
50 personbilenheder	218 meter
60 personbilenheder	260 meter

6 | Diskussion

I dette kapitel diskuteres resultatet af den endelige model og der foretages en sammenligning af med de anbefalinger der er fundet på området. Derudover diskuteres både svagheder og styrker ved den opstillede model samt et par af de antagelser der er foretaget under opbygningen af modellen.

6.1 Datagrundlag

Under dataindsamlingen er der anvendt optagelser fra actionkameraer der var placeret i niveau med trafikken og droneoptagelser der er placeret over trafikken. Der er både fordele og ulemper forbundet med anvendelsen af henholdsvis droneoptagelser eller videooptagelser fra actionkameraerne. Den primære fordel ved anvendelsen af droneoptagelser, er at det er muligt at følge trafikanternes fulde færden gennem krydset og dermed muligt at kunne registrere trafikantadfærden ved flettestrækningen. Tilgængæld kan det være svært at registrere tidskoder i snit B, C og D, da afstanden til disse øges i forhold til actionkamerne. Dette har med stor sandsynlighed resulteret i en mindre usikkerhed i registreringen af tidskoderne i disse målesnit, sammenlignet med actionkameraerne. Tidskoderne fra de kryds der er dækket med actionkamera kan registreres forholdsvis nøjagtigt i de fire målesnit, da kameraerne er i niveau med trafikken og er placeret lige uden for hvert målesnit.

Der er under registreringen af data ikke observeret situationer hvor der var trafik tilstede i frafarten ved opstart fra grønt, tilbagestuvning i krydset eller uhensigtsmæssig trafikantadfærd. Dette er på trods af at flere frafarterne og kilestrækningerne er mindre end det anbefalinger er angivet i vejreglerne. Dette kunne godt tyde på at frafartsstrækningerne generelt kan håndtere større trafikmængder end det anbefalinger angiver.

Det blev efter bearbejdningen af videooptagelserne fra krydsene ret tydeligt at hvert kryds kun repræsenterede visse grupper af kø-situationer, hvilket fremgår af tabel 6.1

Tabel 6.1: Repræsenterede køsituationer ved hvert kryds.

Kryds	Køretøjer i kø per omløb							
	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-40
K1		X	X	X	X		X	
K2		X	X	X	X			
K3			X	X	X	X	X	X
K4	X	X	X					
K5	X	X	X	X				

Som det fremgår af tabel 6.1 er kø-situationer fra fem til og med 19 personbilenheder, fint repræsenteret ved alle fem kryds. Det er især kø-situationer med 25+ personbilenheder der

en mangel i datagrundlaget, hvilket har indflydelse på den model der er blevet opstillet i forbindelse med dette studie. Datagrundlaget kunne have været bedre, hvis flere køsituationer var repræsenteret ved hvert kryds, da det havde givet mulighed for at foretage en mere dybdegående analyse af, hvordan trafikintensiteten påvirker det enkelte kryds. Udvalgelsen af kryds er primært baseret på trafikmålinger der er hentet fra Mastra, hvor kryds med de højeste årsdøgtrafik er blevet prioriteret. Under udvalgelsen af krydsene til droneoptagelserne er der taget hensyn til at dronelføreren er bosiddende i Midtjylland, hvilket har sat en geografisk barriere i forhold til udvalgelsen. Det kunne godt tænkes at det havde været muligt at finde andre kryds med højere trafikintensiteter, som kunne have bidraget positivt til datagrundlaget og dermed også modellen.

Det fremgår af tabel 6.1 at der generelt er registreret færre kø-situationer i kryds K4, sammenlignet med de andre kryds. Dette er på trods af at krydset har den længste grøntid og er det kryds hvor der er gennemset mest videomateriale. Dette skyldes at langt største delen af trafikken ankom til krydset under grøntiden. Dette har betydet at de kø-længder der opstod i krydsets tilfart var meget korte. Dette underbygger den teori der blev fundet gennem litteraturstudiet, at en sammenordning af to kryds i princippet kan øge kapaciteten i krydset og at man gennem en sammenordning kan reducere længden af frafartsstrækningen betydeligt.

6.2 Modellens styrker og svagheder

En model er ikke bedre end det datagrundlag den er bygget op omkring. Mangel på data i kø-situationer ved 20+ personbilenheder, medføre højst sandsynligt en usikkerhed ved beregning af minimumslængder ud fra den trafikintensitet. Ud fra en regressionsanalyse er der opstillet en lineær regressionsmodel til estimeringen af minimumslængden af frafartsstrækningen.

Modellen er baseret på den uafhængige variabel 'personbilenheder i kø', som giver modellen en forklaringsgrad $R^2=0,976$

Modellen er udelukkende baseret på data fra kryds placeret uden for tættere bebygget områder, for at simplificere modellen. Inden i byen er der flere forskellige faktorer der kan have medindflydelse på trafikafviklingen i frafarten, såsom ind- og udkørsler langs frafarten, busstopsteder og bløde trafikanter. Modellens anvendelsesmuligheder inden for tættere bebygget områder kan diskuteres, men det forventes at minimumslængden bør øges, hvis modellen skal anvendes i byområder.

I modellen er det antaget en personbilenhed fylder 12 meter ved tæt trafik, hvilket er den samme antagelse der er foretaget under udarbejdelsen af anbefalingerne i vejreglhåndbogen 'Kapacitet og serviceniveau' [Vejdirektoratet; Trafitec, 2019]. Det har ikke været muligt at bekræfte denne værdi gennem denne undersøgelse, så hvor vidt om den antagelse stemmer overens med virkeligheden vides ikke. Det er trods alt en parametre af hvis betydning for estimeringen af minimumslængden. I Australien vurderes det derimod at et køretøj kun fylder otte meter, hvor Leisch [Leisch, 1967] anbefaler at der anvendes minimum 10 meter. Der er forskellige bud på hvad køretøjerne fylder under trafikafviklingen i frafarten, men hvilket bud der er det mest korrekte at anvende, er svært at konkludere ud fra dette studie.

6.3 Sammenligning med andre modeller

I dette studie anvendes kø-længder i det pågældende spor til at estimere en minimumslængde af frafartsstrækningen. Dette gør at det ikke direkte er muligt at sammenligne denne model med andre, da indgangsparametren i de andre undersøgelser er grøntiden eller hastighedsgrensen. Ud fra en skønsmæssig vurdering af de estimerede minimumslængder i tabel 5.11, vurderes at længderne generelt er lavere end dem der er anbefalet i vejreglerne. For at kunne foretage en mere præcis sammenligning, er modellen blevet justeret således at grøntiden kan anvendes som indgangsparametre. Følgende model er fundet statistisk signifikant og med en forklaringsgrad ($R^2=0,9496$).

$$L_{2spor,min} = 4,299 * Gr \quad (6.1)$$

Den justeret model 6.1 har en lidt lavere forklaringsgrad end modellen der er baseret på personbilenheder i kø, men den er stadig acceptabel.

Tabel 6.2: Minumslængde af frafartssporet i følge danske vejregler.

Tilfartens grøntid	Model	DK	Buckley & Riegner
20 sekunder	86 m	100 m	85 m
30 sekunder	129 m	140 m	127 m
40 sekunder	172 m	180 m	169 m
50 sekunder	215 m	220 m	211 m
60 sekunder	258 m	260 m	253 m

Det fremgår af tabel 6.2 at den estimerede minimumslængden ud fra den justeret model, generelt er lavere end anbefalingerne i vejreglerne. Tilgængelig minder de estimerede minimumslængder meget om de længder Buckley og Riegner [Buckley og Riegner, 2006] fandt under deres studie tilbage i 2006. Det er på trods af at deres tilgang til metoden virkede lidt mere simpel end den der valgt i dette studie. Deres fremgangsmetode er meget simpel og antager for eksempel at alle køretøjer har den samme passagetid, acceleration og holder den samme vognbane frem til kilestrækningen. I dette studie har køretøjerne varierende passagetid over stopstregen, hvor antagelsen omkring at trafikanterne holder den samme vognbane frem til kilestrækningen kan godtages i dette studie. Det skal bemærkes at minimumslængden i Buckley og Riegner's model ikke afhænger af den kapacitetsforskel der er i overgangen fra to til et spor, men udelukkende er baseret på hastigheden hvormed køen opbygges ved flaskehalsens begyndelse. Ligeledes antages det at der under hele grøntiden ankommer trafik til krydset, hvilket ikke er opfyldt i dette studie. På trods af lidt forskellige forudsætninger under hver model er der alligevel opnået nogenlunde samme resultat. Det kan ligeledes diskuteres om det er den et-sporet strækning der er den reelle flaskehals, eller om det er kilestrækningen der er den faktiske flaskehals.

