

Denne artikel er udgivet i det elektroniske tidsskrift  
**Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet**  
(Proceedings from the Annual Transport Conference  
at Aalborg University)  
ISSN 1603-9696  
<https://journals.aau.dk/index.php/td>

# Analyse og implementering af DLT-anlæg i Danmark

Michael Caspersen, ([michaelcaspersen@outlook.dk](mailto:michaelcaspersen@outlook.dk)), AAU dimittend 2022

---

## Abstrakt

Denne artikel omhandler analyse af potentialet for etableringen af en alternativ krydstype - den såkaldte 'Displaced Left Turn intersection' (DLT) – kaldet forskudt venstresvingkryds på dansk – under hensyntagen til danske forhold. Krydstypen er i særlig høj grad udbredt i USA, men ligeledes er at finde i Storbritannien, Tyskland, Australien, Mexico og Kina i forskellige konfigurationer. På teoretisk plan giver løsningen væsentligt øget operationel effektivitet, og dermed færre forsinkelser og udledning af drivhusgasser blandt andet. Implementering af løsningen i Danmark – også på praktisk plan – undersøgte i et kandidatspeciale, som danner grundlaget for denne artikel. Artiklen er bygget op om fire dele; et litteraturstudie med identifikation af udfordringer og problematikker i den hidtidige forskning i forhold til implementering i Danmark, en spørgeskemaundersøgelse omkring holdning, håndtering af og tryghed i krydset og statistisk analyse heraf, samt mikrosimulering på teoretisk og praktisk plan, med sammenligning mellem en DLT og et ideelt, konventionelt kryds samt et større, allerede eksisterende kryds.

---

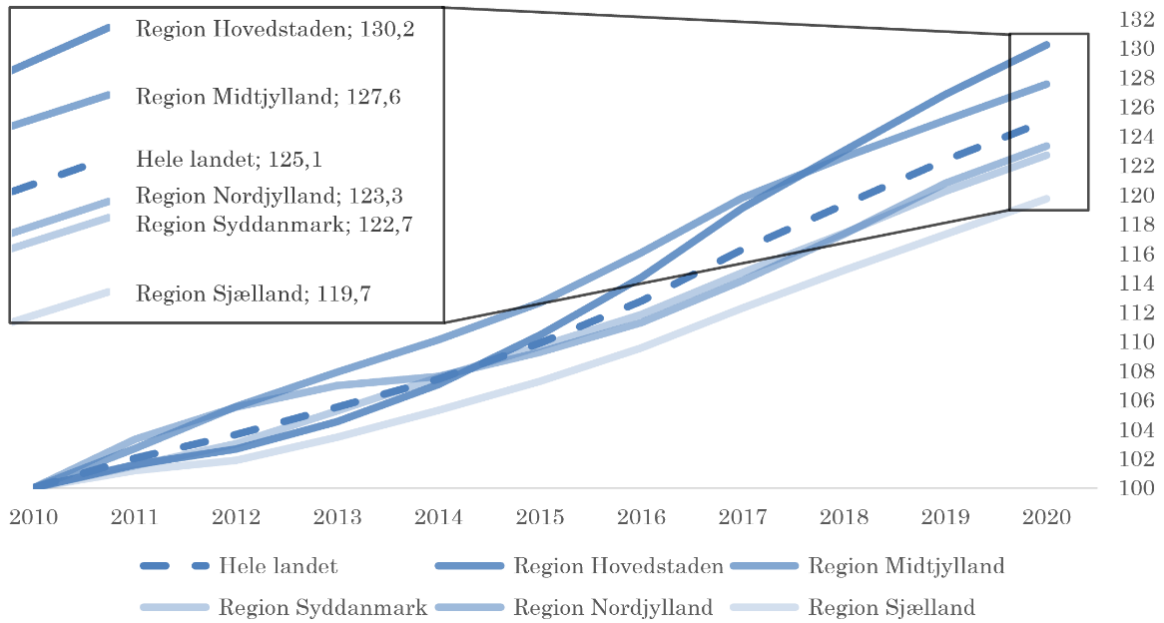
## Introduktion

Udviklingen i bilbestanden i alle regioner og transportarbejdet for personbiler og motorkøretøjer generelt har op til sundhedskrisen, som følge af covid-19, været stødt stigende. Denne udvikling kan dels tilskrives lempelse af registreringsafgiften, øget købekraft som følge af flere i job og investeringer i infrastruktur [Vejdirektoratet, 2021a]. Omfanget af trængslen per hverdagsdøgn er fra 2016 til 2018, steget fra 335.000 til 360.000 timers forsinkelse. Dette er en stigning på 7,5%, til trods for at transportarbejdet til sammenligning voksede med 3% i samme periode. Spildtiden som følge af trængsel forøges dermed væsentligt mere end stigningen i transportarbejdet, og denne difference antages at blive intensiveret, i takt med transportarbejdet fortsat stiger.

Som følge af denne hastige udvikling, har større trafikale knudepunkter, der allerede var nær eller over kapacitetsgrænsen medført længere køer og mere forsinkelse, til gene for bilister og øget belastning for miljøet og sætter et allerede presset vejnetværk under yderligere pres.

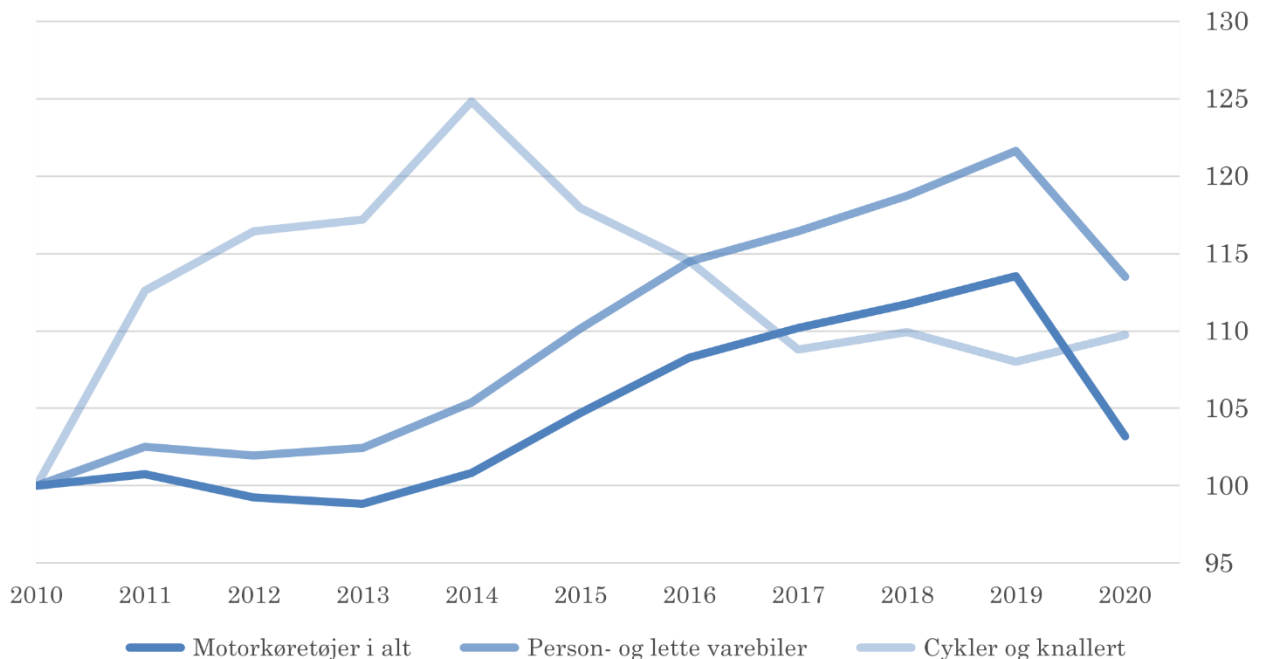
Udviklingen i bilbestanden og transportarbejde fra 2010 til 2020 er vist på figur 1 og figur 2.

