



ADAPTIV SIGNAL- STYRING I REALTID

Mikkel Færgemand
Kandidatspeciale, juni 2017
Veje & Trafik
Institut for Byggeri & Anlæg
Aalborg Universitet

**AALBORG UNIVERSITET**
STUDENTERRAPPORT

Institut for Byggeri & Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Ø
Telefon: 99 40 84 84
E-mail: civil@civil.aau.dk
<http://www.byggeri.aau.dk>

I samarbejde med institutter og partnere
under;



CENTER FOR DATA-INTENSIVE CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Titelblad

Titel: Adaptiv signalstyring i realtid
Projekttype: Kandidatspeciale
Nøgleord: Signastyring, radar, adaptiv, realtid, optimering, fremkommelighed
Projektperiode: 1. februar – 8. juni 2017
Omfang: 30 ECTS
Forfatter: Mikkel Færgemand
Vejleder: Harry Lahrmann
Censor: Jan Kildebogaard
Oplagstal: 3
Sidetal: 94
Appendiks: 5
Afsluttet: 8. juni 2017

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, hvorved offentliggørelse (med kildeangivelse) uden yderligere betingelser accepteres.

Synopsis

Dette projekt omhandler udviklingen af en ny og intelligent signalstyring som alternativ til den traditionelle signalstyring. Dette indebærer indledningsvist en gennemgang af traditionelle styreformer og signalstyringsprincipper. Ved anvendelse af nye principper inden for signalstyring samt objekt-detektering, som alternativ til traditionel punktdetektering, realiseres en intelligent og dynamisk signalstyring. Denne signalstyring forventes således, at kunne forbedre den overordnede trafikafvikling i og omkring de signalregulerede kryds.

Den forventede effekt af den intelligente signalstyring undersøges via mikrosimuleringer i programmet VISSIM. Dette gøres ved at sammenholde trafikafviklingen med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring.

På baggrund af mikrosimuleringerne er det dokumenteret, at den intelligente signalstyring realiserer en mere effektiv trafikafvikling. Således reduceres parametrene middelforsinkelse, kølængde, brændstofforbrug, antal stop samt den overordnede rejsetid betydeligt ved anvendelse af den intelligente signalstyring.

Abstract

In recent years, the traffic in the cities has increased significantly because of urbanization and a rising number of vehicles per inhabitant. The increasing traffic has caused congestion in the cities, which reduces the mobility and accessibility. This has led to an increased focus from the politicians, and the aim is to make the existing infrastructure more efficient. In this connection, the focus is at the signalized intersections because they set the limit of the capacity.

The aim of this project is to create a new and intelligent signal controller, which can execute the traffic efficiently compared to traditional signal control. First of all the traditional principles such as maximum green time, maximum cycle time, predefined order of signal phases and offsets between coordinated signalized intersection is replaced with one principle where the overall traffic situation is attempted optimized.

Despite the principles, a new detection technology is used in the project. Instead of detection in some given points towards the intersection, the new technology allows for a continuous object detection. With this technology, it is possible to calcu-

late the ETA (Estimated Time of Arrival), which is an essential parameter in the intelligent signal control.

The data from the continuous object detection is used in a mathematical tool, Uppaal Stratego. Uppaal Stratego use machine learning and the purpose is to optimize the overall traffic around the signalized intersections.

The project location is a major road in Aalborg, Denmark, called Hobrovej with six signalized intersections. The project contains a comparison of scenarios with the existing signal control and the intelligent signal control by using microscopic simulations in VISSIM. The scenarios are compared based on average delay, queue lengths, stops, fuel consumption and the overall travel time at the road.

The results based on the microscopic simulations show, that the intelligent controller provide a much more efficient execution of the traffic in the signalized intersections. Thus the average delay and the queue length is reduced by 27-54 % and 42-64 %, respectively. Furthermore, the intelligent signal controller reduce the fuel consumption and the number of stops in the signalized intersection. Additionally the overall travel time at Hobrovej is reduced.

Forord

Nærværende kandidatspeciale er udarbejdet af undertegnede, studerende på kandidatuddannelsen *Trafik & Veje* ved Aalborg Universitets Institut for Byggeri & Anlæg. Projektet omhandler nutidens traditionelle signalstyring og de uønskelige ulemper, der relaterer sig hertil. Som alternativ til den traditionelle signalstyring udarbejdes en mere intelligent signalstyring, hvor et opgør med traditionelle principper samt anvendelse af radardetektering og maskinlæring er essentielle, indgående elementer. Formålet med projektet er således at dokumentere et ukendt optimeringspotentiale i nutidens signalregulerede kryds, som ved realisering vil have betydelige gevinster for den enkelte trafikant og ikke mindst samfundet som helhed.

Projektet skal ses som en del af DiCyPS-samarbejdet, som er et tværfagligt projektsamarbejde, der sigter mod at skabe smarte og intelligente løsninger ved anvendelse af data og software. DiCyPS bygger på et tæt samarbejde mellem virksomheder og institutioner i såvel ind- og udland. I den forbindelse har der i henhold til projektet været en lang række af bidragydere, som i større eller mindre grad

har bidraget til projektet. Derfor rettes en stor tak til;

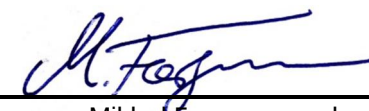
Rambøll
Aalborg Kommune
Aarhus Kommune
Aalborg Universitet (AAU)
Institut for Byggeri og Anlæg (AAU)
Institut for Datalogi (AAU)

I den forbindelse rettes en personlig tak til følgende personer:

Knud Knudsen (ITS Teknik)
Carsten Krogh (Aalborg Kommune)
Niels Thorup Andersen (Aalborg Kommune)
Ulrich Clausen (Aalborg Kommune)
Jakob Haahr Tankvist (Aalborg Universitet)
Marco Muñiz (Aalborg Universitet)
Chao Huang (Aalborg Universitet)
Kim G. Larsen (Aalborg Universitet)
Asbjørn Halskov (Aarhus Kommune)
Rolf Sode-Carlsen (Rambøll)
Stig Grønning Søbjerg (Rambøll)

En stor tak rettes til lektor og projektvejleder, Harry Lahrmann, som har været garant for inspirerende vejledning og konstruktiv kritik under hele kandidatspecialet, hvilket har højnet det faglige niveau.

En særlig tak rettes til Andreas Berre Eriksen, Ph.d.-studerende ved Institut for Datalogi på Aalborg Universitet. Andreas har fra projektsamarbejdets begyndelse været yderst engageret i projektets tilblivelse, hvor han med sin viden og kompetencer inden for maskinlæring har haft en helt central rolle i forhold til at udvikle den intelligente signalstyring. Andreas omfangsrige og indgående bidrag har således medvirket til at højne projektet kvalitet.