7 | Konklusion

Trafikken på de danske veje har primært været stigende siden 2019, dog lige med undtagelse under COVID-19 pandemien, hvor trafikken har været faldende. Trafiktal fra første kvartal af 2022 indikere at trafikken på de danske igen er stigende. Den stigende efterspørgsel fra trafikken skaber trængsel på de danske veje. Trængslen på vejene er en generel udfordring og en undersøgelse udført af Vejdirektoratet estimerer at trafikanterne i gennemsnit bruger 360.000 timer om dagen på at holde i kø. Trængsel opstår oftest som følge af flaskehalse i infrastrukturen, som for eksempel tilkørselsramper ved motorveje eller kryds i byen. Påvirkningen fra flaskehalse i forhold til trængsel og trafikafvikling, er steget betydeligt de sidste 20 år. Trængslen på vejene og begrænsede midler til at udvide infrastrukturen, kræver mindre omkostningsfulde tiltag. Kapaciteten i kryds kan øges ved at tilføje ekstra vognbaner i den retning der er behov for det, som efterfølgende bortfader i krydsets frafart.

Formålet med dette projekt er at undersøge hvordan minimumslængden af frafarten påvirkes af trafikken i krydset. Derudover har datamaterialet givet anledning til at analysere følgetiden for ligeudkørende trafikstrømme i signalreguleret kryds.

Generelt er der forskellige anbefalinger til minimumslængderne af frafarter i signalreguleret kryds i de forskellige lande. Både svenskerne, englænderne og australierne angiver ikke specifikke længder i deres anbefalinger, men lader det i højere grad være op til den enkelte rådgiver at vurdere minimumslængden ud fra de forudsætninger der er tilstede ved krydset. Der er en overbevisning om at hvert kryds er unik og derfor er det svært at opstille generelle anbefalinger på området. Nordmændene og amerikanerne baserer længden af frafarten ud fra hastighedsgrænsen i krydset, hvor vi i Danmark estimerer længden på baggrund af grøntiden.

En lang række undersøgelser fastslår at der er mange måder at estimere minimumslængden af frafarten på. Der er flere undersøgelser der påpeger at der er en sammenhæng mellem anvendelsesgraden af sporet der bortfalder efter krydset og længden af frafarten. Uanset den forudsagte anvendelsesgrad vil trafikanterne generelt søge den vognbane der minimerer rejsetiden gennem krydset. Det kan generelt antages at trafikken ved ankomst til krydset vil fordeles på en måde der udligner vognbanernes gennemstrømningshastighed. Det er tydeligt at trafikafviklingen i krydsets frafart er påvirket af signalanlægget og trafikken i krydset.

I projektet indgår data fra 1868 køretøjer og der er registreret 132 kø-situationer. Resultaterne fra dataanalysen påpeger at følgetiden for ligekørende er stort set identisk med den der opgivet i vejreglerne og det ikke giver anledning til yderligere undersøgelser. Der er intet i resultaterne der indikere at der skulle være en sammenhæng mellem anvendelsesgraden af vognbanen der forsætter efter krydset og længden af frafarten. Der er en svag tendens til at flere trafikanter vælger at benytte det venstrespor ved lave trafikmængder, men at det udligner sig i takt med trafikken stiger i krydset. Ikke overraskende tyder resultaterne på at hastigheden for det første køretøj i køen ikke er påvirket af kø-længden, hvor hastigheden for det sidste køretøj, må siges at være påvirket. Generelt er der observeret et større trafikflow over stopstregen end der ved afslutningen af kilestrækningen, hvilket indikere at der sker en ophobning af trafikken i frafarten. Størrelsen af den kø-længde der generes i frafarten er forsøgt

estimeret ud fra en regressionsmodel. Ud fra en regressionsanalyse er der opstillet en model der beskriver sammenhængen mellem minimumslængden og antallet af personbilenheder i kø. Af de undersøgte forklarende variabler der kunne have indflydelse på længden af frafarten, var det kun antallet af personbilenheder i kø og grøntiden der var statistisk signifikant. Den opstillede model, der er baseret på antallet personbilenheder i kø, har en forklaringsgrad på $R^2=0,976$, hvilket må vurderes at være tilfredsstillende. Der er ikke noget i regressionsanalysen der giver anledning til at tro at skiltningen i krydset, bredderne af frafarten eller hvilken vognbane der bortfalder efter krydset, skulle have indflydelse på længden af frafarten. De estimerede længder baseret på modellen er generelt lavere end dem Vejdirektoratet anbefaler, hvilket kan have noget at gøre med det datagrundlag modellen er bygget op omkring. Der er mangel på kø-situationer med 25+, som gør at der er en vis usikkerhed forbundet med modellen og især ved høje trafikbelastninger.

I modellen er der udelukkende fokus på kapacitet, hvor faktorer såsom fremkommelighed, serviceniveau og muligheden for overhaling i situationer med tæt trafik, ikke er blevet undersøgt. Det kunne være interessant at fremtidige undersøger af minimumslængderne i signalreguleret kryds med to-sporet frafarter, ikke nødvendigvis kun omhandler kapacitet, men også fremkommelighed og serviceniveau.

Litteratur

- Aumann og Whitehead, 2021.** Peter Aumann og Mike Whitehead. *Guide to Road Design Part 4A: Unsignalised and Signalised Intersections*. Austroads, 2021. ISBN 9781922382191. URL www.austroads.com.au.
- Brinch-Pedersen, 2022a.** Christoffer Brinch-Pedersen. *Trafikken på vejene i første kvartal 2022*, Vejdirektoratet, 2022a.
- Brinch-Pedersen, 5 2022b.** Christoffer Brinch-Pedersen. *Trafikkens udvikling i tal, 2022b*.
- Buckley og Riegner, 2006.** Matthew JA Buckley og Jeffrey R Riegner. *Length Requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections*. Technical Conference and Exhibit Compendium of Technical Papers, 2006.
- Chamberlin et al., 2022.** Robert Chamberlin, Grant Farnsworth, Andrea Guevara, Kelly Njord og Eric Rasband. *Predicting lane utilization at signalized intersections in advance of arterial lane drops*, Utah Department of Transportation, Millcreek, 2022. URL www.udot.utah.gov/go/research.
- Daganzo, 1997.** C. F. Daganzo. *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. University of California, 1997.
- Department of transportation, 2015.** Department of transportation. *Roadway Design Manual, The state of New Jersey*, 2015.
- Greibe og Lund, 2018.** Poul Greibe og Belinda la Cour Lund. *Signalregulerede kryds med 2 gennemfartsspor*, Trafitec, 2018.
- Guell og Asce, 1983.** David L Guell og M Asce. *Additional through lanes at signalized intersections*, Journal of Transportation Engineering, 1983.
- Hansen et al., 2014.** Christian Overgård Hansen, Dorte Filges, Henning Sørensen og Bjarke Brun. *Modellering af køopstuvning*. Trafikdage, page 1, 2014.
- Hurley, 1996.** Jamie W Hurley. *Utilization of auxiliary through lanes at signalized intersections with downstream lane reductions*. Transportation Research Record, 1(1572), 167–173, 1996. URL <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030282815&partnerID=40&md5=000a1ca5df33396a74da3277ae59dcf>.
- Lee et al., 2005.** Jae-Joon Lee, Joseph E Hummer og Nagui M Roupail. *False Capacity for Lane Drops*, North Carolina State University, 2005.
- Leisch, 6 1967.** J. E Leisch. *Capacity Analysis Techniques for Design of Signalized Intersections*. Public Roads, 34, 171–210, 1967.
- Lund og Greibe, 3 2017.** Belinda la Cour Lund og Poul Greibe. *Trafikafvikling i 2-sporet frakarter*, Trafitec, 3 2017. URL www.trafitec.dk.