### Udvikling i bestand af personbiler pr. region



Figur 1: Udvikling i bilbestand fordelt på region. Der ses jævn stigning, mest udtalt i Region Hovedstaden. [Vejdirektoratet, 2021b]

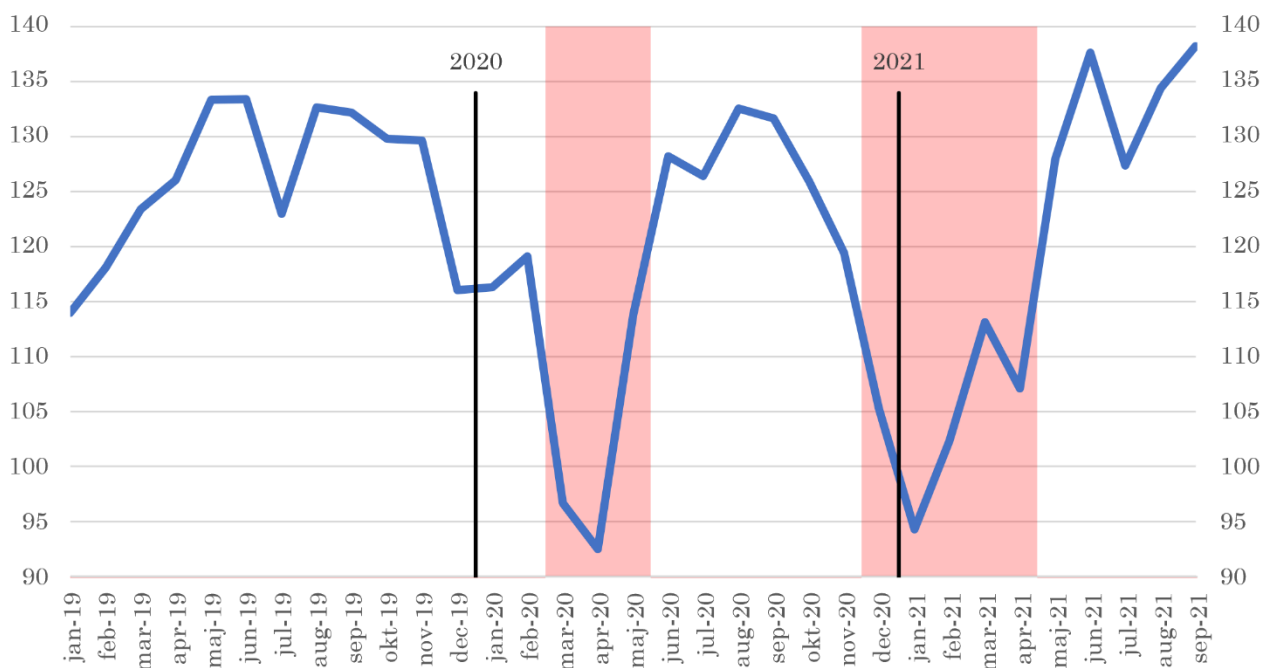
### Udvikling i transportarbejde



Figur 2: Udvikling i transportarbejde for personbiler og motorkøretøjer. Der ses en stigning for motorkøretøjer samtidig med et fald for cykeltrafik fra 2013-2014 og fremefter, indtil covid19 medførte markant fald i motortrafikken. [Vejdirektoratet, 2021b]

Trods kraftige dyk i transportarbejdet under nedlukningerne i 2020 og 2021, er udviklingen allerede tilbage på samme eller endda på højere niveau end før krisen. Forsinkelser som følge af trængsel er dermed i et konstant voksende og forværende problem. Udviklingen i transportarbejde fra januar 2019 til september 2021 er vist på figur 3.

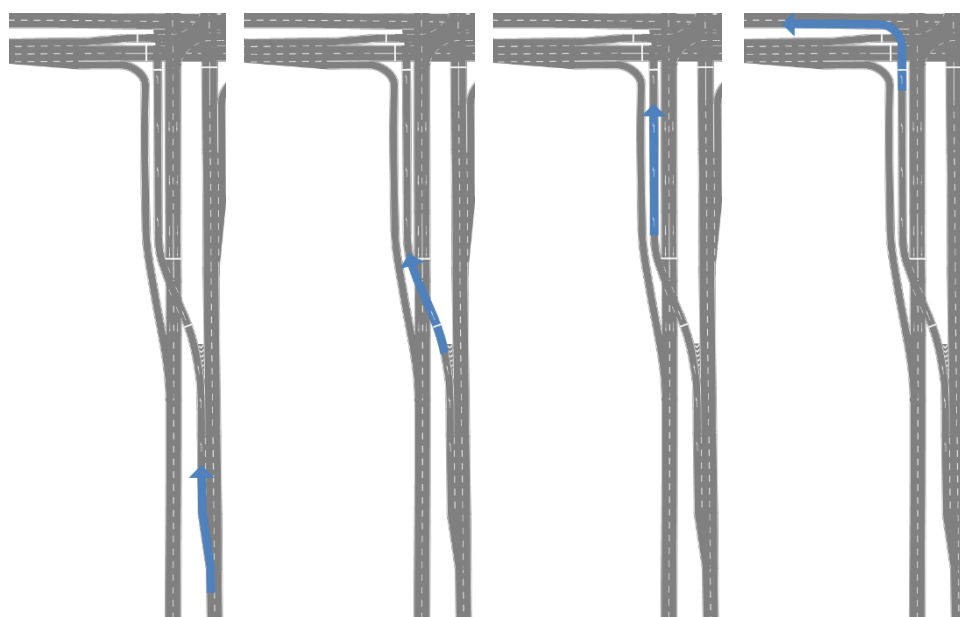
## Udvikling i transportarbejde under Covid-19



Figur 3: Udvikling i transportarbejde for alle transportformer under covid19. Rød markerer nedlukninger. [Vejdirektoratet, 2021b]

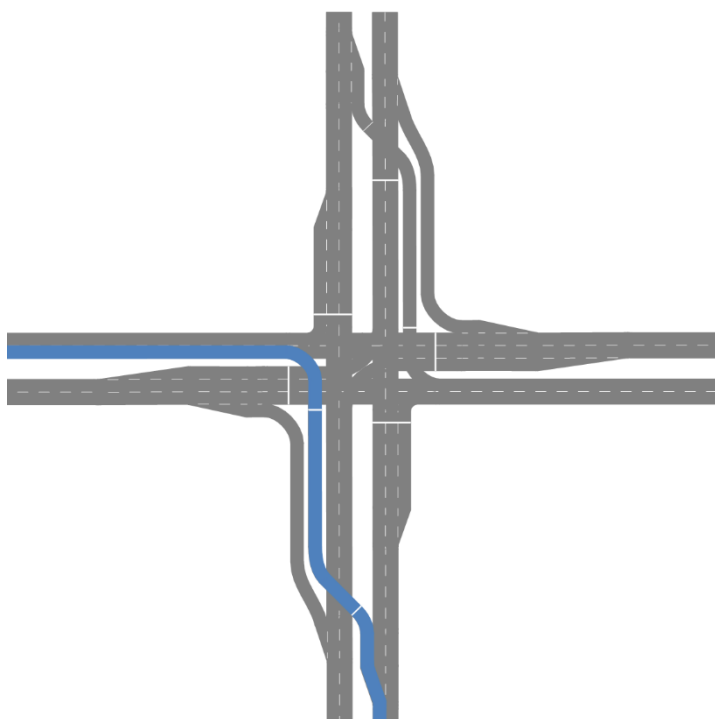
### Udenlandske løsninger

Trængsel og massive forsinkelser er et problem i de fleste større byer, blandt andet i USA, hvor flere storbyer konsekvent rangerer blandt de top-50 mest trængselsbelastede byer på globalt plan [Inrix, 2020]. Som følge heraf har alternative krydstyper længe været et anvendt værktøj til at øge afviklingen i trængselsprægede knudepunkter i USA. Alternative krydstyper dækker over en lang række krydstyper og udformninger, som anvendes under forskellige forudsætninger og forskellige situationer. En af de mest lovende krydstyper til at øge kapaciteten i større kryds i niveau er den såkaldte 'Displaced Left Turn intersection' (DLT) – forskudt venstresvingkryds på dansk. I en DLT for adskilles venstresvinget fra ligeud- og højre-bevægelser i et separat kryds (førkryds) og ledes på venstre side af modkørende færdsel, og fortsætter herefter til næste kryds (hovedkryds), hvor både venstresvingende og ligeudkørende afvikles samtidig. Opbygning er vist på figur 4.



Figur 4: De fire manøvre i forbindelse med et venstresving i en partiel DLT set oppefra. Skitseringen er illustrativ og ikke målfast.

Der findes en række forskellige konfigurationer af DLT-anlæg, og geometriske overvejelser, der bør tilpasses til den enkelte lokation. Heraf er den partielle DLT, som vist på vist på figur 5, den mest udbredte.



Figur 5: Venstresving i en partiel, symmetrisk DLT markeret med blå.

De geometriske overvejelser dækker blandt over håndteringen af højresvingene, håndtering af cyklister og fodgængere og tilpasningen til trafikintensiteten i forhold til længde mellem før- og hovedkryds, antal spor og længden på svingbaner blandt andet.

Ved simultan afvikling af ligeudkørende og venstresvingende i hovedkrydset, reduceres antallet af faser og spildtid i forbindelse med rømning af krydset mellem faser. I en ideel situation, med sammenlignelige trafikinput i hver retning og med shunt for højresving, er to faser tilstrækkeligt. Resultatet af denne anderledes udformning er øget afvikling, mindre forsinkelse og øget middelhastighed, men kan også medføre flere stop.