Mikkel Færgemand

Læsevejledning

Indeværende projektrapport udgør den skiftlige del af projektsamarbejdet, som sigter mod at dokumentere et ukendt optimeringspotentiale i dagens signalregulerede kryds. Som konsekvens af projektets tværfaglighed, hvor trafikplanlægning og datalogi indgår, kan dele af projektrapporten fremstå teknisk og til tider kompliceret. Projektrapporten henvender sig således til fagfolk, som i nogen grad har kendskab til signalstyring og/eller trafikplanlægning, og derved i mindre grad til almenheden uden fagkendskab til førnævnte områder. For at lette forståelsen i projektrapporten fremgår adskillige illustrationer. Dertil er tekniske begreber forklaret løbende, mens der indledningsvist er udarbejdet en ordforklaring med akronymer og begreber af teknisk karakter. Det anbefales derfor at gennemgå denne forud for gennemlæsning af selve projektrapporten. I projektrapporten afrundes flere beregninger med henblik på at skabe en mere læselig rapport. Alle decimaler er dog anvendt i selve udregningerne.

Der vil igennem projektrapporten optræde referencer, som alle er samlet i litteraturlisten i alfabetisk orden bagerst i rapporten. Til disse referencer benyttes Havard

metoden, som i teksten er angivet ved [forfatter, år]. I litteraturlisten er bøger angivet med forfatter, udgivelsesår, forlag samt ISBN-nummer. Internetsider angives med forfatter, årstal samt URL-adresse.

Tabeller samt figurer er nummereret i henhold til det aktuelle kapitel, eksempelvis figur 3.1 efterfulgt af 3.2 og så fremdeles i kapitel 3, hvor disse er suppleret af forklarende tekst. Såfremt der til disse ikke fremgår reference, er disse udarbejdet internt. Dog indeholder adskillige figurer data fra Geodatastyrelsen og Danske kommuner.

I projektrapporten præsenteres hovedtrækkene af det arbejde der er pågået i forbindelse med projektet. Mere detaljerede resultater findes ved henvisning til appendiks bagerst i rapporten.

Ordforklaring

Adaptiv signalstyring

et styresystem, som kontinuerligt og automatisk tilpasser signalstyringen til den reelle trafik i et givent område med henblik på at optimere trafikafviklingen.

C-ITS

Forkortelse for *Cooperative Intelligent Transportation Systems*.

Compass4D

Fælleseuropæisk C-ITS projekt, hvor V2I kommunikation testes i flere storbyer herunder København.

DiCyPS

Akronym for Center for *Data-intensive Cyber Physical Systems*, som er et projektsamarbejde mellem institutioner og virksomheder, der via data og software tilstræber at skabe smarte og intelligente løsninger.

Dilemmazonen

Dilemmazonen er en hastighedsafhængig afstand fra krydset, hvor bilisten ved signal-skift ikke vil kunne nå at passere stoplinjen for gult eller kunne nå at stoppe inden stoplinjen, hvorved bilisten foretager ubevidst rødkørsel.

DSRC

Forkortelse for *Dedicated Short-Range Communication*. Et- eller tovejs trådløs kommunikation.

GLOSA

Akronym for *Green Light Optimal Speed Advisory*. En funktion, som introduceres i forbindelse med SWARCO og Audis Traffic Light Assist.

Grøn bølge

En grøn bølge realiseres, hvis en samordning af flere signalanlæg medfører, at bilister kan gennemkøre de signalregulerede kryds uden stop ved konstant hastighed.

LTE

Forkortelse for *Long Term Evolution*. En standard for trådløs højhastighed kommunikation.

ETA

Forkortelse for *Estimated Time of Arrival*.

LHOVRA

Forkortelse for svensk strategi som indeholder lastbilmrioritering, hovedretningsprioritering, ulykkesreduktion, variabel mellemtid, rød kørselskontrol, alt rødt-vending.

MOTION

MOTION er et akronym for *Method for the Optimization of Traffic Signals In On-line*

Controlled Networks, hvilket er et adaptivt signalstyringssystem.

Offset-tid

Offset-tid er den forskydning i tid, der indlægges mellem samordnede signalanlæg, så den grønne bølge kan realiseres.

SCATS

SCATS er et akronym for *Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System*, hvilket er et adaptivt signalstyringssystem.

SCOOT

SCOOT er et akronym for *Split, Cycle and Offset Optimisation Technique*, hvilket er et adaptivt signalstyringssystem.

SPOT

SPOT er et akronym for *System for Priority and Optimisation of Traffic* og udgør det lokale niveau af det adaptive signalstyringssystem UTOPIA/SPOT.

Traffic Light Assist

Teknologi udviklet af SWARCO og Audi, hvor signalanlæg og køretøj kommunikerer, hvormed føreren kan eksempelvis få anvist en anbefalet hastighed frem mod grønt.

TRANSYT

TRANSYT er et globalt anvendt software-program, som anvendes til at evaluere og optimere et eller flere signalanlæg.

UTOPIA

UTOPIA er et akronym for *Urban Traffic Optimization by Integrated Automation*, som udgør det overordnede niveau af det adaptive signalstyringssystem UTOPIA/SPOT.

Valgzonen

Valgzonen betegner den hastighedsafhængige afstand fra krydset, hvor et køretøj ved skift fra grønt til gult både kan nå at standse ved stoplinjen samt køre over for gult.

V2I

Forkortelse for *Vehicle to Infrastructure*.

V2V

Forkortelse for *Vehicle to Vehicle*.

VANET

Forkortelse for *Vehicular Ad-Hoc Network*.