- Lund et al., 2013.** Belinda la Cour Lund, Poul Greibe og Per Bruun Madsen. *Signalregulerede kryds Følgetider og personbilaekvivalenter*, Trafitec, 2013. URL www.trafitec.dk.
- Mccoy og Tobin, 1982.** Patrick T Mccoy og John R Tobin. *Use of Additional Through Lanes at Signalized Intersections*. *Transportation Research Record*, 1982.
- National Highways, 4 2020.** National Highways. *Design Manual for Roads and Bridges Road Layout Design CD 116 Geometric design of roundabouts*, National Highways, 4 2020.
- National Highways, 11 2021.** National Highways. *Design Manual for Roads and Bridges Road Layout Design CD 123 Geometric design of at-grade priority and signal-controlled junctions*, National Highways, 11 2021.
- Nevers et al., 2011.** Brandon L Nevers, Nagui Rouphail, Hermanus Steyn, Yuri Mereszczak og Zach Clark. *Guidelines on the use of auxiliary through lanes at signalized intersections, volume 707*. *Transportation Research Board*, 2011. ISBN 0309213754.
- Shen, 2001. Q Shen.** *Minimum merging section lengths for triple left-turn lanes with downstream lane reductions*. *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers)*, 71(3), 40–45, 2001. URL <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035277783&partnerID=40&md5=6e1d5314eba229b108ed86dd5c60527e>.
- Tarawneh, 2000. Mohammed S. Tarawneh.** *Utilization of Auxiliary Through Lanes at intersections of four lane*. *Transportation Research Record*, 2000.
- Trafikverket., 1 2020.** Trafikverket. *VGU Begrepp och grundvärden_Krav*. Trafikverket, *borlänge*, 1.0 edition, 2020. ISBN 9789177255437.
- Trafikverket, 2022.** Trafikverket. *VGU Vägars och gators utformning*. Trafikverket, 1.0 edition, 2022. ISBN 9789177259480.
- Transportministeriet, 4 2021.** Transportministeriet. *Danmark fremad*, *Transportministeriet*, 4 2021.
- TRB, 2000.** TRB. *Highway Capacity Manual*. National Research Council,, Washington DC, 2000.
- Vegdirektoratet, 6 2014.** Vegdirektoratet. *Geometrisk utforming av veg- og gatekryss*, *Vegdirektoratet*, 6 2014. URL www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Handboker.
- Vejdirektoratet, 3 2022.** Vejdirektoratet. *Trafikken i fremtiden*, 2022. URL <https://www.vejdirektoratet.dk/tema/trafikken-i-fremtiden#1>.
- Vejdirektoratet; Trafitec, 10 2019.** Vejdirektoratet; Trafitec. *Kapacitet og serviceniveau*, 2019.
- Vejrup-Hansen, 2014.** Per Vejrup-Hansen. *Statistik med excel*. *Samfundslitteratur*, 2. edition, 2014.

A | Oversigt over kryds med sporreduktion i frafarten

Oversigt over udvalgte signalregulerede kryds med efterfølgende sporbortfald										
Krydsnr.	Område	Retning	Sporkombination	Længde af frafartsspor (Meter)	ÅDT	Lastbil %	Hastighed	Sporbortfald	Skiltning	Pilafmærkning tilfart
1	Jyllinge	Syd	Ligeud + højre/ligeud	75	14,048	10.50	70	Højre	E16,1,3 ved kilestrækning	x
1	Jyllinge	Nord	Ligeud + højre/ligeud	61	10,697	24.00	70	Højre	E16,1,3 ved kilestrækning	x
2	Roskilde	Syd	Ligeud + højre/ligeud	755	15,620	5.70	70	Venstre	E15 (Vognbane forløb) før kryds. E 16,1,2 med undertavle placeret 200 m før sammenfletning og ved kilestrækning	x
3	Farum	Øst	Ligeud + højre/ligeud	121	12,492	6.6	70	Midt	Ingen skiltning	
3	Farum	Vest	2x Ligeud	112	12,492	6.6	70	Midt	Ingen skiltning	
4	Roskilde	Syd	2x Ligeud	100	20,470	4.7	60	Venstre	E 16,1,2 med undertavle placeret 300 m før sammenfletning (Før kryds) og ved kilestrækning	x
5	Roskilde	Syd	2x Ligeud	132	23,908	7.9	70	Venstre	E 16,1,2 med undertavle placeret 150 m før sammenfletning og ved kilestrækning	
6	Ballerup	Nord	2x Ligeud	306	34,984	3.6	70	Højre	E16,1,3 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
7	Ballerup	Nord	2x Ligeud	37	27,442	2.6	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
8	Herlev	Nordøst	2x Ligeud	420	25,092	4.7	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
8	Herlev	Sydvest	2x Ligeud	35	25,092	4.7	70	Midt	Ingen skiltning	

K1

K3

9	Lyngby	Nordøst	2x Ligeud	95	25,092	4.7	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
9	Lyngby	Sydvest	2x Ligeud	93	22,079	5.1	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
10	Lyngby	Sydvest	2x Ligeud	121	22,021	4.6	60	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	x
11	Bagsværd	Nordøst	Ligeud + venstre/ligeud	53	14,881	3.1	60	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
12	Glostrup	Vest	2x Ligeud	65	21,556	6.6	70	Højre	Portal før krydset. E16,1,2 ved kilestrækning	x
13	Bagsværd	Øst	Ligeud + højre/ligeud	79	18,225	ukendt	60	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
14	Vallensbæk	Øst	2x Venstresving	65	6,103	6.2	60	Højre	E 16,1,2 med undertavle placeret 50 m før sammenfletning og ved kilestrækning	x
15	København	Øst	2x Ligeud	62	24,122	2.7	50	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
16	København	Vest	2x Ligeud	47	14,108	2.7	50	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Placeret forskudt)	x
16	København	Øst	2x Ligeud	36	14,108	2.7	50	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning (Kun i venstre)	
17	Vejle	Tilkørsel mod syd	2x Venstresving	65	23,734	4.4	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning	x
18	Vejle	Tilkørsel mod nord	2x Venstresving	98	23,883	4.6	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning	x
19	Kolding	Syd	2x Ligeud	62	10,741	ukendt	70	Midt	Portal før krydset. E16,1,1 ved kilestrækning	

20	Fredericia	Tilkørsel mod øst	2x Venstresving	127	10,701	ukendt	60	Højre	E16,1,3 ved kilestrækning	x
21	København	Nord	2x Ligeud	34	19,384	7	50	Midt	Ingen skiltning	
22	København	Sydvest	2x Ligeud	53	30,259	4.7	50	Midt	Ingen skiltning	
22	København	Nordøst	2x Ligeud	23	30,259	4.7	50	Højre	Ingen skiltning	
23	Glostrup	Syd	2x Venstresving	50	8,132	5	60	Højre	Portal før krydset. E 16,1,3 med undertavle placeret 50 m før sammenfletning og ved kilestrækning	x
24	Kastrup	Vest	2x Venstresving	30	1,750	5.6	50	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning	x
24	Kastrup	Nordøst	2x Venstresving	21	1,750	5.6	50	Højre	E16,1,3 ved kilestrækning	x
25	Kastrup	Syd	2x Ligeud	59	17,544	5.3	50	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning	
26	København	Syd	2x Højresving	30	12,900	5.7	50	Højre	E16,1,3 ved kilestrækning (Kun i højre side)	x
27	Hasselager	Sydvest	2x Ligeud	111	25,741	Ukendt	70	Midt	Portal før krydset. E 16,1,2 med undertavle placeret 50 m før sammenfletning og ingen ved kilestrækning	
28	Aarhus	Sydøst	2x Ligeud	42	26,116	5.3	60	Midt	Portal før krydset. Ingen E 16,1,1	
29	Aarhus	Nordvest	2x Ligeud	36	26,128	Ukendt	70	Venstre	E 16,1,2 med undertavle placeret 150 m før sammenfletning (Før kryds) og ved kilestrækning (Kun højre side)	
30	Vejle	Nordøst	2x Ligeud	95	14,010	9.4	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning	