Hvorvidt disse resultater kan opnås i praksis, er i høj grad betinget af tilstrækkelig samordning mellem før- og hovedkrydset og den optimale afstand mellem de to ud fra intensitet og fordeling. Netop metoder og modeller til at be-

stemme samordning og afstanden mellem før- og hovedkryds, med udgangspunkt i både balanceret og ubalancerede trafikinput, har været et dominerende fokuspunkt for forskningen.

## Problemanalyse

Kortlægningen af den hidtidige forskning på området er indsamlet og analyseret gennem et litteraturstudie. Anlæggelsen og definitionen af alternative krydstyper og forskning i disse er i høj grad blev udført i USA, hvilket også er gældende for DLT-anlæg. Trafikadfærden i USA og Danmark adskiller sig fra hinanden, men er mest sammenlignelig af de øvrige områder og regioner, hvor DLT-anlæg samtidig er markant mindre udbredt.

DLT-anlæg som koncept blev patenteret i starten af 90'erne af Francisco Mier, der efterfølgende fik bevilget midler til at anlægge et anlæg på Long Island i New York. Herefter startede forskningen og undersøgelserne af, hvorvidt Miers fremsatte teser omkring operationel effektivitet kunne opnås, og under hvilke forudsætninger det mest optimale anlæg geometrisk kunne anlægges.

Søgningen skete i fire databaser via 17 søgeord i kombination med anvendte forkortelser for denne type anlæg. Der filtreres ikke på hverken alder eller type, da der ønskes det bredest mulige udgangspunkt til at analysere al relevant forskning og historikken heraf. Totalt blev 1.887 kilder og 233 unikke kilder identificeret. Dette blev i filtreret for relevans og tilgængelighed som resulterede i 45 anvendelige kilder. Alle kilder er at finde i specialet tilgængeligt gennem AAU-projektbiblioteket, og indgår ikke i denne artikel.

## Resultater

De 45 kilder i litteraturstudiet kan inddrages i to kategorier; *direkte og indirekte anvendelige kilder*. 23 kilder identificeres som direkte anvendelige, og omhandler geometrien, udformningen og modellering af krydstypen, og beskriver generelt *hvordan* anlægget skal udformes og styres. 22 kilder kategoriseres som indirekte anvendelige kilder og behandler eksempelvis trafikikkerhed og indeholder sammenligninger med andre krydstyper, og beskriver dermed *hvorfor* krydstypen kan være særlig gavnlig.

Sammenhænge i en DLT blev først undersøgt af 'Federal Highway Administration' (FHWA), som svarer til Vejdirektoratet i Danmark. Simple modeller og en omfattende følsomhedsanalyse blev udarbejdet, som dannede grundlag for flere projekter efterfølgende. Det var dog nødvendigt med yderligere analyser, hvorfor fokus i denne periode, primært omhandlede undersøgelser af kapaciteten af enkelte spor og strømme samt indvirkningen af længden af DLTL. [Jagannathan og Bared, 2004; Zhao et al., 2010; Yang et al., 2013]

Udviklingen af modeller, herunder udviklingen af et softwareprogram, fortsatte, til bedre at estimere kølængder og forsinkelse med konstant eller manuel manipulation af geometrien. Dertil blev signalprogrammet fortsat optimeret gennem software, der ikke var beregnet til alternative krydstyper eller gennem 'trial-and-error'. Senere introduceres progression som kriterie for at sikre mere effektiv afvikling og færre stop. Dette medfører større krav for samordning og optimering af signalanlægget, for at tage hensyn til dette kriterie og fluktuationer i kørselsmønstre. Herigennem vurderes en venstresvingsprocent på 25 - 40% af mængden af gennemkørende trafik, at give den bedste afvikling ved høje trafikintensiteter. [Yang og Lu, 2011; Xiaoming You, 2013; Zhimiao et al., 2019; Qi et al., 2020; Qu et al., 2021]

I en periode anvendes programmering som værktøj til optimering af modeller og begrænsninger med det formål at opnå et optimeret signalprogram under varierende mængder trafik, venstresvingsprocent og geometrisk opbygning - herunder længden af DLTL. Dette viser sig væsentligt mere afbalanceret og effektivt end optimering af signalanlæg ved hjælp af software. [Zhao et al., 2015; Yang og Cheng, 2016; Yang et al., 2016; Sun et al., 2015]

Løsninger med implementering og prioritering af bløde trafikanter i DLT-anlæg, både med og uden hensyn til øget forsinkelse for motorkøretøjer, undersøges ligeledes. Dette sker gennem optimerede modeller med varierende mængder trafik i forskellige DLT-konfigurationer, hvor udformningen af fodgængerfaciliteter varieres. [Jiang og Gao, 2020; Zhao et al., 2019; Jagannathan og Bared, 2005; Coates et al., 2014; Wang et al., 2019; Roupail et al., 2020, 2021]

Inden for de seneste år anvendes andre modeller og metoder til at udformningen og optimeringen af DLT-anlæg. Dette omfatter blandt andet en omfattende deterministisk model, der kan anvendes til beregningen af længden af DLTL, baseret på en omfattende følsomhedsanalyse, hvor en lang række parametre varieres - uden behov for kontrol gennem simulering. Der anvendes ligeledes programmering til to modeller, der udarbejdes ud fra to grupper af kriterier; optimeret allokering af grøntid og minimering af forsinkelse og kødannelse. Den efterfølgende sammenligning viser lignende resultater, hvorfor begge typer metoder kan anvendes. [Carroll og Lahausen, 2013; Suh og Hunter, 2014]

Sidst anvendes entropi til at vurdere den optimale længde af DLTL ud fra både den operationelle effektivitet og udledning af drivhusgasser, brændstofforbrug og sikkerhed, gennem en Surrogate Safety Analysis Model (SSAM). Der undersøges forskellige resultater, men en længere DLTL er generelt at foretrække ved højere trafikmængder fra alle retninger. [Pan et al., 2021c, b]

## Problemidentifikation

Den hidtidige forskning dækker bredt angående teoretisk kapacitet og operationel effektivitet i DLT-anlæg med konstant og varierende geometri i spidsbelastningsperioder for motorkøretøjer. Herigennem blev en række kriterier defineret, under hvilke en DLT opnår højest mulig afvikling, lavest forsinkelse og færrest stop. Disse er defineret nedenfor:

- Mindst 5.000 indkørende motorkøretøjer i spidstimen
- Mellem 25-40% venstresvingende i forhold til ligeudkørende
- Længde af forskudt venstresvingsbane på 140-200 meter
- Mindre betydeligt antal højresvingene
- Få og helst ingen bløde trafikanter
- Lang afstand til andre signalregulerede kryds, gerne over 800 meter

På baggrund af analysen af de direkte anvendelige kilder, identificeres fire problematikker med den nuværende forskning på området. Disse problematikker kan konkretiseres til nedenstående fire punkter:

- *Manglende anvendelse og evaluering af modeller i perioder med lavere eller minimal trafikbelastning samt tilpasning af modeller til sådanne perioder:* Der mangler derfor klarhed omkring resultater og konsekvenser af afvikling i løbet af et helt døgn og adaptive eller fleksible modeller til at håndtere perioder med både høj og lav belastning.
- *Manglende optimering af kombineret afvikling for motorkøretøjer og bløde trafikanter samtidigt, herunder i perioder med lav eller minimal trafikbelastning:* Flere modeller, hvor bløde trafikanter indgår, prioriterer enten motorkøretøjer eller bløde trafikanter, hvorfor kombineret afvikling ikke optimeres for alle parter.
- *Manglende entydighed af den generelle ændring i trafiksikkerheden sammenlignet med konventionelle kryds og manglende hensyn til brugerens oplevelse af krydset:* Analyser af trafiksikkerheden giver tvetydige resultater, alt efter om få kryds i samme område eller flere kryds i forskellige sammenlignes med konventionelle kryds. Ligeledes indgår brugernes oplevelse af, holdning til og forståelse af anlæg som helhed og påkrævede manøvre ej heller i litteraturen.
- *Manglende overførbare erfaringer og principper fra USA til Danmark:* Forskelle i vej- og trafikforhold mellem Danmark og USA gør det udfordrende at inddrage erfaringer, herunder design- og trafiksikkerhedsmæssige, i den praktiske implementering og projektering af DLT-anlæg i en dansk kontekst.

## Formål

Det overordnede formål er at bygge videre på den eksisterende viden om DLT-anlæg, herunder med fokus på relationen til og anvendelse af den udviklede model i virkeligheden. Dette sker gennem nedenstående punkter, som dels er en løsning på nogle af de opstillede problematikker fundet i litteraturstudiet, og dels relaterer sig til implementeringen af DLT-anlæg i en dansk kontekst.