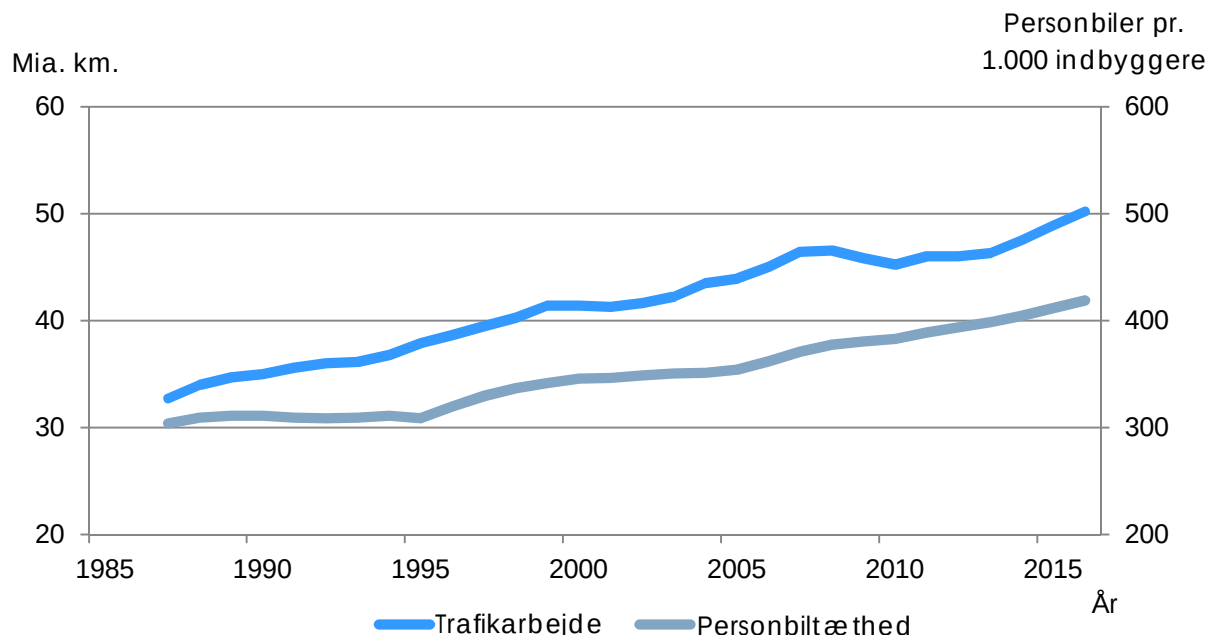
Indholdsfortegnelse

1. Projektbaggrund	1	7. Perspektivering	65
1.1 Signalanlæg og styreformer	3	7.1 Fremtidige projektarbejde	67
1.2 Adaptiv signalstyring	5	8. Litteraturliste	69
1.3 Detekteringsteknologier	8	Appendiks A - Litteraturstudie	75
1.4 Principper og procedurer	12	Appendiks B - Trafiktællinger	79
1.5 Alternative styringsprincipper og optimeringsmuligheder	13	Appendiks C - VISVAP	85
1.6 Opsummering	16	Appendiks D – Uppaal Stratego	89
1.7 Problemformulering	17	Appendiks E - Spoleplaner	91
1.8 Projektafgrænsning	19		
2. Metode	23		
2.1 Systematisk litteratursøgning	23		
2.2 Dataindsamling	24		
2.3 Databehandling	26		
2.4 Trafikmodellering	26		
2.5 Intelligent signalstyring	32		
3. Adaptiv signalstyring i realtid	35		
3.1 Projektlokalitet	35		
3.2 Intelligent signalstyring	42		
4. Resultatbehandling	49		
4.1 Resultatopsamling	58		
4.2 Samfundsøkonomi	58		
5. Diskussion	61		
6. Konklusion	63		

1 Projektbaggrund

De seneste 30 år er trafikarbejdet på det nationale vejnet steget kraftigt jævnt, som vist i figur 1.1. Således viser trafiktal fra 2016, at der blev kørt over 50 milliarder kilometer på de danske veje, hvilket svarer til en stigning på hele 53 % over en 30-årig periode fra 1987 til 2016. En af årsagerne til det stigende trafikarbejde findes sandsynligvis i, at personbiltætheden er steget 38 % i samme periode, hvor der i 2016 var indregistreret 419 personbiler pr. 1.000 indbyggere, hvilket ligeledes fremgår af figur 1.1. [Vejdirektoratet, 2017]

I forlængelse af den stigende trafik har behovet for signalanlæg også været stigende, da signalanlæg i mange tilfælde er en nødvendighed for at tilvejebringe en acceptabel fremkommelighed samt en høj trafiksikkerhed. Dette gøres ved at prioritere og tidsseparere de konfliktende trafikstrømme. Siden det første signalanlæg blev etableret i 1928, har der været en



Figur 1.1: Udviklingen i det nationale trafikarbejde (mia. km.) samt personbiltætheden (personbiler pr. 1.000 indbyggere). [Vejdirektoratet, 2017]

tilvækst af disse, hvor der i 2007 var omkring 2800 signalanlæg på landsplan. Hovedparten af disse findes i byområder og andre trafikerede områder. [Vejdirektoratet, 2012a]

Den stigende trafik har medført et øget fokus på trængsel, som også er kommet på den politiske dagsorden. Således nedsatte den daværende VK-regering i 2006 Infrastrukturkommissionen, som blandt

andet havde til formål at fremlægge løsningsforslag til håndteringen af langsigtede udfordringer på infrastrukturområdet. Modsat tidligere, hvor udvidelser har løst kapacitetsproblemerne, fremgår det af Infrastrukturkommissionens betænkning, at trængslen flere steder skal afhjælpes ved at optimere den eksisterende infrastruktur ved hjælp af ITS, da vejudvidelser og ny anlæg ikke er realiserbare i mange byområder. [Infrastrukturkommissionen, 2008]

Afledt af Infrastrukturkommissionens betænkning udgav den daværende VK-regering i 2008 transportplanen, *Bæredygtig transport – bedre infrastruktur*, som skulle sikre en bedre udnyttelse af den eksisterende infrastruktur. I den forbindelse blev der afsat 600 millioner kroner til etablering og anvendelse af ITS. [VK-regeringen, 2008]

At den stigende trafik og de heraf afledte udfordringer har fået politisk opmærksomhed, er også eksemplificeret ved den omdiskuterede betalingsring, som indgik i SRSF-regeringens regeringsgrundlag efter folketingsvalget i 2011. Betalingsringen blev dog aldrig vedtaget og blev i stedet erstattet af Trængselskommissionen, som havde til formål at komme med forslag til, hvordan trængsel og luftforurening i Hovedstadsområdet kunne reduceres. I lighed med Infrastrukturkommissionen betænkning fremgår det også af Trængselskommissionens betænkning, at bedre udnyttelse af den eksisterende infrastruktur er en del af løsningen på den nuværende og fremtidige trængsel. [SRSF-regeringen, 2011; Trængselskommissionen, 2013]

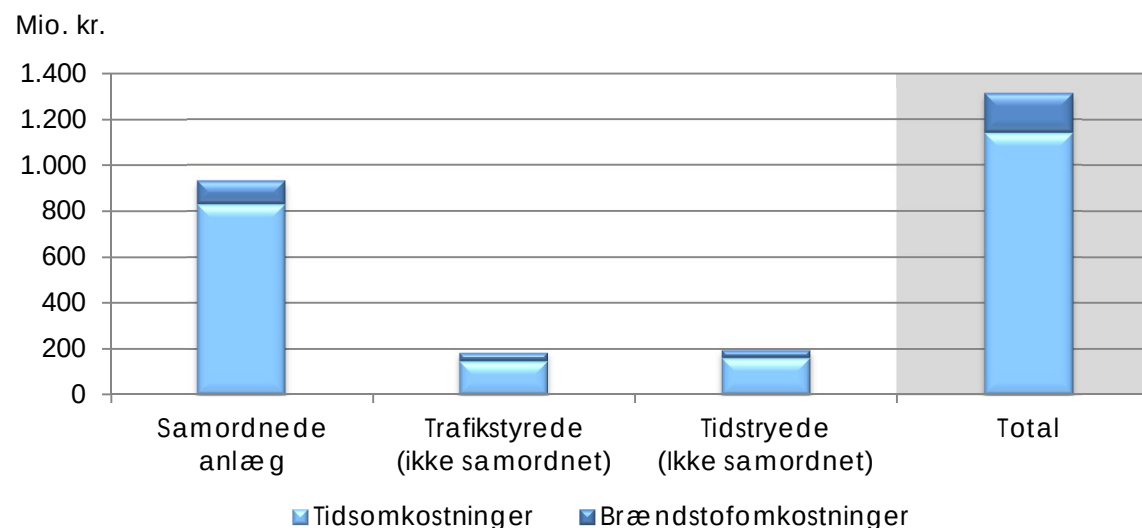
De senere år har Vejdirektoratet også haft fokus på en bedre udnyttelse af den eksisterende infrastruktur. Vejdirektoratet ud-