K2

K5

31	Aalborg	Sydøst	2x Ligeud	46	13,286	2.2	60	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	
32	Aalborg	Øst	Ligeud + højre/ligeud	76	15,737	6.1	60	Midt	Portal før kryds. Ingen E 16,1,1	
33	Nykøbing F.	Nord	2x Ligeud	57	12,089	2.6	50	Midt	Portal før kryds. Ingen E 16,1,1	
34	Odense	Vest	2x Ligeud	108	9,760	11.59	60	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning (Kun i højre side)	x
35	Odense	Syd	Ligeud + højre/ligeud	45	18,447	3.89	60	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning	
36	Odense	Øst	Ligeud + højre/ligeud	270	6,745	6.49	70	Venstre	Ingen skiltning	
37	Solrød strand	Nordøst	2x Venstresving	81	14,776	13.3	70	Venstre	E16,1,2 ved kilestrækning	x
38	Greve	Sydvest	Ligeud + højre/ligeud	108	9,337	5.6	50	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning	
39	Roskilde	Sydvest	2x Ligeud	106	19,741	11.8	60	Venstre	E 16,1,2 med undertavle placeret 300 m før sammenfletning og ved kilestrækning	x
40	København	Nordvest	2x Ligeud	81	16,812	3.2	50	Venstre	Portal før krydset. E 16,1,2 med undertavle placeret 50 m før sammenfletning og ingen ved kilestrækning	
41	Århus	Sydøst	2x Ligeud	92	8,368	-	50	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning	
42	Århus	Øst	2x Ligeud	77	16,662	-	70	-	-	
42	Århus	Vest	2x Ligeud	88	16,662	-	70	Midt	E 16,1,1 med undertavle placeret 200 m før sammenfletning (Før kryds) og ved kilestrækning (Kun højre side)	

43	Århus	Øst	2x Ligeud	80	21,184	8.9	70	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning	
43	Århus	Vest	2x Ligeud	85	21,184	8.9	70	-	-	
44	Horsens	Øst	2x Ligeud	78	18.572	3.3	70	Midt	E 16,1,1 med undertavle placeret 100 m før sammenfletning (Efter kryds) og ingen ved kilestrækning	x
44	Horsens	Vest	2x Ligeud	77	18,572	3.3	70	Midt	E16,1,1 ved kilestrækning (Kun højre side)	x

K4

B | Regressionsmodel

Lineær regressionsmodel for estimering af frafartslængde

Der udføres først en lineær regression med de forklarende variabler: Længde frafart, grøntid, pe i spor, pe i kø, trafikafvikling ved snit D, Lav_spor, Lav_skilt og bredde kilestrækning
Her er det værd at notere at flere p-værdier er ikke statistisk signifikante og skal derofr fjernes fra modellen

Output fra Excel viser, at "Signifikans F værdien" er lig med $2.7 \cdot 10^{-81} \ll 0.05$

hvilket betyder at nulhypotesen forkastes, og at der er nogen variabler der vil kunne forklare minimumslængden af frafarten

Der er forholdsvis høje forklaringsgrader på Multipel R: 0.979 og Justeret R-kvaderet: 0.956, hvilket må antages at være godt.

En af variablerne fjernes adgangen indtil alle hældningskoefficienterne er statistiske signifikante ved hver forklarende variabel

RESUMEOUTPUT

Regressionsstatistik	
Multipel R	0.979153529
R-kvadreret	0.958741634
Justeret R-kvadreret	0.956058163
Standardfejl	7.097387658
Observationer	132

ANOVA

	fg	SK	MK	F	signifikans F
Regression	8	143977	17997.1	357.277	2.7E-81
Residual	123	6195.87	50.3729		
I alt	131	150172			

	Koefficienter	standardfej	t-stat	P-værdi	Vedre 95%	Øvre 95%	Nedre 95.0%	Øvre 95.0%
Skæring	-41.32141971	33.8032	-1.22241	0.22389	-108.233	25.58996698	-108.2328064	25.58996698
Længde frafart	0.093963032	0.03074	3.05661	0.00275	0.03311	0.154812788	0.033113276	0.154812788
Grøntid	-0.766872825	0.40486	-1.89418	0.06055	-1.56826	0.034518317	-1.568263966	0.034518317
Pe i spor	-0.054463994	0.5642	-0.09653	0.92325	-1.17127	1.062342193	-1.171270182	1.062342193
Pe i kø	4.574825806	0.46321	9.87629	2.7E-17	3.65792	5.491727815	3.657923796	5.491727815
Trafikafvikling snit D	-1.056797064	4.0277	-0.26238	0.79347	-9.02939	6.915791982	-9.02938611	6.915791982
Lav_spor	-6.560099919	5.81285	-1.12855	0.26128	-18.0663	4.946079781	-18.06627962	4.946079781
Lav_skilt	-1.072595401	4.51627	-0.2375	0.81267	-10.0123	7.867083786	-10.01227459	7.867083786
Bredde kilestrækning	10.19762892	6.90876	1.47604	0.14249	-3.47783	23.87309083	-3.477832996	23.87309083

1

RESUMEOUTPUT

Regressionsstatistik	
Multipel R	0.979151933
R-kvadreret	0.958738508
Justeret R-kvadreret	0.956409231
Standardfejl	7.068978986
Observationer	132

ANOVA

	fg	SK	MK	F	signifikans F
Regression	7	143976	20568	411.603	1.3E-82
Residual	124	6196.34	49.9705		
I alt	131	150172			

	Koefficienter	standardfej	t-stat	P-værdi	Vedre 95%	Øvre 95%	Nedre 95.0%	Øvre 95.0%
Skæring	-41.24872872	33.6596	-1.22547	0.22272	-107.87	25.37295693	-107.8704144	25.37295693
Længde frafart	0.093762722	0.03055	3.06935	0.00264	0.0333	0.154225841	0.033299604	0.154225841
Grøntid	-0.768837782	0.40273	-1.90908	0.05856	-1.56595	0.028272289	-1.565947852	0.028272289
Pe i kø	4.54983734	0.38259	11.8921	3.1E-22	3.79258	5.307099518	3.792575162	5.307099518
Trafikafvikling snit D	-1.068139045	4.00987	-0.26638	0.79039	-9.0048	6.868522957	-9.004801047	6.868522957
Lav_spor	-6.526917194	5.77945	-1.12933	0.26094	-17.9661	4.912234644	-17.96606903	4.912234644
Lav_skilt	-1.079365669	4.49765	-0.23998	0.81074	-9.98148	7.822743837	-9.981475175	7.822743837
Bredde kilestrækning	10.18594635	6.88005	1.48051	0.14127	-3.4316	23.80348867	-3.43159598	23.80348867

2

RESUMEOUTPUT

Regressionsstatistik	
Multipel R	0.979147032
R-kvadreret	0.95872891
Justeret R-kvadreret	0.956399091
Standardfejl	7.069801108
Observationer	132

ANOVA

	fg	SK	MK	F	signifikans F
Regression	7	143975	20567.8	411.503	1.3E-82
Residual	124	6197.78	49.9821		
I alt	131	150172			

	Koefficienter	standardfej	t-stat	P-værdi	Nedre 95%	Øvre 95%	Nedre 95.0%	Øvre 95.0%
Skæring	-47.5106255	14.7381	-3.22367	0.00162	-76.6814	-18.33985598	-76.68139502	-18.33985598
Længde kilestrækning	-0.012716379	0.07501	-0.16953	0.86565	-0.16118	0.135745196	-0.161177955	0.135745196
Længde frafart	0.10086361	0.0115	8.77309	1.1E-14	0.07811	0.123619262	0.078107957	0.123619262
Grøntid	-0.76206705	0.40253	-1.89321	0.06066	-1.55878	0.034644737	-1.558778838	0.034644737
Pe i kø	4.550879779	0.38263	11.8938	3.1E-22	3.79355	5.308205766	3.793553793	5.308205766
Trafikafvikling snit D	-1.097493415	4.00777	-0.27384	0.78466	-9.03	6.835015421	-9.030002252	6.835015421
Lav_spor	-7.625135851	2.82332	-2.70077	0.00789	-13.2133	-2.036991354	-13.21328035	-2.036991354
Bredde kilestrækning	11.61181559	2.67602	4.33921	2.9E-05	6.31522	16.90841353	6.315217646	16.90841353

3

RESUMEOUTPUT

Regressionsstatistik	
Multipel R	0.979128073
R-kvadreret	0.958691782
Justeret R-kvadreret	0.957052567
Standardfejl	7.016621118
Observationer	132