Da formålet omkring denne nye krydstype, foruden identifikation af udfordringer eller mangler i nuværende forskning, er at undersøge mulighederne for og forsøg på implementering af krydstypen i Danmark, opstilles følgende fire punkter:

- Udvikling af en almenyldig, fleksibel og adaptiv simuleringsmodel til optimering af signalstyring med varierende trafikbelastning.
- Optimering af kombineret afvikling af motorkøretøjer og bløde trafikanter med variable geometrier.
- Undersøgelse af brugeroplevelsen i DLT-anlæg og tiltag til forøgelse heraf.
- Praktisk implementering og projektering af et DLT-anlæg samt evaluering af effekter og konsekvenser heraf, sammenlignet med et større eksisterende kryds i Danmark.

## Brugerundersøgelse

### Metode

Spørgeskemaets formål er at undersøge, hvorvidt manøvreringen gennem krydset var forståelig og intuitiv, samt hvilket vejudstyr respondenterne anvender og niveauet af utryghed ved at have modkørende på højre side. Spørgeskemaet er delt i to dele; syv personlige spørgsmål om respondenterne og fire situationer i forbindelse med et venstresving gennem krydset. De personlige spørgsmål om respondenterne anvendes til kategorisering af grupper i en k-means clusteranalyse i statistikprogrammet R med udgangspunkt i holdningen og håndteringen af de enkelte situationer. Clusteranalysen anvendes til at undersøge, hvorvidt der bør tages hensyn til nogle udvalgte befolkningsgrupper i udformningen, så alle føler sig mest muligt trygge gennem krydset. I de fire situationer præsenteres respondenterne for et screenshot fra en vissim-model, som sad respondenterne i en bil og skulle træffe beslutningen om den rigtige manøvre, og hvilket vejudstyr der var særligt vigtigt for beslutningen. Her anvendes i særlig grad en Likert-skala med fem svarmuligheder.

Der anvendes en  $\chi^2$ -test til at få et indtryk af, hvilke karakteristika der især er afgørende for tryghed og hvilken type vejudstyr (skiltning, vejafmærkning, vejens forløb, signalanlæg), der anvendes i manøvreringen. Derefter anvendes enkelt-faktor variansanalyse til at undersøge, hvorvidt grupperne fra klyngeanalyse er forskellige fra hinanden. Til bestemmelse af det optimale antal klynger anvendes dels 'albue-metoden' samt en vurdering af forskelligheden af klynger afhængigt af antal.

Spørgeskemaet udformes, så respondenterne kan komme med forbedringsforslag. Der er derfor ikke opstillet særlige foranstaltninger, som kunne være behjælpelig, for eksempel afskærmning mod modkørende på højre side mellem før- og efterkrydset eller særlig tydelig afmærkning og lignende.

## Resultater

Totalt indsamles 600 unikke besvarelser, hvoraf 489 anvendes til fire forskellige analyser:

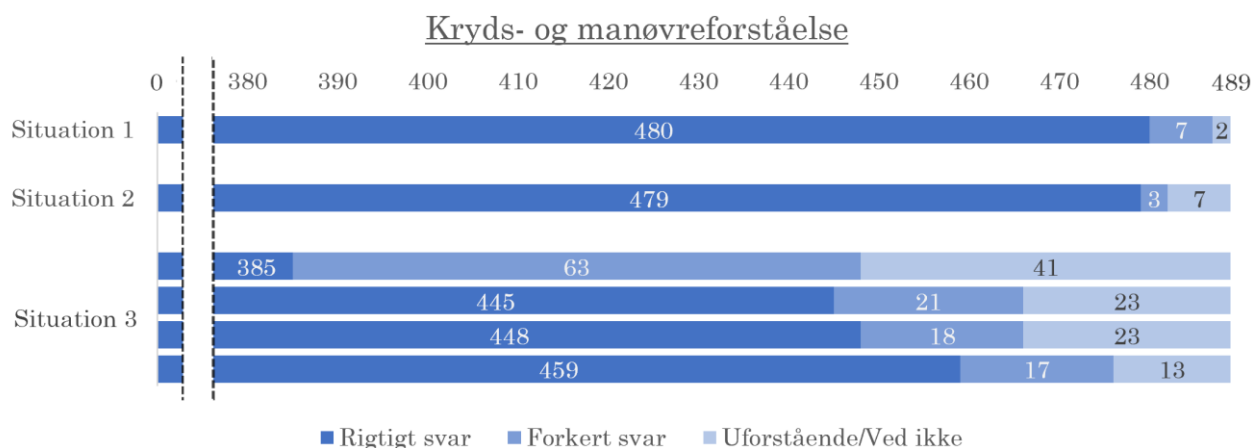
- Deskriptiv statistik - herunder repræsentativitet
- Kommentaranalyse
- Utryghedsanalyse
- Klyngeanalyse

### Deskriptiv statistik og repræsentativitet

Der blev opnået en sammenlignelig blanding af mænd og kvinder i spørgeskemaet sammenlignet med fordelingen på landsplan. Det samme er ikke gældende angående alder, hvor en overvejende mængde unge skævrider fordelingen sammenlignet med fordelingen i hele Danmark. Dette skyldes, at spørgeskemaet blandt andet blev distribueret blandt ansatte og studerende på BUILD.

Grundet antagelige forskelle omkring køreegenskaber mellem personer i storbyer og i mindre landsbyer spørges ind til både kommune, og hvorvidt majoriteten af antal kørte kilometer sker i byen eller på landet. Her opnås en generelt bred fordeling over hele landet, med særligt mange besvarelser i kommuner med personlig relation. Derudover har en overvejende del af respondenterne ganske meget køreerfaring, både angående tid med kørekort, antal dage som fører og antal kørte kilometer. Generelt dækkes et repræsentativt udsnit af befolkningen – med undtagelse af aldersfordelingen, og tilhørende følger i efterfølgende analyser.

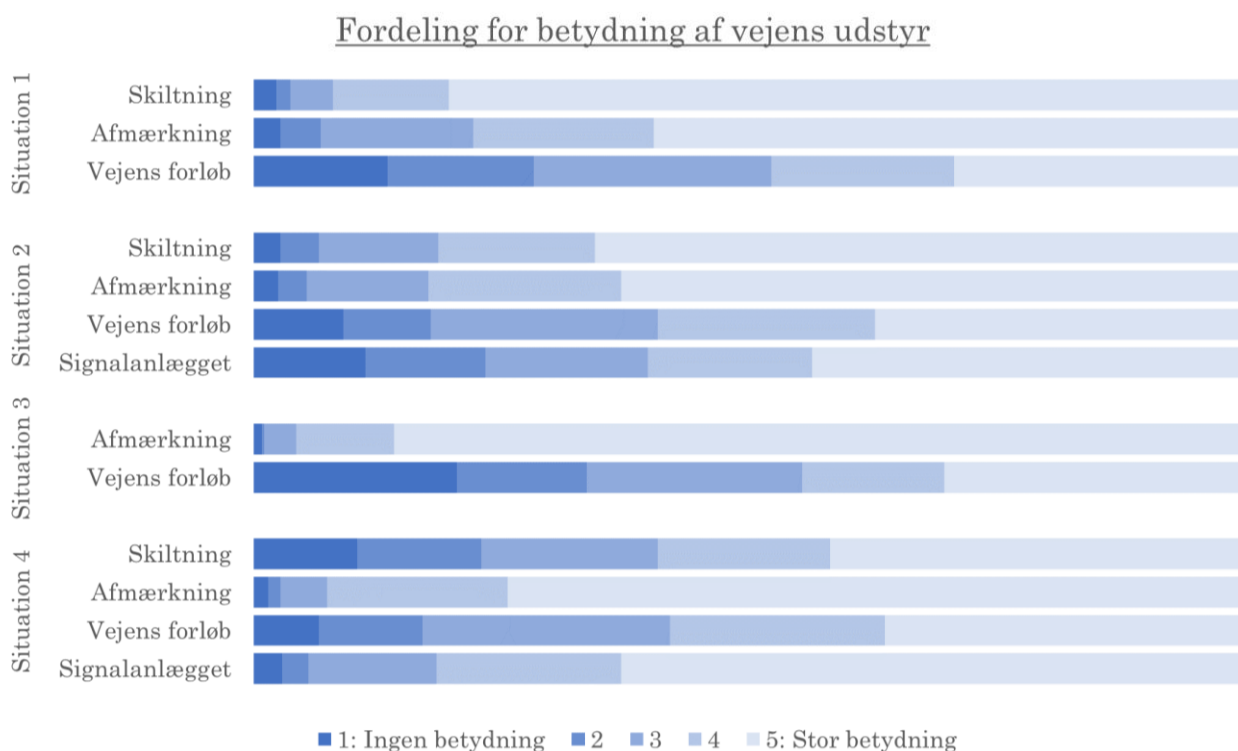
Hvad angår manøvreforståelse svarer et fåtal forkert eller forstår ikke den påkrævede manøvre. Dette er vist på figur 6. Spørgsmålet med lavest score er dog hvorvidt modkørende skal være på højre side, hvor under 80% svarer korrekt. Altså er der generelt god forståelse af de påkrævede manøvrer – på nær hvor situationen adskiller sig fra vanlige situationer. Det må dog vurderes at omkring 80% er et ganske højt niveau, kompleksiteten af krydset taget i betragtning – dog med plads til forbedring.