gav i 2012 rapporten, *Konsekvenser for trafikanter og samfund - Bedre trafiksignaler*, som redegør for den aktuelle tilstand af de danske signalanlæg. Konklusionen heraf er, at de samfundsøkonomiske totalomkostninger i signalanlæg vurderes at beløbe sig til omkring 14 milliarder kroner årligt, som udgøres af forsinkelser, brændstofforbrug, trafikuheld samt drift og vedligehold. Dele af omkostningerne skyldes manglende trafik- og systemteknisk opfølgning samt en utidssvarende styreform i flere signalanlæg. [Vejdirektoratet, 2012a]

Dette medfører flere målbare konsekvenser herunder:

- Flere stop for rødt
- Øget Forsinkelse
- Øget brændstofforbrug
- Øget udledning af forurenende stoffer
- Øget støj

De samfundsmæssige omkostninger ved signalanlæg kan naturligvis ikke reduceres fuldstændigt. Ifølge Vejdirektoratet vil de samfundsøkonomiske omkostninger jævnfør figur 1.2 kunne reduceres med 1,3 milli-



Figur 1.2: Den anslåede årlige reduktion i forhold til de samfundsøkonomiske omkostninger i henholdsvis samordnede, trafikstyrede og tidstyrede signalanlæg, såfremt disse optimeres. [Vejdirektoratet, 2012a]

arder kroner årligt, hvilket skal ske gennem vedligehold og optimering. [Vejdirektoratet, 2012a]

Det skønnes således, at der er et kendt og betydeligt optimeringspotentiale i dagens signalanlæg. Dette skal realiseres ved at forbedre eksisterende samordninger, afhjælpe detektorfejl, som er ofte forekommende. Derudover forventes optimeringspotentialet at kunne realiseres ved at ændre styreformen i de over 200 signalanlæg, som i dag udelukkende er tidsstyret og derved er helt uafhængige af den aktuelle trafik i og omkring det enkelte kryds, hvilket gør signalanlæggene utidsvarende [Vejdirektoratet, 2012a].

For at få en forståelse for signalanlægget som element samt den forskning der pågår inden for området, foretages en systematisk litteraturgennemgang i det følgende, hvilket berører styreformer, detekteringsteknologier, principper samt optimeringsmuligheder.

1.1 Signalanlæg & styreformer

I dag findes de signalregulerede kryds typisk i byernes tætte og intensive trafikmiljø og er fundamentale i forhold til at opretholde en acceptabel trafikafvikling samt høj trafiksikkerhed. Uden signalregulering

vil der således opstå trafikale sammenbrud med omfangsrige og uoverskuelige konsekvenser til følge. Signalanlæggenes funktion er således at opretholde en tilfredsstillende trafikafvikling, hvilket realiseres ved skiftevis at prioritere konfliktende trafikstrømme, hvorved hovedparten af disse trafikstrømme er tidssepareret og derved adskilt i tid. [Lauritzen, 1994]

Signalanlæggenes tilstedeværelse medfører dog også en række gener for den enkelte trafikant og samfundet som helhed. Dette er eksempelvis udgifter til drift og vedligehold, flere stop, øget forsinkelse og brændstofforbrug og deraf øget luftforurening. Dette gør sig blandt andet gældende i perioder, hvor trafikintensiteten er relativt lav, hvorved signalanlægget kan virke hindrende for en hensigtsmæssig trafikafvikling. Generne af signalanlægge-

nes tilstedeværelse afhænger dog i høj grad af styreformen i det enkelte signalanlæg. [Lauritzen, 1994]

Hvordan signalanlæggene afvikler trafikken afhænger i høj grad af signalanlæggets styreform. Overordnet betragtes et signalanlæg som værende tids- eller trafikstyret, hvilket fremgår af figur 1.3.

Tidsstyrede signalanlæg har faste grøntider, hvilket bevirker at omløbstiden også er fast i det enkelte signalprogram. Fordelingen er grøntiden er derved statisk og uden hensyntagen til den aktuelle trafik i krydsets respektive tilfartsspor. I trafikstyrrede signalanlæg detekteres den aktuelle trafik derimod, hvilket gør styreformen mere fleksibel. Fleksibiliteten realiseres gennem grøntidsforlængelser og variable omløbstider i det enkelte signalprogram og



Figur 1.3: De overordnede styreformer i signalanlæg, som er tids- eller trafikstyret. Derudover er det enkelte signalanlæg samordnet eller fungerer uafhængigt.

begrænses alene af fastsatte minimum- og maksimumtider. Dertil giver trafikstyringen mulighed for at indføre en hvilestilling, hvilket bevirker, at signalanlægget, i trafiksvage perioder, vil stå i hvile, hvorved der ikke vil forekomme faseskift [Vejdirektoratet, 2013a]. I Danmark anvendes hvilestillingerne;

- Præferencestilling
- Alt rødt
- Valgfri hvile

I perioder uden trafik vil et trafikstyret signalanlæg med præferencestilling skifte til grønt i hovedretningen. Ved hvilestillingen alt rødt vil signalanlægget skifte til rødt i samtlige signaler. I sjældne tilfælde anvendes valgfri hvile, hvor signalanlægget opretholder grønt for den retning, som senest har haft grønt. [Vejdirektoratet, 2013a]