ANOVA

	fg	SK	MK	F	signifikans F
Regression	5	143969	28793.8	584.848	2.4E-85
Residual	126	6203.35	49.233		
I alt	131	150172			

	Koefficienter	standardfej	t-stat	P-værdi	Nedre 95%	Øvre 95%	Nedre 95.0%	Øvre 95.0%
Skæring	-50.94605814	10.2621	-4.96447	2.2E-06	-71.2545	-30.63760263	-71.25451364	-30.63760263
Længde frafart	0.101572282	0.01073	9.46356	2.2E-16	0.08033	0.122812556	0.080332007	0.122812556
Grøntid	-0.691606943	0.33982	-2.03521	0.04393	-1.3641	-0.019112398	-1.364101487	-0.019112398
Pe i kø	4.513265527	0.35364	12.7622	1.9E-24	3.81342	5.213112776	3.813418278	5.213112776
Lav_spor	-8.0707482	2.46852	-3.26947	0.00139	-12.9559	-3.185616446	-12.95587995	-3.185616446
Bredde kilestrækning	11.98236782	2.41646	4.95864	2.2E-06	7.20026	16.76447463	7.200261003	16.76447463

4

RESUMEOUTPUT

Regressionsstatistik	
Multipel R	0.978434375
R-kvadreret	0.957333826
Justeret R-kvadreret	0.95599001
Standardfejl	7.102889513
Observationer	132

ANOVA

	fg	SK	MK	F	signifikans F
Regression	4	143765	35941.3	712.399	6.3E-86
Residual	127	6407.28	50.451		
I alt	131	150172			

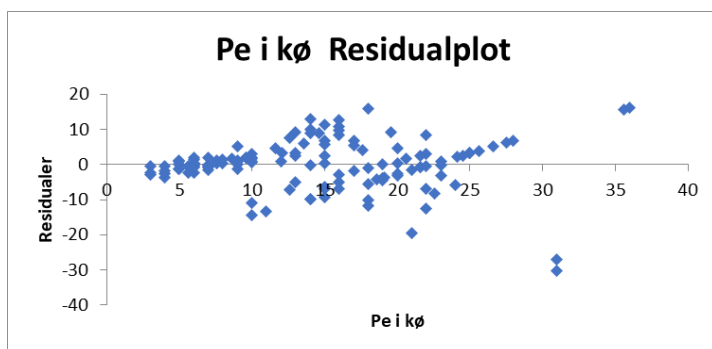
	Koefficienter	standardfej	t-stat	P-værdi	Nedre 95%	Øvre 95%	Nedre 95.0%	Øvre 95.0%
Skæring	-49.51739232	10.364	-4.77784	4.8E-06	-70.0258	-29.00896645	-70.02581819	-29.00896645
Længde frafart	0.102630072	0.01085	9.45707	2.2E-16	0.08116	0.124104628	0.081155516	0.124104628
Pe i kø	3.823734357	0.10262	37.2605	3.1E-70	3.62066	4.026804285	3.620664428	4.026804285
Lav_spor	-7.429800879	2.47845	-2.99776	0.00327	-12.3342	-2.525390905	-12.33421085	-2.525390905

Hvilken betydning har dette haft for modellen?

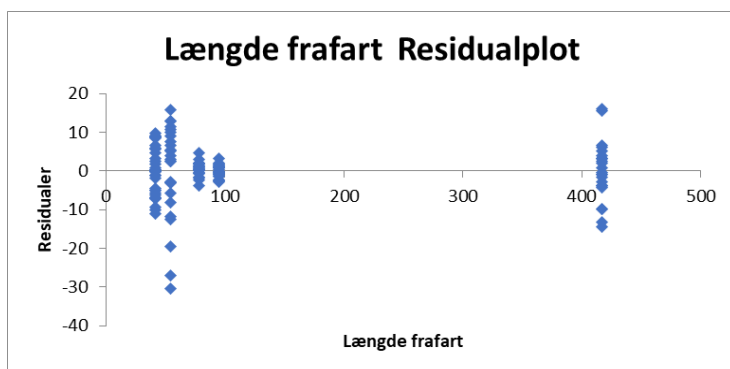
	Udgangspunkt	1	2	3	4 Forskel	
Multipel R	0.979153529	0.97915	0.97915	0.97913	0.97843	0.0007
Justeret R-kvadreret	0.956058163	0.95641	0.9564	0.95705	0.95599	0.0001

Det er meget lille ændring, hvilket betyder at der er nogen variabler der tager forklaringskraft fra andre

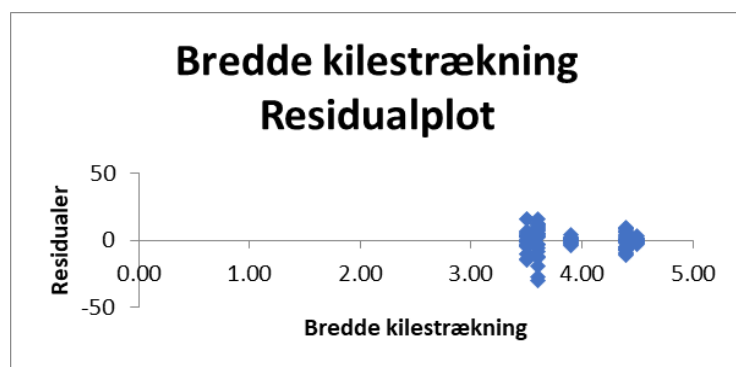
Model forudsætninger



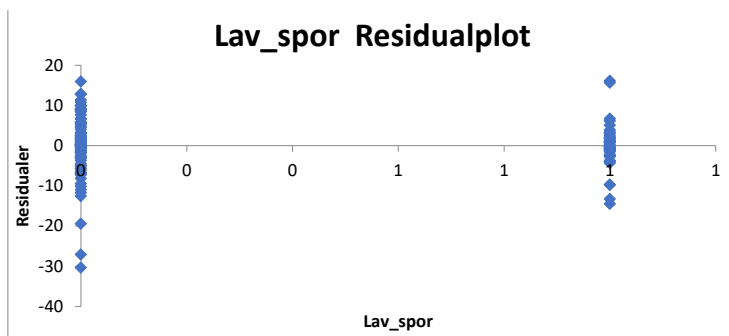
På dette residualplot for pe i kø kan man noterer sig, at der er nogle kryds, der har mange pe i kø, og dernæst stille sig det spørgsmål om dette er repræsentativt.



Grafen for residualplottet til længde frafart. har muligvis et problem omkring konstant varians. Der er store afvigelser ved krydset med en frafartslængde på 50 meter og med en længde på over 400



Grafen for residualplottet til bredde kilestrækning. har muligvis et problem omkring konstant varians. Der er store afvigelser ved krydset med en bredde på 3.6 meter.



Grafen for residualplottet til lav spor. har muligvis et problem omkring konstant varians. Der er store afvigelser ved kryds hvor venstre spor bortfalder

Residualplottet med Pe i kø må siges at være noget pænere end grøntid.

Det bliver en vurderingssag, hvornår man skal acceptere model forudsætningerne, men det er sjældent, at plottene er perfekte.

Multikollinearitet

```
. pwcorr L_min B_kile sporbortfald Pe L_frafart, sig star(5)
```

	L_min	B_kile	sporbortfald	Pe	L_frafart
L_min	1.0000				
B_kile	-0.4775*	1.0000			
sporbortfald	0.2345*	-0.0363	1.0000		
Pe	0.9442*	-0.4525*	0.0567	1.0000	
L_frafart	0.6309*	-0.5812*	0.7047*	0.4384*	1.0000

Det kan af tabellen ses at der er pe er stærkt korreleret med L-min, hvilket giver mening da længden er afhængig af personbilenheder der bliver afviklet under hvert omløb. Derudover kan det ses at L-frafart er moderat korreleret med samtlige andre uafhængige variable. Derfor trækkes L-frafart ud af ligningen. Derudover kan det ses at Pe er korreleret med L-min og derved trækkes denne også ud.