Figur 6: Resultat af kryds- og manøvreforståelse for de tre første situationer præsenteret i spørgeskemaet. Rigtigt svar betegnes som den tiltænkte manøvre, mens forkert svar er de øvrige, utilsigtede muligheder.



Vejafmærkning og skiltning er de to mest anvendte typer vejudstyr i manøvreringen, efterfulgt af signalanlægget og vejens forløb. Dette er vist på figur 7.



**Tabel 7: Resultater omkring scores af betydningen af vejudstyr fordelt på situation.**

Respondenternes scores for betydning af vejudstyr kan være problematisk, da vejafmærkning og skilte kan overses under særligt krævende forhold, obstrueres under vejrlig og lignende. Det kan derfor være mindre hensigtsmæssigt, hvis de primære hjælpemidler er i størst risiko for at blive overset. Derfor kan vejens forløb og/eller tydeligheden og opmærksomheden af signalanlægget spille en mere aktiv rolle, til at øge forståelsen af krydset, dets udformning og hvilke manøvrer påkræves under venstresvinget.

### Kommentaranalyse

Af de 489 anvendelige, unikke besvarelser på spørgeskemaet, blev der skrevet i alt 80 kommentarer. Disse handler i høj grad om forbedringsmuligheder til krydstypen, med formål at øge trygheden og lette manøvreringen. Afskærmning på strækningen mellem før- og hovedkrydset blev forslået, dels til afledning mod modkørende på højre side og blanding af asymmetriske forlygter. Derudover er placering af vejudstyr og sikring af sikker manøvrering under mindre ideelle forhold blandt de oftest nævnte forbedringsområder.

### Utryghedsanalyse

Utryghedsanalysen er delt i en  $\chi^2$ -test til at indikere, hvilke parametre forventes at være udslagsgivende for trygheden og klyngeanalysen, hvor respondenterne inddeles i fire grupper, med hver deres karakteristika. I testen betegnes respondenterne som utrygge (meget utryg, lidt utryg) og ikke utrygge (hverken tryg eller utryg, lidt utryg, meget tryg), for at have en 0/1-variabel og testes for de forklarende variable. P-værdierne for alle karakteristika er vist på tabel 1.

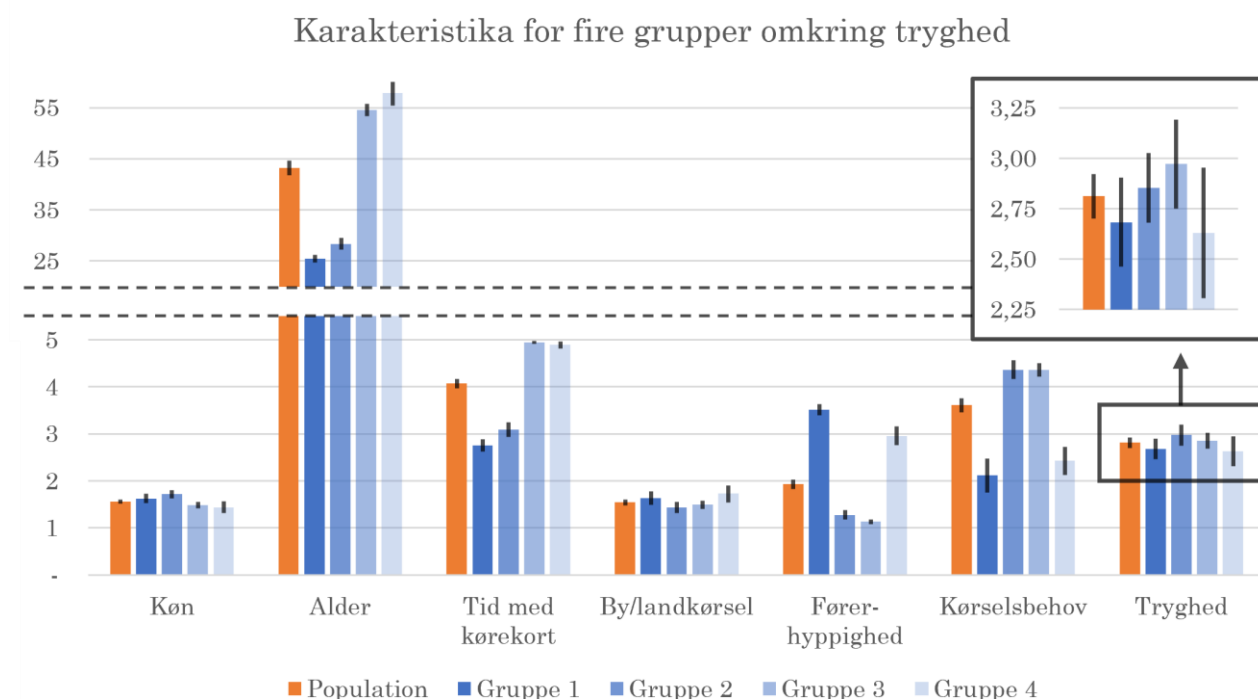
	Obs.	DF	P-værdi	H0	H1
Køn	483	1	0,001		x
Alder*	489	3	0,98	x	
Tid med kørekort	489	4	0,08	x	
By-/landkørsel	431	1	0,12	x	
Førerhyppighed	489	4	0,005		x
Kørselsbehov	473	5	0,012		x

**Tabel 1: Resultater af  $\chi^2$ -test omkring tryghed.**



Ud fra  $\chi^2$ -testen forventes, at især køn og køreerfaring kan være udslagsgivende i oplevelsen af utryghed. Samtidig antydes tid med kørekort og by-/landkørsel ligeledes til at kunne spille en rolle, men for disse accepteres nulhypotesen om ensartethed dog. P-værdien for alder er nær 1,0, hvorfor alder ikke er en faktor i oplevelsen af utryghed.

Efterfølgende udføres klyngeanalysen med fire klynger. Resultaterne heraf er vist på figur 8.



Figur 8: Resultater af fordeling af karakteristika for hver gruppe og populationen angående tryghed.

Tryghedsniveauet varierer mellem de fire klynger, men konfidensintervallerne for hver gruppe overlapper i bredt omfang. Der antydes nogen sammenhæng mellem køn og køreerfaring, men dette afkræftes af variansanalysen, hvor der opnås lighed mellem tryghedsniveau både ved individuel sammenligning og samlet set. Det må derfor bekræftes, at der ikke er nogen af de fire klynger, der adskiller sig med hensyn til tryghed.

En enkeltfaktor anova-analyse anvendes til at undersøge hvilke grupper parvist er forskellige og hvorvidt alle grupper er forskellige. Resultatet heraf er vist på tabel 2. Røde felter markerer p-værdier under 0,01, orange markerer p-værdier mellem 0,01 og 0,05, lysegrønne felter markerer p-værdier mellem 0,05 og 0,1, mens grønne felter markerer p-værdier over 0,1.

Overlappet for de fire forskellige grupper ses med tydelighed på variansanalysen, hvor der ses lighed blandt alle sammenligninger parvist og alle grupper sammenlignet med hinanden. Størrelsen af p-værdien varierer alt efter parvise sammenligning, men det er ikke entydigt, hvilke parametre og i hvilket omfang disse påvirker p-værdien og dermed niveauet af tryghed for den enkelte gruppe.

	Tryghed						TH
	Køn	ALD	TK	BLK	FH	KB	
1-2	0,02	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,25
1-3	0,18	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,07
1-4	0,02	0,00	0,00	0,43	0,00	0,23	0,78
2-3	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,95	0,42
2-4	0,56	0,01	0,09	0,01	0,00	0,00	0,21
3-4	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08
Alle	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,20

Tabel 2: Resultat af variansanalyse omkring tryghed.

## Klyngeanalyse

Med samme metode undersøges mulige sammenhænge mellem forklarende variable for fire klynger for hver af de fire situationer og tilsvarende besvarelser omkring brugen af vejudstyr til manøvrering af venstresvinget i DLT-anlæg. Klyngeanalysen deles per situation, da det antages at respondenternes opfattelse og besvarelser i højere grad varierer med hver situation end vejudstyrstype.