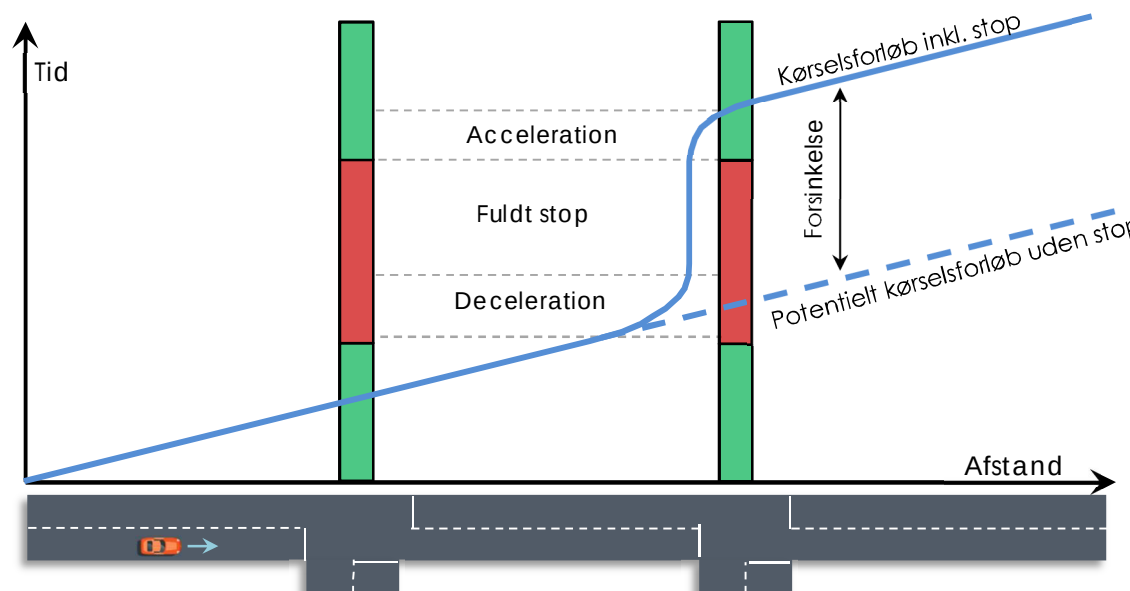
Uafhængigt eller samordnet

Foruden tids- eller trafikstyringen kan et signalreguleret kryds være uafhængigt eller samordnet med nærliggende signalanlæg, hvilket ligeledes fremgår af figur 1.3 på forrige side. Når et signalanlæg er uafhængigt tids- eller trafikstyret skyldes det primært, at krydset er isoleret med

store afstande til omkringliggende signalanlæg. I andre tilfældet hvor signalanlæggene er uafhængigt tidsstyrede skyldes dette, at disse er etableret i 1960'erne og 70'erne, hvor denne styreform var udbredt. Styreformen vurderes utidssvarende, da den, som tidligere beskrevet, ikke tager hensyn til den aktuelle trafik, hvilket kan medføre flere stop samt unødigt forsinkelse for rødt i det signalregulerede kryds. På figur 1.4 fremgår en illustration, som viser et forløb, hvor en bilist skal gennemkøre en strækning med to uafhængigt tidsstyrede

signalanlæg. Det fremgår således, at bilen må decelerere for at gøre fuldt stop og efterfølgende accelerere ved igangsætning. Denne proces medfører, foruden et stop og øget brændstofforbrug, unødigt ventetid for rødt og derved en forsinkelse. [Vejdirektoratet, 2012a]

Signalanlæg, som er beliggende i relativt beskeden indbyrdes afstand, samordnes ofte, da dette i mange tilfælde har vist sig at være fordelagtigt. Formålet med at samordne signalanlæg er at realisere en



Figur 1.4: Vej/tid-diagram, som illustrerer en strækning med to uafhængigt tidsstyrede signalanlæg samt konsekvenser i form af stop og forsinkelse.

grøn bølge på den overordnede vej i en række signalregulerede kryds, hvilket er illustreret på figur 1.5. I nogle tilfælde er der endvidere mulighed for at etablere en dobbeltrettet grøn bølge. Ved etablering af grønne bølger tilstræbes det at tilvejebringe en mere glidende trafikafvikling med en relativt høj gennemsnitshastighed for trafikken på den overordnede vej, hvilket ideelt reducerer forsinkelser og brændstofforbrug samt antal stop. Derudover bevirker en samordning, at risikoen for til-

bagestuvning mellem to signalregulerede kryds minimeres. [Vejdirektoratet, 2013a]

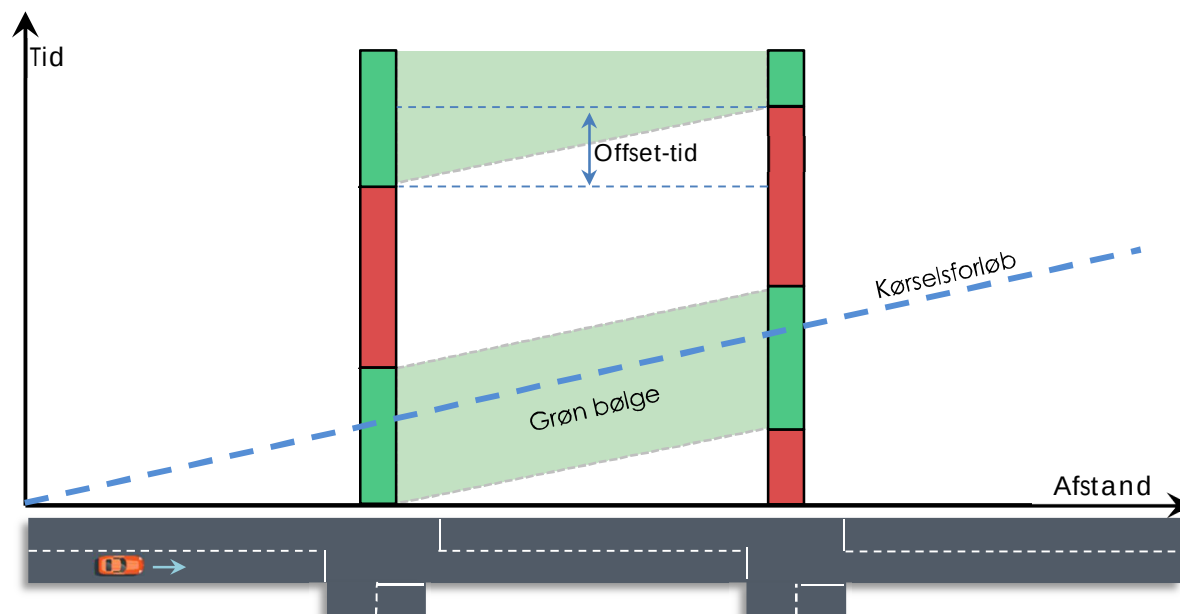
Tidsstyrede signalanlæg, som indgår i en samordning har naturligvis faste omløbs- og grøntider. I trafikstyrede signalanlæg, som indgår i en samordning, er det muligt at foretage eksempelvis forlængelser af grøntiden eller lukke en fase ned tidligt, såfremt der ikke forekommer anmeldelser fra trafikanter i den givne tilfart. Med samordninger introduceres også en offset-tid,

som er den forskydning i tid, der er imellem omløbende i de samordnede signalanlæg, hvilket ligeledes fremgår af figur 1.5. [Vejdirektoratet, 2013a]

1.2 Adaptiv signalstyring

Foruden en traditionel samordning af signalanlæg findes der også en mere avanceret form for samordning kaldet adaptiv signalstyring. Adaptiv signalstyring defineres typisk som et styresystem, hvor flere samordnede signalanlæg automatisk og kontinuerligt tilpasses den aktuelle trafikale situation, hvilket ikke er tilfældet i en traditionel samordning. Med den adaptive signalstyring introduceres således en mere kompleks form for samordning, som har til formål at optimere trafikafviklingen og derved tilvejebringe en bedre fremkommelighed. [Gautier, 2001]