Resultat

RESUMEOUTPUT

Regressionsstatistik	
Multipel R	0.944191955
R-kvadreret	0.891498448
Justeret R-kvadreret	0.89066382
Standardfejl	11.19544524
Observationer	132

ANOVA					
	fg	SK	MK	F	signifikans F
Regression	1	133878	133878	1068.14	1.5E-64
Residual	130	16293.9	125.338		
I alt	131	150172			

	Koefficienter	standardfejl	t-stat	P-værdi	Nedre 95.0%	Øvre 95.0%
Skæring	-0.359081705	2.15846	-0.16636	0.86813	-4.62934	3.911178089

Pe i kø	4.363210248	0.1335	32.6824	1.5E-64	4.09909	4.627330648	4.099089848	4.627330648
---------	-------------	--------	---------	---------	---------	-------------	-------------	-------------

Hvilken betydning har dette haft for modellen?

	Udgangspunkt	1	2	3	4	5 Forskel	
Multipel R	0.979153529	0.97915	0.97915	0.97913	0.97843	0.891498448	0.09
Justeret R-kvadreret	0.956058163	0.95641	0.9564	0.95705	0.95599	11.19544524	-10.24

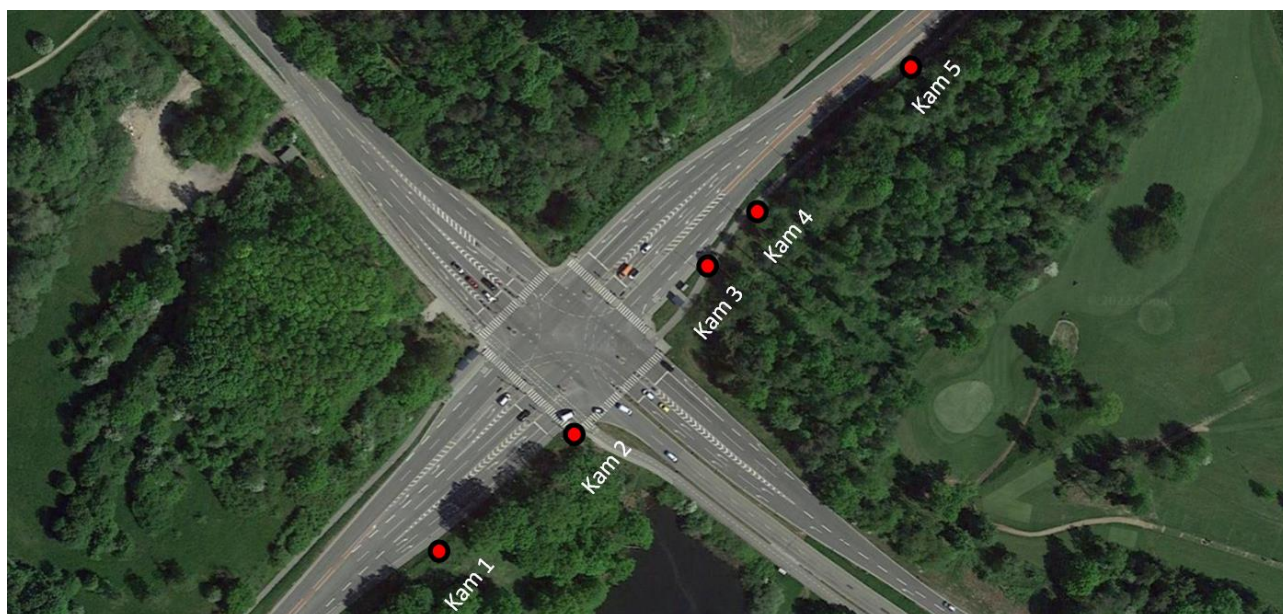
Det er meget lille ændring, hvilket betyder at der er nogen variabler der tager forklaringskraft fra andre