Generelt antydes en relation mellem køn, køreerfaring og scores desuagtet af situationen, med en mindre påvirkning af by-/landkørsel. I variansanalysen afkræftes eventuelle sammenhænge, da der her ikke bekræftes signifikante relationer mellem forklarende variable og scores. Ligeledes er antallet af respondenter i de enkelte klynger for hver situation forskellig, hvilket ligeledes forværrer muligheder for sammenligning uden bias eller skævvridning. Resultatet er dermed noget nær det samme som for tryghed; scores på baggrund af karakteristika antyder en sammenhæng, som ikke bekræftes gennem variansanalysen. Dog ses ikke at scores er uafhængige af alle forklarende variable.

## Modellering

### Modelopsætning

Til modelleringen af DLT-anlæg på både teoretisk og praktisk plan, er der nogle almenlydige geometriske og simuleringsmæssige hensyn. Dette indbefatter faciliteter for bløde trafikanter, vejbredder, radier, længde af svingbaner samt håndteringen af højresving hvad angår geometriske hensyn, og opsætningen af VISSIG, VISVAP og Vissim i sig selv med henblik på simuleringskonfiguration, kalibrering og evalueringsparametre.

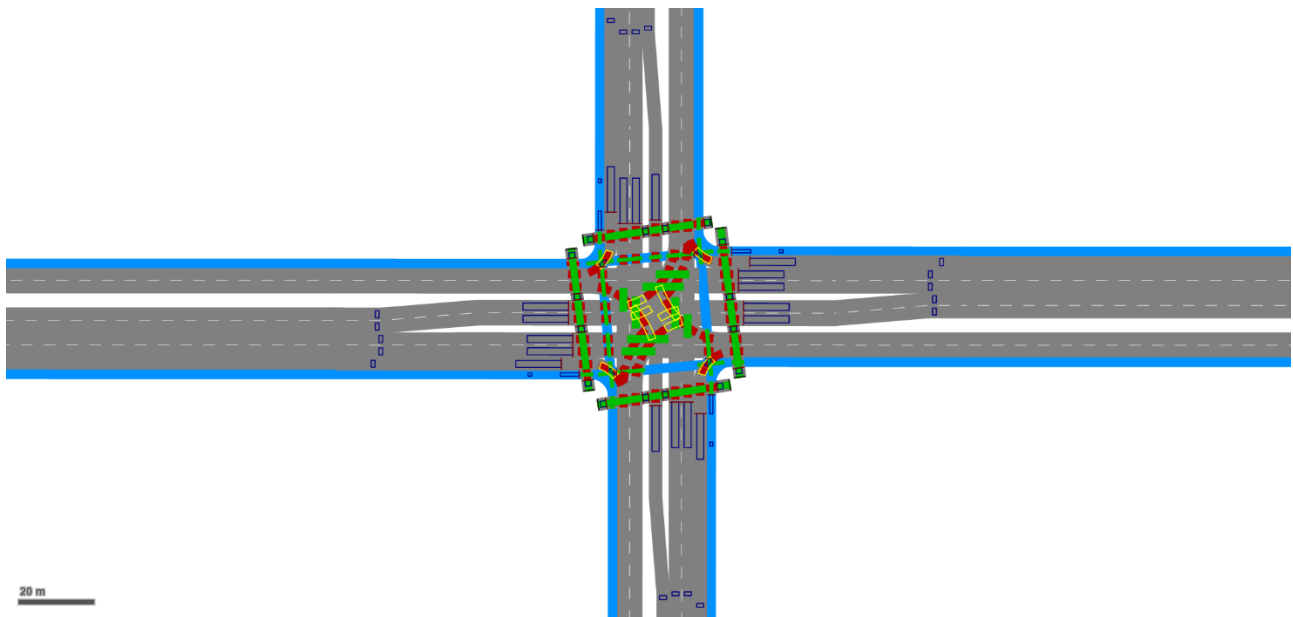
Af simplicitetsårsager laves én version af et trafikstyret signal for hver af de fire modeller; teoretisk og praktisk DLT samt teoretisk konventionel og Chokoladekrydset ved Ballerup. Heraf sammenlignes de to teoretiske modeller til at indikere potentialet for tidsmæssige besparelser under forudsætning af varierende mængder trafik, herunder bløde trafikanter og fordelinger af alle trafikanttyper. Ligeledes sammenlignes den nuværende udformning af Chokoladekrydset med en ombygning af dette kryds til en DLT, med de principielle geometrier fra den generelle modelopsætning og med trafiktal fra Vejdirektoratet.

For hver model bestemmes signalstyringen ud fra vurderingen af trafikmængde for den enkelte retning, med tilhørende allokering af faser, for at tilvejebringe en rimelig fordeling af grøntid. Herefter laves en simpel VISVAP-logik til håndtering af faseskift. I de teoretiske modeller anvendes balancerede trafiktal i alle scenarier, hvorfor der haves færre faser og et mere simpelt system, mens der i den praktiske modellering anvendes 14 forskellige faser for den praktiske DLT, mens vissim-modellen og signalstyringen for Chokoladekrydset blev udleveret af Vejdirektoratet.

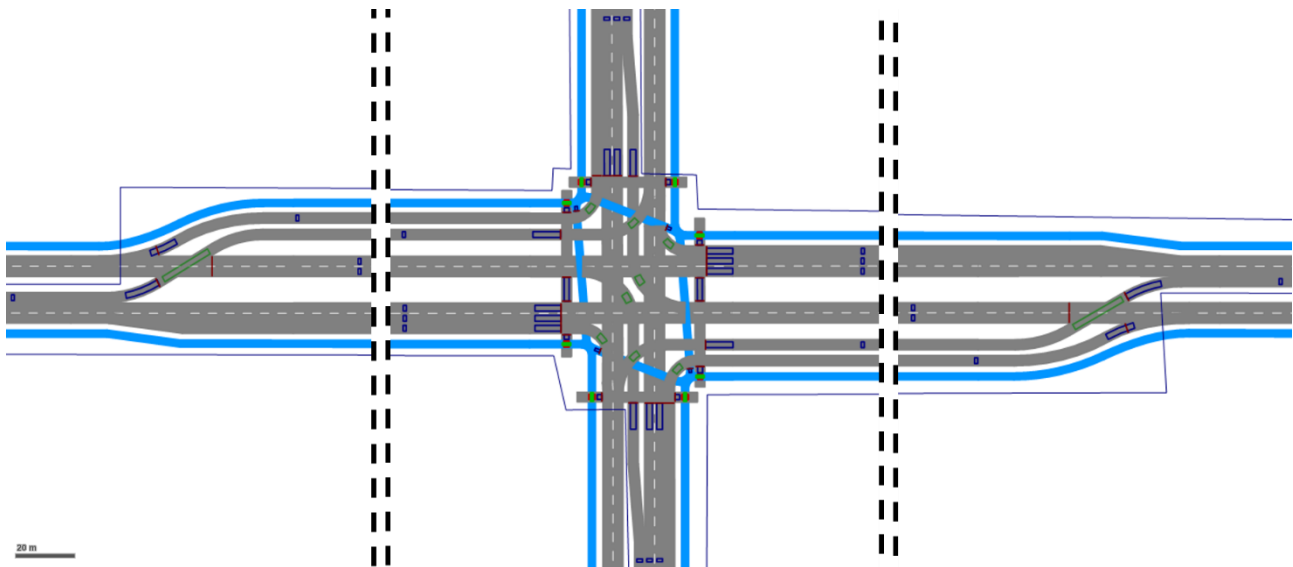
Der fokuseres i simuleringen på tre typer afviklingsparametre: Forsinkelse, antal stop og kølægnede. Data analyseres både for hele netværket, de enkelte strømme og de enkelte køretøjer i de enkelte strømme.

### Teoretisk modellering

Grundet udfordringer med simuleringen, har det ikke været muligt at køre simuleringen af få resultater fra den konventionelle udformning. Den teoretiske DLT kunne simuleres, men resultaterne heraf vurderes til ikke at være retvisende, grundet en mindre optimeret VISVAP-logik. Dermed haves ikke et retvisende billede af potentialet for krydstypen på teoretisk plan, ligesom det ikke er muligt at sammenligne den konventionelle løsning med et DLT-anlæg. Udformningen af de to teoretiske modeller er vist på figur 9 og 10.

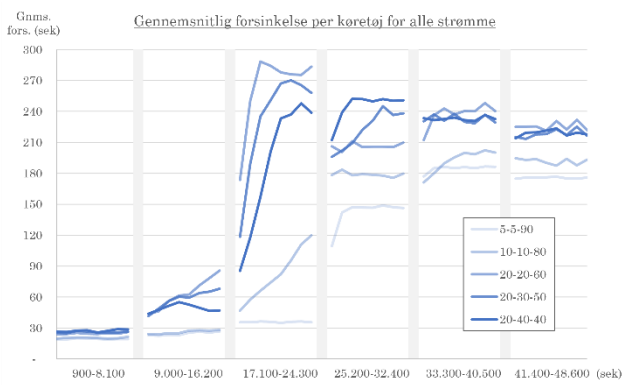


Figur 9: Udformningen af det konventionelle, teoretiske kryds.