Den adaptive signalstyring er i dag etableret mange steder globalt. I hovedparten af tilfældene kan det påvises at den adaptive signalstyring har haft en positiv effekt på fremkommeligheden, hvor rejsetiden er forbedret med op til 30 % sammenholdt med før-situationen. Effekten har dog i nogle tilfælde vist sig at være mere varierende uden en statistisk signifikant effekt. Dette kan eksempelvis skyldes at kapaciteten blot omforderes på en stræk-



Figur 1.5: Vej/tid-didagram, som illustrerer en strækning med to samordnede signalanlæg, hvor der realiseres en enkeltrettet grøn bølge, så stop og forsinkelse reduceres.

ning med kryds, så den gennemkørende trafik opnår en bedre fremkommelighed, mens trafikken på sidevejene vil opleve en forringet fremkommelighed. I andre tilfælde har rejsetiden vist sig at være faldende for den kollektive trafik, mens rejsetiden for den øvrige trafik har været stigende, hvorved der ikke er tale om en samlet optimering af trafikafviklingen. [Agerholm, 2011; Krøyer, 2008]

Den adaptive signalstyring kan etableres decentralt, hvor det enkelte anlæg styres lokalt og kommunikerer med omkringliggende kryds. Andre systemer er centraliseret, hvor ét centralt styreapparat har det fulde overblik af den trafikale situation og kan agere på baggrund af den samlede trafik på strækningen. Uafhængigt af om systemet er centraliseret eller decentraliseret, vil der typisk i større eller mindre grad være nogle bindinger i det enkelte kryds og i systemet som helhed. Dette kan eksempelvis være minimum- og maksimumgrønt eller skjult synkronisering, så der opretholdes en fast offset-tid mellem de respektive kryds. Derudover udnytter nogle systemer også historiske data, hvilket kan være fordelagtigt i eksempelvis erhvervs- eller industriområder med vagtskifte og faste arbejdstider. Systemer, som blot anvender realtidsdata, evner typisk ikke at

afvikle trafikken tilfredsstillende, da systemet kun gradvist tilpasser sig variationer i ankomstintensiteten, hvorved tilpasningen vil realiseres for sent. Med de traditionelle adaptive signalsystemer er fulgt en udbredt opfattelse af, at behovet for trafikteknisk opfølgning er forsvindende som konsekvens af systemets automatiske tilpasning. Dette er dog en misforståelse, da systemet kan have behov for løbende kalibrering eller manuel justering af de fastsatte bindinger mellem de respektive kryds. Derfor er der i nogle tilfælde behov for øget trafikteknisk opfølgning efter det adaptive signalsystem er etableret. [Kronborg & Davidsson, 2004]

Der findes i dag en lang række forskellige adaptive signalstyringssystemer, som anvendes i forskellige steder af verden. De første vellykkede systemer blev udviklet i slutningen af 1970'erne og er siden blevet videreudviklet, mens nye systemer er kommet til. Der gives i det følgende en kort beskrivelse af fire internationalt udbredte systemer, som er [Kronborg & Davidsson, 2004];

- SCOOT
- SCATS
- SPOT
- MOTION

De to førstnævnte er med afstand de mest udbredte og udgør tilsammen omkring 80 % af de adaptive signalstyringssystemer på verdensplan. [Kronborg & Davidsson, 2004]

SCOOT

SCOOT er et engelsk udviklet adaptivt signalstyringssystem og var et af de første af sin art, da det blev udviklet i slutningen af 1970'erne. SCOOT er i dag etableret i mere end 130 byer i Storbritannien samt omkring 40 byer andre steder i verden. Samlet set anvendes SCOOT i mere end 10.000 signalanlæg, hvor de 3.000 af dem findes i London, typisk i systemer af 20-30 signalanlæg. Antallet af anlæg gør SCOOT til et af de markedsførende adaptive signalsystem på verdensplan. [Lauritzen, 2004]

SCOOT blev udviklet med udgangspunkt i TRANSYT, som er et trafikmodelleringsværktøj til analyse og optimering af signalanlæg, da der var behov for kontinuerlig dataindsamling for at opretholde en optimal signalstyring mellem samordnede signalanlæg. Udfordringen i at signalanlæg, uden trafikteknisk opfølgning, over tid bliver mere og mere ineffektive, var således udgangspunktet for udviklingen af SCOOT

med henblik på at håndtere selvsamme udfordring. [TRL, 2014]

Ved anvendelse af SCOOT nedlægges detektorer i krydsenes frafartsspor, hvor data efterfølgende transmitteres til en central enhed, som administrerer de store datamængder og foretager beregninger af signalparametre, som anvendes i forbindelse med fasevalg. SCOOT tilstræber således at minimere antal stop samt kølængden i krydsenes tilfartsspor. Fordele ved SCOOT er, at der ikke indgår prædefinerede signalprogrammer med direkte overgange, hvor omløbstiden eksempelvis reduceres fra 80 til 60 sekunder i mellem to på hinanden følgende omløb. I stedet realiseres ændringerne sekventielt. Proceduren er tilsvarende ved ændringer i offset-tiden, som i en traditionel samordning ændres med programskift. Ved anvendelse af SCOOT sker ændringerne trinvist, når retningsfordelingen ændrer sig i løbet af dagen. Omløbs- og grøntiden kan ændres henholdsvis hver 2.-3. minut og fra omløb til omløb, mens offset-tiden kan ændres hver 5.-10. minut. [Kronborg & Davidsson, 2004; Lauritzen, 2000]

Undersøgelser af effekterne ved anvendelse af SCOOT er positive, da resultaterne viser, at systemet under normale omstæn-

digheder har en rejsetidsreducerende effekt på 10-20 %, mens reduktionen af forsinkelsen i uafhængigt trafikstyrede signalanlæg er op til 30 %. [TRL, 2014]

SCATS

Det adaptive signalstyringssystem, SCATS, er udviklet i slutningen af 1970'erne i Sydney, hvor det også blev lanceret første gang. I Sydney styres omkring 2.500 signalanlæg, mens systemet også har vundet udbredelse i det øvrige Australien samt Asien og Europa. SCATS er, sammen med SCOOT, et af de markedsførende adaptive signalstyringssystemer på verdensplan. [Kronborg & Davidsson, 2004]

Detektorerne i SCATS placeres umiddelbart før stoplinjen, hvor der er mulighed for at forlænge grøntiden, hvormed systemet betragtes som decentralt. Trafikdata sendes dog også til en central enhed, som varetager overvågning og programmering. Til forskel fra SCOOT indgår der prædefinerede programmer i SCATS, hvor eksempelvis grøntidsfordelingen bestemmes ud fra den aktuelle trafik i en række udvalgte kryds. Det samme gør sig gældende for omløbstiden, hvor der er en række prædefinerede omløbstider, herunder en maksimal omløbstid, som i Australien flere steder er 140-160 sekunder. SCATS beteg-

nes således som et adaptivt signalstyringssystem, det grundlæggende foretager et trafikstyret programvalg kombineret med en dynamisk beregning af omløbstiden. Effekterne ved anvendelse af SCATS tilsvarende overordnet set effekterne ved anvendelse af SCOOT, hvor forsinkelse og rejsetider reduceret betydeligt. [Lauritzen; Kronborg & Davidsson, 2004]