Konklusion

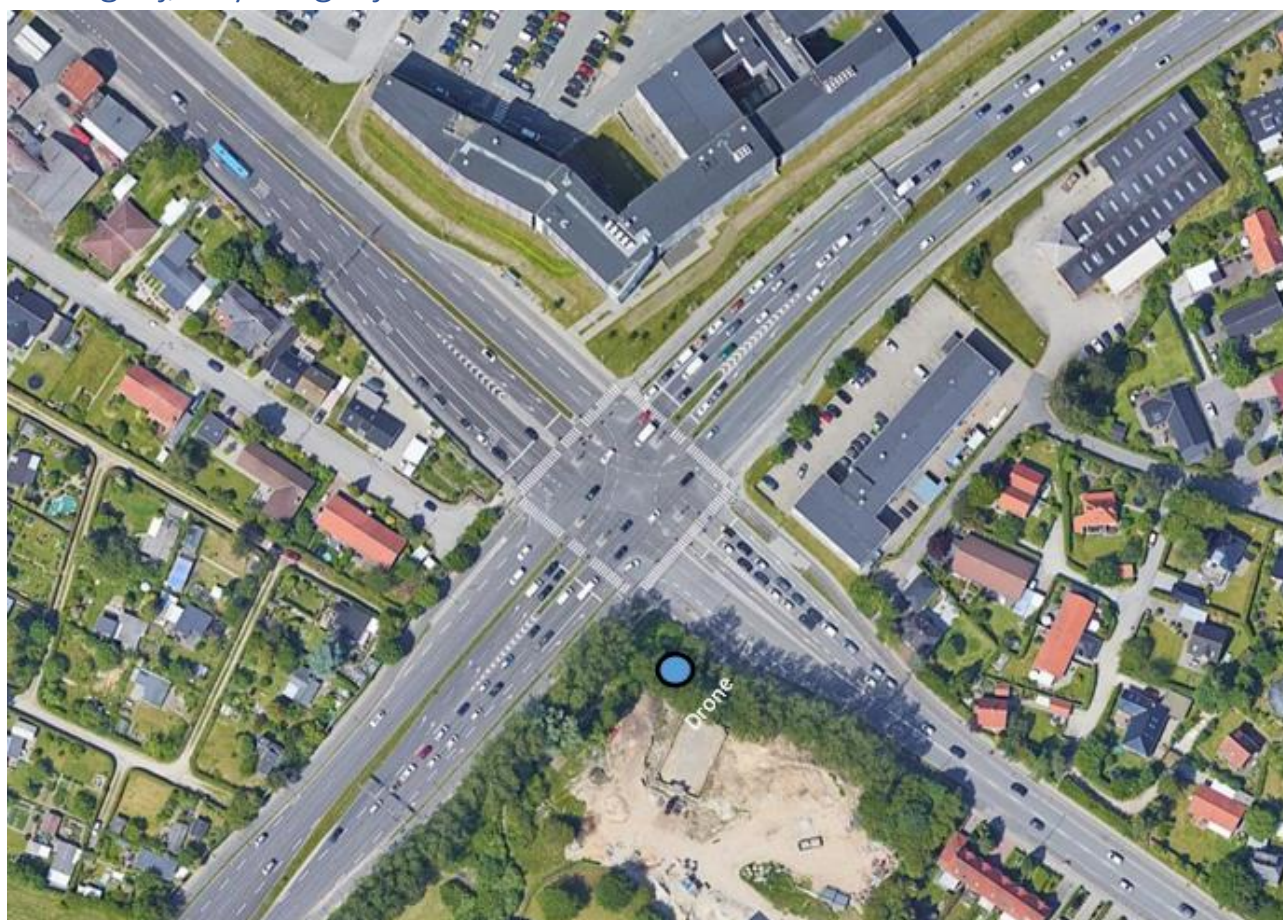
$$L_{\min} = 4.3434 \cdot p_e$$

C | Kameraopsætning

Klausdalsbrovej/Nordbuen



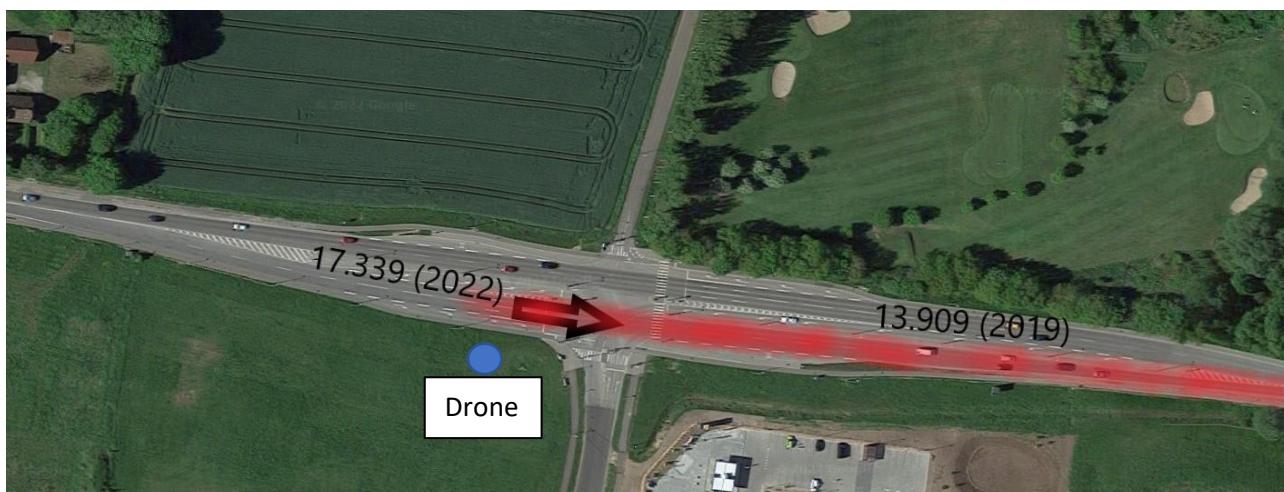
Viborgvej/Åby Ringvej



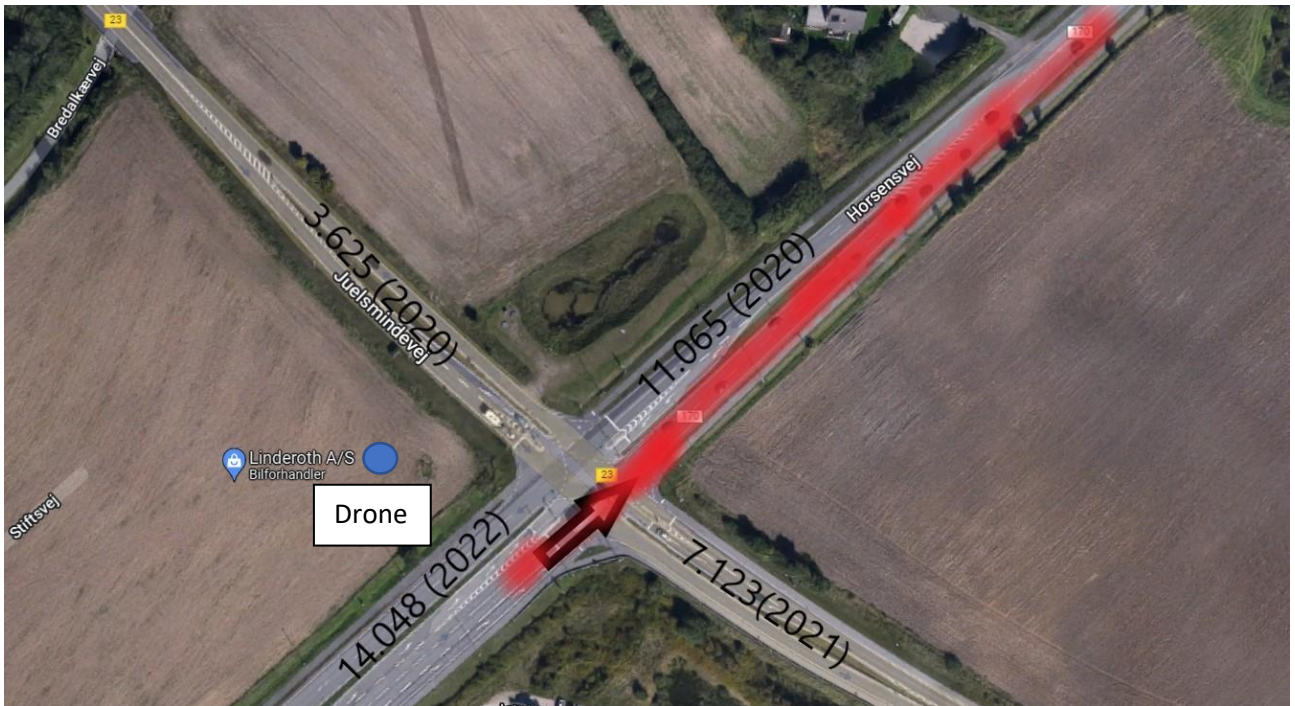
Krebsdammen/Ring4



Silkeborgvej



Juelsmindevej



D | Mailkorrespondance

Fwd: Length Requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections

Webster, Richard <Richard.Webster@highwaysengland.co.uk>

ti 22-03-2022 00:17

To: Andreas Wichmann Storm <astorm20@student.aau.dk>;

Cc: Standards_Enquiries <Standards_Enquiries@nationalhighways.co.uk>;

Hi Andreas,

I have been asked to provide a response to your query below.

Figure 7.10.1 in CD123 only provides guidance on the length that two lanes should taper into one for the exiting lanes of a signalised junction.

The minimum length between the signalised junction and the where the two lanes taper starts, similar to that identified as L2spor in the drawing below, is not specified in CD123. This is because it is for the designer to consider a suitable length taking into account a number factors, including as follows:

1. Vehicle flows in each lane,
2. Speed limit through and after junction,
3. Percentage of Heavy Goods Vehicles within each lane flows,
4. Available land and other constraints,
5. Outputs of a microsimulation model of the design and flows, and interaction of overtaking in each lane,

and as such, a fixed length within the CD123 standards may not be suitable for all scenarios.

There is an optimum layout for safe overtaking for a two lane exit from roundabouts, which is called a Differential Acceleration Lane (DAL) layout in CD116 Figure 3.33, but this is not a requirement in all scenarios and only needs to be designed in accordance with Figure 3.33 if the project has designated the exit from the roundabout as a DAL.

I hope the above helps explains the reasoning why there is no standard length in CD123 for the L2spor length identified in the drawing below. Any further queries or clarification required, please further contact me.

Kind Regards,

Richard Webster, Senior Technical Advisor, Safer Roads Design,
Safety, Engineering and Standards
National Highways, Lateral Building, 8 City Walk, Leeds, LS11 9AT
Phone +44 (0) 300 4707217 Mobile + 44 (0) 7714 838182

Web: www.highwaysengland.co.uk

National Highways Limited | Registered Office: Bridge House, 1 Walnut Tree Close, Guildford GU1 4LZ

Registered in England and Wales No.9346363

From: Andreas Wichmann Storm [<mailto:astorm20@student.aau.dk>]