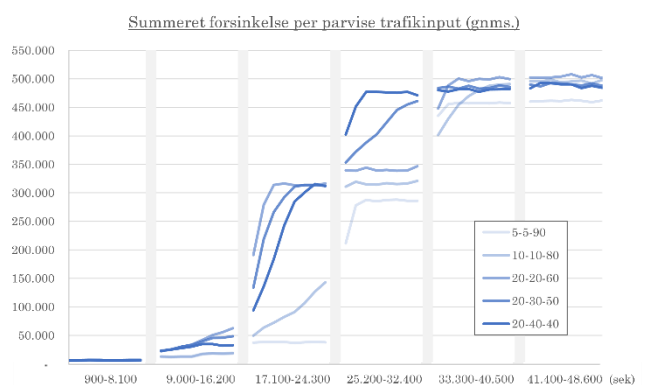


Figur 10: Udformningen af den teoretiske DLT. Den forskudte venstresvingsbane er punkteret, da længden i modellen er 220 m.

Udvalgte resultater i den teoretiske DLT med trafikstyrede signal i VISVAP er vist på figur 11 og 12.



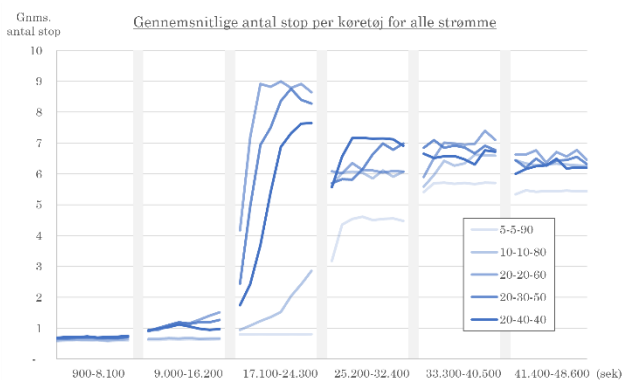
Figur 11: Forsinkelse per køretøj for alle strømme



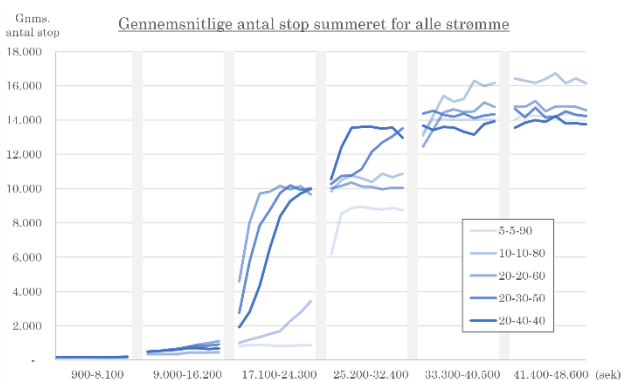
Figur 12: Summeret forsinkelse for alle strømme.

På figur 11 og 12 ses generelt en klar stigning i forsinkelse ved det tredje og fjerde trin angående trafikinput, uanset fordeling, med nogle forbehold og generelt et højt niveau på nær fem minutter per køretøj og plateau omkring 180 til 210 sekunder. Der ses samtidig en nedgang og stagnering af forsinkelsen per køretøj i efterfølgende trin. En stagnering ses ligeledes efter fra trin 5 og 6 angående den summerede forsinkelse. Der forventes hver nedgang eller stagnering af forsinkelsen, hvorfor ovenstående skal ses med forbehold.

Tilsvarende ses udviklingen i antal stop per køretøj og summeret for alle strømme på figur 13 og 14.



Figur 13: Antal stop per køretøj for alle strømme

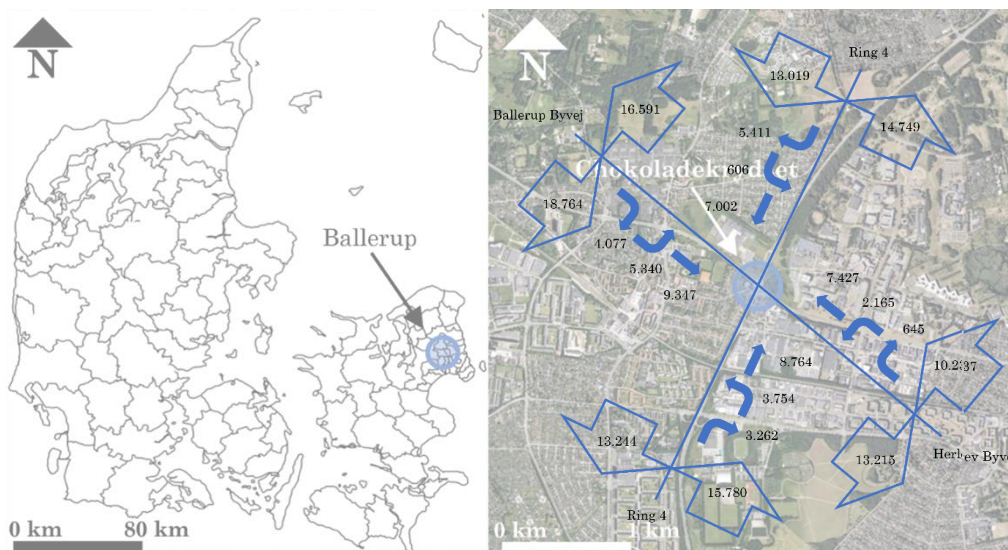


Figur 14: Summeret antal stop for alle strømme.

Den generelle udvikling i antal stop stemmer i høj grad overens med figur 11 og 12 omkring forsinkelse, men niveauerne er langt højere, end hvad der bør accepteres i forbindelse med DLT-anlæg. Resultaterne vurderes derfor i bredt omfang ikke at være retvisende for potentialet af partielle DLT-anlæg på teoretisk plan. Præsentationen af resultater skal derfor ses som et eksempel på, hvordan den operationelle effektivitet af krydstypen kunne vurderes.

### Praktisk modellering

I den praktiske modellering udpeges Chokoladekrydset i Ballerup som projektllokation, da det er blandt de kryds i niveau der ser flest motorkøretøjer, og der samtidig findes omfattende trængselsproblemer både om morgenen og eftermiddagen. De fire ben i krydset er Ballerup Byvej, som fører mod Frederikssund, Herlev Byvej, som fører ind mod København, og Ring 4. Strækningen er den mest direkte vej mellem København og Frederikssund. Placeringen af krydset og antal indkørende per hverdagsdøgn i 2019 er vist på figur 15.



Figur 15: Placering af Chokoladekrydset, og indkørende trafik per hverdagsdøgn i 2019. Data tilvejebragt af Vejdirektoratet.

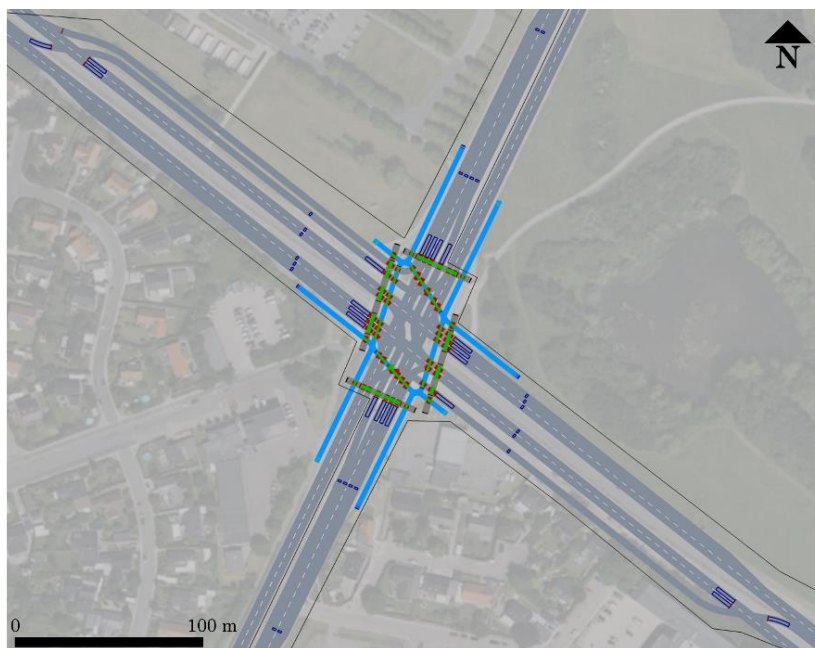
Ud fra observationer og data ses regelmæssigt kølængder på 1.200 til 1.500 m på ring 4 fra sydlig og nordlig retning, og flere hundrede meter kø i øst-vest-retningen også. Signalstyringen i krydset blev tilpasset i 2019 for at afhjælpe udfordringerne, hvorfor en Vissim-model blev udarbejdet til at evaluere effekterne. Denne model danner baggrunden for sammenligningen med effekten af ombygning til DLT-anlæg i krydset.