SPOT

I slutningen af 1980'erne udviklede den italienske virksomhed, Mizar Automazione Spa, det adaptive signalstyringssystem UTOPIA/SPOT. UTOPIA er den overordnede signalstyring på områdeniveau, som anvendes i meget store net. SPOT dækker over den mere kendte intelligente signalstyring, som anvendes på lokalt niveau, hvor det enkelte signalanlæg optimeres i forhold til de tilstødende signalanlæg, hvorved systemet er decentralt. Det primære formål med systemet var at designe et signalsystem med intelligente trafiksignaler samt prioritering af den kollektive trafik. Systemet har vundet udbredelse internt i Italien, hvor der har været flere hundrede anlæg under styring af SPOT. Systemet blev etableret i Norden i midten af 1990'erne, hvor Norge er længst fremme med omkring 100-150 SPOT-anlæg i

Oslo og Trondheim. SPOT er etableret flere steder i Danmark, herunder kryds i Roskilde, Køge og Aalborg. [Infrastrukturkommissionen, 2008; Christensen, 2005]

Sammenholdt med andre adaptive signalstyringssystemer adskiller SPOT sig ved, at der ikke er en binding i forhold til omløbstiden i mellem de signalregulerede kryds. SPOT tillader således det enkelte anlæg at bestemme varigheden af grønt i de enkelte faser og derved omløbstiden, hvilket kan medvirke til prioritering af den kollektive trafik. Dog indgår der stadig principper om minimum- og maksimumgrønt. I lighed med SCOOT placeres detektorerne i frakfarterne, hvor den udkørende trafik registreres og transmitteres til nabokrydset. Den indsamlede data anvendes til at beregne en prognose for trafikankomsten i de kommende 120 sekunder. Med udgangspunkt i prognosen tilstræbes det således at optimere trafikafviklingen ved at minimere et kvalitetsindeks, som indeholder følgende parametre [Lauritzen, 2004]:

- Forsinkelse
- Antal stop
- Kølængder
- Forsinkelse for busser
- Afvigelse fra forrige signalindstilling

Forsinkelse for busser indgår naturligvis kun såfremt der indgår busprioritering, hvorved busserne skal detekteres separat. Derudover indgår afvigelsen i forhold til den forrige signalindstilling, hvilket sikrer, at der ikke forekommer radikale ændringer. [Lauritzen, 2004]

Der er også foretaget undersøgelse af effekterne ved anvendelse af SPOT, som understreger, at rejsetiden i flere tilfælde reduceres betydeligt, mens der i nogle tilfælde ikke kan påvises en signifikant effekt ved anvendelse af systemet. [Agerholm, 2013]

MOTION

Af de fire omtalte adaptive signalstyringssystemer er MOTION det yngste, hvor udviklingen fandt sted i midten af 1990'erne. MOTION anvendes så vidt vides kun i europæiske lande, herunder Tyskland og Danmark. Det planlægges dog at etablere systemet i blandt andet Abu Dhabi. I alt anslås det at mere end 500 signalanlæg styres via MOTION. [Siemens, 2013]

MOTION betragtes overordnet set som et centralt adaptivt signalstyringssystem, da data fra detektorerne, som er placeret i krydsets tilfarter, transmitteres til en central enhed. Efterfølgende beregnes en om-

løbstid for systemet, som er gældende i de næste 5-15 minutter, hvor ændringer i omløbstiden kun kan ske i step af 5 sekunder. Når omløbstiden er bestemt kan grøntidsfordeling, faserækkefølge samt offset-tid bestemmes. For at kunne foretage disse beregninger indgår der i MOTION en simpel trafikmodel, som prognosticerer trafikken én gang pr. halvandet minut på baggrund af trafikdata fra detektorerne. Foruden den centrale styring tillader MOTION også, at der i det enkelte kryds foretages afvigelser fra den aktuelle tidsplan. Dette kan være en lokal trafikstyring eller anvendelse af busprioritering i det enkelte kryds. Afvigelserne bør dog være forholdsvis begrænsede, da betydelige afvigelser vil kompromittere den centrale styring og derved den overordnede trafikafvikling. I lighed med de øvrige adaptive signalstyringssystemer viser undersøgelser, at anvendelsen af MOTION har en positiv effekt på trafikafviklingen som helhed. [Kronborg & Davidsson, 2004]

1.3 Detekteringsteknologier

En pålidelig detektering af trafikken er altafgørende i bestræbelserne på at opretholde en acceptabel trafikstyring. Dette gør sig gældende for både køretøjer, cyklister samt fodgængere, hvor detektering af sidstnævnte ikke belyses yderligere, da

fodgængere blot anmelder via et fodgængertryk. Detektering kan foretages via mange forskellige detekteringsformer. Gennem de senere år er flere nye detekteringsteknologier vundet frem og indgår i større og større grad som detektorer i trafikken.

Spoledetektering

Siden starten af 1960'erne, hvor induktionsspolens udbredelse som trafikdetektering fandt sted, har denne detekteringsteknologi været den mest anvendte til registrering af trafik på såvel strækninger som i kryds. Induktionsspolen fræses ned i selve vejen, hvilket fremgår af figur 1.6 og kan derfra indsamle data om trafikken, herunder antal, hastighed samt klassificering. For at opnå en fuld registrering af trafikken på strækninger eller i kryds, er der normalvis behov for flere spoler i de respektive kørebane[r] [FHWA, 2006]. Selvom induktionsspolen har en forholdsvis høj præcision og har været den mest anvendte detekteringsform, er der også ulemper forbundet hermed. At induktionsspolen er beliggende i vejen er uhensigtsmæssigt, både i forhold til etablering og drift. Beliggenheden bevirker, at der jævnligt konstateres fejlbehæftede eller defekte induktionsspoler, hvilket eksempelvis kan skyldes sporkøring,

udlægning af nyt slidlag eller gravearbejder. I Danmark vurderes det, at 15-20 % af induktionsspolerne i signalregulerede kryds er fejlbehæftede, hvilket medfører unødige trafikantgener i form af forringet fremkommelighed samt et øget brændstof forbrug. [Vejdirektoratet, 2012a; Zengzeng et al., 2016]

Videodetektering

Som alternativ til de traditionelle induktionsspoler har videodetektering være anvendt siden detekteringsteknologien blev opfundet i midten af 1970'erne. Video-



Figur 1.6: Traditionel induktionsspole, som er nedfræset umiddelbart før stopstregen i et signalreguleret kryds.

kameraet og tilhørende udstyr analyserer billede for billede og kan således, via ændringer i pixels, detektere trafikanter i hele kameraets synsfelt. I modsætningen til induktionsspolen evner denne teknologi også at detektere fodgængere og kan derudover bestemme retningsfordelingen i selve krydset, hvilket er en af de store fordele ved video som detekteringsform. Dertil er udstyret placeret i en nærliggende mast eller portal, hvilket fremgår af figur 1.7, hvor registreringen af eksempelvis et kryds som regel kan varetages med ét kamera pr. tilfart. Der er dog flere grunde