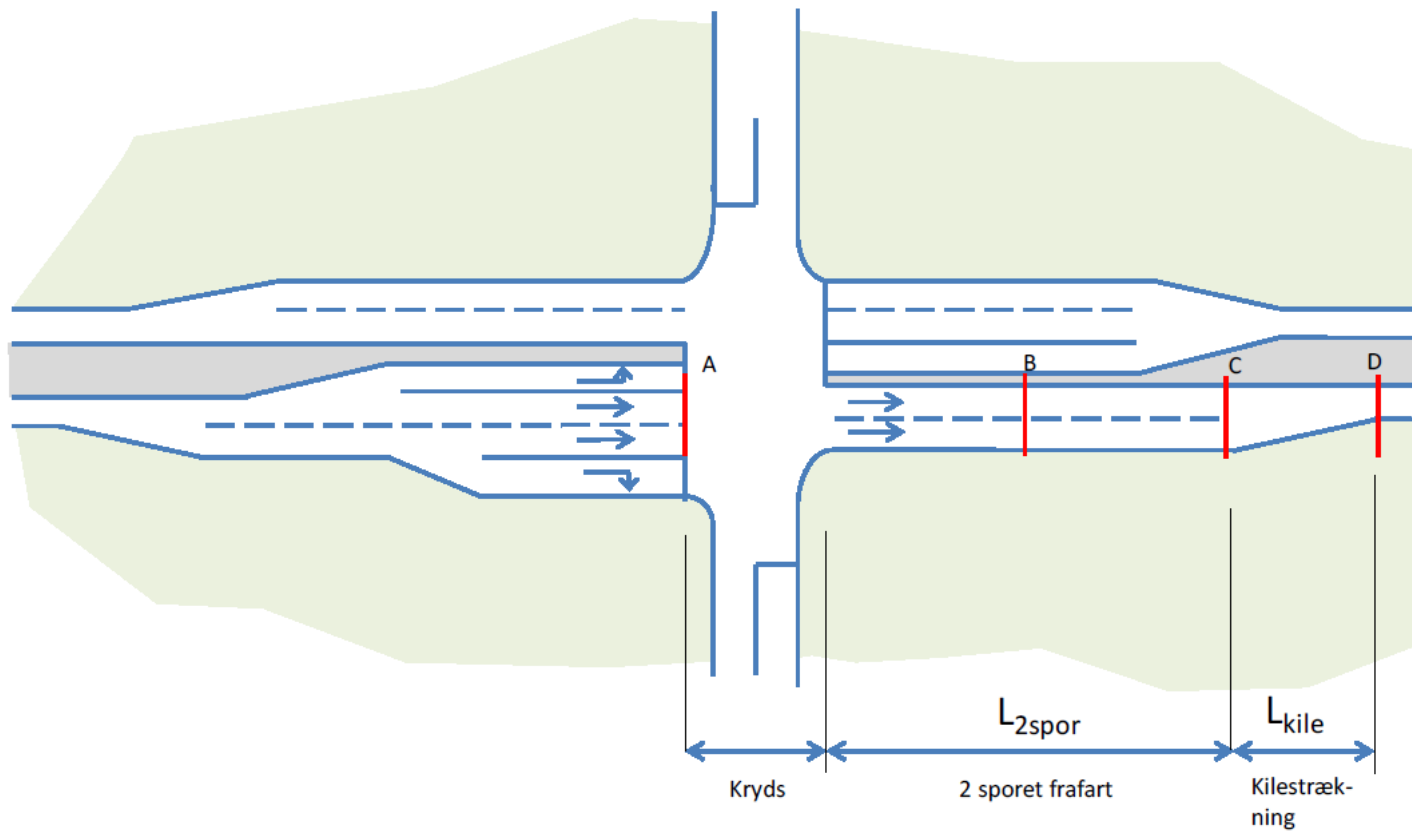
Sent: 16 March 2022 08:37

To: Standards_Enquiries <Standards_Enquiries@nationalhighways.co.uk>

Subject: Length Requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections

Hello, my name is Andreas Storm.

I am a Danish Master student at Aalborg University, and I am in the process of writing my thesis, which is about "Length Requirements for Lane Reductions Beyond Signalized Intersections". I am writing to you because I thought it might be interesting to hear what lengths you recommend the exit lane should be before the lane lapses (L2spor on the figure). I've been trying to find something about it in "CD 123" Geometric design of at-grade priority and signal-controlled junctions ", but I could only find some recommendations in section 7.12.1. Is that your only recommendations for lane reductions beyond signalized intersection or is there another place where I can read more about it? Looking forward to hearing from you.



Yours sincerely

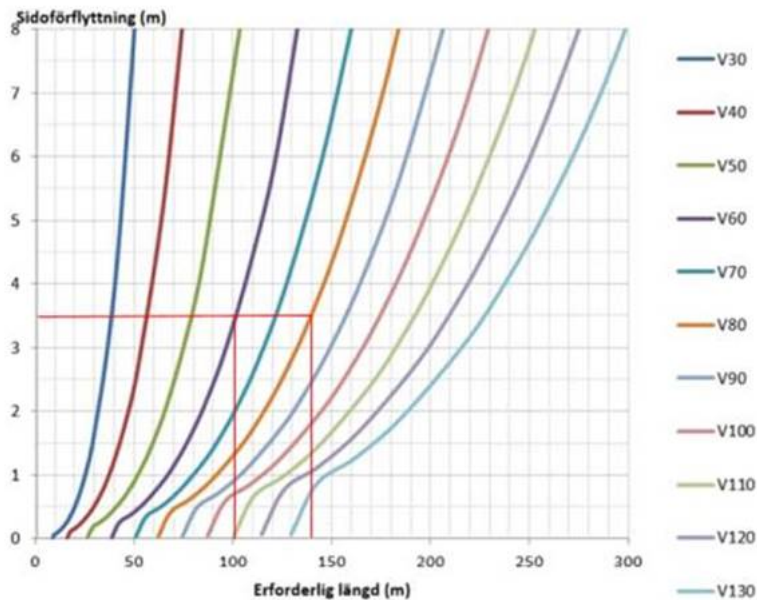
Andreas Storm

This email may contain information which is confidential and is intended only for use of the recipient/s named above. If you are not an intended recipient, you are hereby notified that any copying, distribution, disclosure, reliance upon or other use of the contents of this email is strictly prohibited. If you have received this email in error, please notify the sender and destroy it.

National Highways Limited | General enquiries: 0300 123 5000 | National Traffic Operations Centre, 3 Ridgeway, Quinton Business Park, Birmingham B32 1AF | <https://nationalhighways.co.uk> | info@nationalhighways.co.uk

Registered in England and Wales no 9346363 | Registered Office: Bridge House, 1 Walnut Tree Close, Guildford, Surrey GU1 4LZ

Consider the environment. Please don't print this e-mail unless you really need to.



Figur 5.45 Erforderlig længde for fordons sidoflytninger på raklinje med hensyn til hastighed og dimensionerende sidoryck.

Svar från vår Trafiksignalexpert

Frågan kan mer generellt sett gälla alla sorters sammanvävningar efter korsning och kanske även andra former av sammanvävning. Men nu skriver han specifikt "2-sporede frafarter i signalregulerede kryds" och det är som Mats skriver lite särskilda förhållanden när det gäller signalkorsningar.

Det här är nog en sak som skulle behöva finnas med i VGU i någon större omfattning. Vi har vid flera tillfällen fått frågor om sådana lösningar där man vill göra "trimmningsåtgärder" eller nyinvestering där man inte har tillräcklig kapacitet genom korsningen (lätt att det är just i korsningarna som det blir kapacitetsbrist förstås) men man i övrigt inte tänkt sig att ha flera körfält på sträckorna.

När vi har gett råd vill vi naturligtvis ha så lång sträcka som möjligt efter korsningen och normalt är att vi kanske eftersträvar ca 250 m. Vi har inga empiriska mätningar som stödjer vissa längder vid vissa förhållanden. I praktiken så begränsas sträckan ofta av förhållandena på den aktuella platsen och av projektet. Man har ofta inte tagit till vägutrymme för detta eftersom man bara skissat idén om en korsningstyp i tidigare skeden och märker först senare att flödet begränsas genom denna. Vid flera tillfällen har vi sett oss besegrade i kampen för en jämn kapacitetsstandard av någon viktig ek eller andra förhållanden som vi inte riktigt råar på.

I en trafiksignal "packas" trafiken vid rött och släpps koncentrerat genom som Mats säger normalt med mindre tidluckor mellan fordon. Behoven för att anordna ett extra körfält genom korsningen, oftast rakt fram men ibland vill man ha detta även för körfält med svängande trafik, beror på flera saker.

Längden på sträckan i tillfarten innan korsningen med utökat antal körfält påverkar samt även hur det är utformat, vilket körfält som utvidgas i kombination med vilket som avvecklas efter korsningen är viktigt. Om man gör en sådan här lokal körfältsutökning vid korsningen vill man att det extra körfältet också ska användas i någon lagom utsträckning. Det är däremot inte alltid det är mest fördelaktigt med en 50/50-fördelning av trafiken.

Skulle också säga att jag tror att det är svårt att hitta ett fåtal "typfall" för krav på utformning. Man måste tänka igenom för det aktuella fallet hur anslutningen till korsningen ska anordnas och hur sträckan ska avslutas och hur vävningen anordnas. Nu finns märket E15 Sammanvävning och det kanske är normalt att välja detta men förhållandena blir annorlunda om man avvecklar endera av körfälten som får väva in i det andra. Jag tycker att det kan vara bra att utveckla det vänstra körfältet eftersom det kan "uppmuntra" mer aktiva förare, de som är lite mer vågade, att nyttja det körfältet. Dessa har också lättare att hitta accepterad tidlucka vid sammanvävning oberoende av hur den är utformad. Längderna i kombination med trafiksignalernas tidssättning, trafikstyrningens funktion och trafikmängderna påverkar också hur många som kommer att byta körfält och