Krydset er valgt som eksempel, med det formål at evaluere den praktiske implementering af DLT-anlæg, og skal ikke ses som et reelt løsningsforslag på lokationen. Dette skyldes dels, at den kommende etape 3 af Frederikssundsmotorvejen ændrer trafikmønstrene i krydset, såvel som en udbygning af Ring 4 mellem Ballerup C-afkørslen og Hillerødmotorvejen øger kapaciteten af strækningen.

### Resultat af praktisk modellering

Der har ligeledes været udfordringer med simuleringen af den praktiske DLT som løsning på trængselsudfordringerne i Chokoladekrydset i Ballerup. Den almenlydige model for hele døgnet, med simultan optimering af afviklingen for både motorkøretøjer og bløde trafikanter medførte en kompliceret VISVAP-logik med i alt 14 faser, med fire forskellige 'ruter' til optimeret afvikling forskellige typer fordelinger og intensiteter i krydset. Dette viste sig mindre holdbart og unødigt kompliceret. Udformningen af den praktiske DLT er vist på figur 16.

Vissim-modellen for den nuværende udformning blev simuleret, for at sammenligne disse resultater med observationer på stedet, og at estimere kvaliteten og dermed sammenligningsgrundlaget mellem de to praktiske modeller.



Figur 16: Udformningen af den praktiske DLT på projektlukationen i Ballerup.

I den nuværende udformning ses kølængder på ikke over 500 meter i den nord-/sydlige korridor og minimal kø i øst-/vestkorridoren. Det må derfor vurderes, at modellen ikke er retvisende i forhold til de observerede kølængder, og den eventuelle sammenligning med et DLT-anlæg, ville derfor være påvirket af denne uoverensstemmelse, og kunne resultere i færre eller slet ikke positive effekter ved en ombygning.

### Diskussion

Litteraturstudiet giver en bredt og dybdegående indblik i historikken, udviklingen og nye muligheder for evaluering og forskning omkring DLT-anlæg. Det er dog tydeligt, at der forsat er temaer og områder, som er mere overset end andre, især i relation til optimal afvikling af både motorkøretøjer og bløde trafikanter såvel som evaluering af operationel effektivitet over en et døgn, så der kontinuerligt sikres et højt serviceniveau. Litteraturstudiet kan derfor danne grundlag for yderligere forskning i denne krydstype for fremtiden.

I de undersøgte kilder, har der ikke tidligere været udført et spørgeskema omkring holdningen eller forbedringsmuligheder til DLT-anlæg. Det vurderes at være ganske givende, og  $\chi^2$ -testen giver en indikation af, at mindre erfarne kvinder, der i overvejende grad kører mest på landet, bør der tages særligt hensyn til eller borgerinddrages i særlig høj grad i udformningen – til trods for der ikke belæg herfor i variansanalysen.



Resultaterne af klyngeanalysen skal anses med forbehold, dels grundet den anvendte metode med et subjektivt valg om antal klynger, og de matematiske processer bag inddelingen af respondenter, hvoraf en del respondenter minder om hinanden, og dermed besværliggør inddelingen uden klarer ligheder internt i klyngen og klarer forskellige mellem andre grupper.

Simulering og resultaterne heraf har ikke opfyldt forventningerne hertil, og kan ikke anvendes til at belyse potentialet omkring operationel effektivitet. Derudover bliver der netop i høj grad fokuseret som den operationelle effektivitet som succeskriterie. I en vurdering omkring hvorvidt og under hvilke forudsætninger en DLT bør anlægges i Danmark, er flere kriterier og muligheden for en vurdering heraf nødvendig, for at have et grundigt funderet fundament. Disse kriterier kunne eksempelvis være estimer af trafikikkerhedseffekter, udledning af potente gasser og i hvor høj grad bæredygtige transportformer kan fremmes i forbindelse med etableringen.

Den mest udbredte konfiguration blev undersøgt, men det må vurderes, at der kan være lokationer, hvor et ét-benet eller asymmetrisk DLT ville være mere egnede til de lokale mønstre og fordelinger. I forlængelse heraf, kan det teoretiseres at mindre DLT-anlæg kan gavnlige i situationer, hvor kriterierne omkring optimal afvikling er opfyldt med undtagelse af det totale antal indkørende.

## Konklusion

Litteraturstudiet afslørede et primært fokus på evaluering og optimering af den operationelle effektivitet af krydset – især på teoretisk plan, og mindre om realiserede effekter og optimal håndtering af både motorkøretøjer og bløde trafikanter samtidig. Herudover er resultaterne omkring trafikikkerhed tvetydige.

Det nogenlunde repræsentative spørgeskema viste samtidig, at langt størstedelen af respondenterne ikke havde udfordringer omkring manøvreringen af et venstresving gennem krydset, og havde samtidig flere brugbare forslag til forbedring af oplevelsen og trygheden i krydset. Der blev på baggrund af en klynge- og efterfølgende variansanalyse ikke identificeret en særlig gruppe, eller særlige personlige karakteristika, der var særligt udsatte i krydset, men dette blev antydnet gennem en  $\chi^2$ -test.

Grundet udfordring med simuleringen af flere modeller, var det ikke muligt svarer på problemformuleringen omkring sammenligningen og mulige besparelser mellem konventionelle kryds og DLT-anlæg, både på teoretisk og praktisk plan.

Overordnet set er muligheden for etableringen af DLT-anlæg blevet bekræftet, såfremt den operationelle effektivitet og andre afgørende succeskriterier undersøges yderligere, og potentialet på landsplan vurderes i den forbindelse. Det kræver dermed mere forskning og undersøgelser af, og simulering især, af forskellige løsninger til at be- eller afkræfte om DLT-anlæg kan indgå som en del af trængselsreducerende anlæg i vigtige trafikale knudepunkter.

## Fremtidig forskning

For nærværende anses yderligere analyse af potentielle samfundsøkonomiske besparelser og indvirkning af geometri på operationel effekt, herunder reduceret forsinkelse, udledning af drivhusgasser og analyser og vurdering af potentialet for reduktion af uheld i denne type kryds på dansk jord som nødvendige, førend DLT-anlæg bør overvejes som en mulig løsning i de mest belastede knudepunkter i Danmark. Derudover kan forudsætninger og forskellige anvendelsesmuligheder undersøges for de forskellige konfigurationer, især T-DLT- og ét-benede DLT-kryds.

Ydermere kan der udføres yderligere trafikikkerhedsmæssige analyser på baggrund af de allerede etablerede anlæg, for at give en indikation af hvorvidt der kan forventes flere eller færre uheld, og hvordan dette påvirker rentabiliteten af et eventuelt anlæg. Trafikkerheden kunne ligeledes vurderes gennem simulering af konflikter eller uheld gennem software, eksempelvis SSAM.

Som alternativ til ovenstående kan en estimering af omfanget af knudepunkter, hvor DLT-anlæg kunne være en løsning, være en alternativ retning, til at be- eller afkræfte, hvorvidt DLT-anlæg, kan eller bør etableres i Danmark. Dette kunne for eksempel udføres som en screening af de største kryds, og gennem analyser og/eller mikrosimulering opstille kriterier for, i hvilket omfang og under hvilke forudsætninger henholdsvis en DLT eller et konventionelt kryds er favorabel på de enkelte lokationer. Hvis kriterierne eller forudsætningerne bliver for specifikke og ufleksible, eller der ikke er plads eller behov for en DLT, kan det derved vurderes, hvorvidt der bør forskes yderligere i denne type kryds.

Derudover bør der forskes yderligere i trafikanternes håndtering og holdning til denne type kryds og eventuelle konkrete forbedringsmuligheder og holdningen til disse, idet der antydes en vis utryghed ved manøvrering gennem denne type kryds.

Kandidatspecialet, som denne artikel bygger på, bør derfor ses som grundlag for en samtale dels omkring DLT-anlæg herhjemme samt om potentialet i alternative krydstyper generelt, og i forlængelse heraf, hvorvidt der bør investeres og forskes yderligere omkring alternative løsninger på trængselsproblemer.

## Kildehenvisninger

**Vejdirektoratet 2021a**, Vejdirektoratet, Statsvejnettet 2021, [https://www.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/2021-11/Statsvejnettet%202021\\_WEB\\_1.pdf](https://www.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/2021-11/Statsvejnettet%202021_WEB_1.pdf), 2021

**Vejdirektoratet, 2021b**, Vejdirektoratet. Nøgletal om vejtransport, 2021.

**Inrix 2020**, Global Traffic Scorecard, 2021, <https://inrix.com/scorecard/>

*Kilder anvendt i litteraturstudiet kan findes i specialerapporten*