Figur 1.7: Videokamera (placeret i portal) som alternativ detekteringsform i stedet for induktionsspoler.

til, at videodetektering ikke er blevet udbredt i samme grad som induktionsspolerne. Først og fremmest komplicerer dårlige vejrforhold selve detekteringen. Dette gør sig eksempelvis gældende ved kraftig regn eller sne og i forbindelse med tåge og lyn, hvilket er hyppigt forekommende vejrfænomener. Derudover kan skygger fra såvel køretøjer som bygninger og beplantning komplicere detekteringen, hvilket også gør sig gældende for ugunstige lysforhold. Dette kan eksempelvis være skarpt sollys eller blændende lygter fra køretøjer, som primært gør sig gældende efter mørkets frembrud. I nogle tilfælde kombineres anvendelsen af videokameraer med termiske kameraer for at mindske gener fra dårlige lys- og vejforhold. [Kastrinaki et al., 2003; Madsen et al., 2016; Xu et al., 2009]

Radardetektering

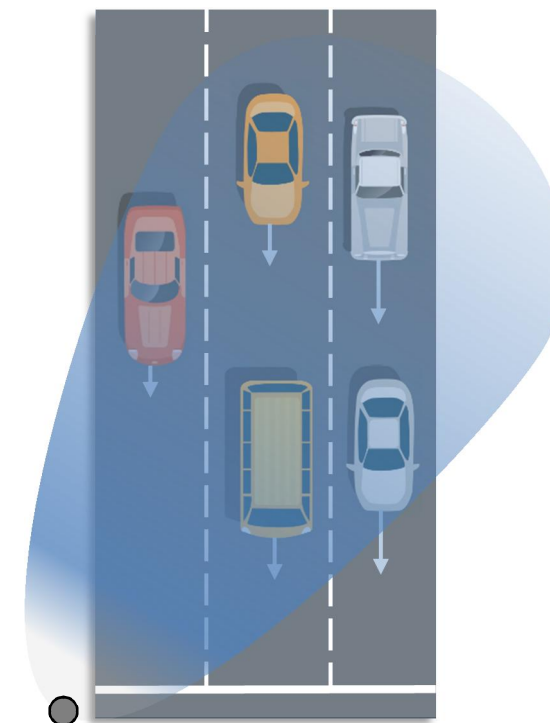
En anden detekteringsteknologi, som er blevet mere udbredt, er radardetektering, som oprindeligt blev udviklet før og under 2. Verdenskrig og er baseret på radiobølger [FHWA, 2006]. Ved anvendelse af radarteknologien til detektering af trafikanter sker denne via refleksion af de udsendte radiobølger, hvorved en ændring i frekvens registreres. Derved detekteres samt-

lige trafikanter i radarens dækningsområde. I de første generationer har der dog været udfordringer med at detektere trafikanter, som ikke er i bevægelse. Denne udfordring er dog afhjulpet i senere generationer, hvor den sidste position lagres via software, hvilket bevirker, at køretøjer som holder for rødt stadig detekteres. Teknologien har, i lighed med videodetektering, den fordel, at der ikke skal foretages gravearbejde i samtlige tilfarter, da radaren etableres en i mast eller portal, som vist på figur 1.8. Til forskel fra videodetektering er radaren og langt mindre følsom overfor ugunstige lys- og vejforhold, da teknologien netop er baseret på radiobølger, hvilket er illustreret på figur 1.9. En af de helt store fordele ved radardetektering



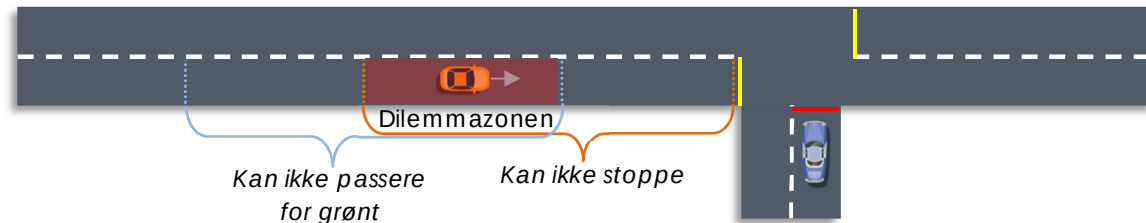
Figur 1.8: Radar (placeret i eksisterende signalmast) til detektering af trafikanter i et signalreguleret kryds.

er, at teknologien giver mulighed for en ny og mere detaljeret detektering, hvilket er essentielt såfremt nutidens signalanlæg skal optimeres. [Knudsen & Jacobsen, 2013]



Figur 1.9: Principskitse, som illustrerer detekteringsområdet, hvor de nyeste generationer af radaren er i stand til at foretage nøjagtige registreringer af over 100 køretøjer i op til flere hundrede meters afstand 20 gange i sekundet. [Smartmicro, 2016]

Med radartechnologien introduceres således den såkaldte ETA-funktion, som estimerer trafikanter tid til ankomst i eksempelvis et kryds på baggrund af hastighed og position. Denne funktion kan medvirke til at reducere antallet af trafikanter i valg- og dilemmazonen, hvor en bilist ved skift til gult, hverken kan nå at stoppe eller passere for grønt, hvormed der sker ubevidst rødkørsel, hvilket er skitseret på figur 1.10. Introduktionen af ETA-funktionen giver således mulighed for nødvendige grøntidsforlængelser eller afslutning af grønt, så trafikafviklingen i krydset foregår mere trafiksikkert. Beregningen sker på baggrund af trafikanternes reelle hastighed, som anvendes til at estimere tidsafstanden frem mod krydset. Foruden den trafiksikkerhedsmæssige effekt forventes denne funktion også at forbedre fremkommeligheden, da grøntidsforlængelsen tilsvarende behovet – hverken mere eller mindre. Det anslås dog, at der er et uudnyttet potentiale, da der ved anvendelse af radartechnologien i mange tilfælde emuleres virtuelle induktionsspoler, hvilket bevirker, at den øvrige trafikdata fra raderen ikke anvendes til styring af selve signalanlægget. [Jakobsen, 2015; Kildebogaard, 2015; Smartmicro, 2016]



Figur 1.10: Principskitse, som illustrerer dilemmazonen, hvor en bilist hverken kan nå at stoppe eller passere for grønt, hvilket resulterer i ubevidst rødkørsel. Disse situationer kan medføre bagendekollisioner ved hårde opbremsninger eller kollisioner med trafikken fra sidevejen ved rødkørsel.

Der forskes dog i at anvende realtidsdata fra radarer på hele strækningen, hvilket giver nye muligheder i forhold til signalstyringen. Santiago-Chaparro et al. [2012] har således udviklet en metode til at bestemme forsinkelsen i tilfartssporene i realtid via radarer. Efterfølgende kan forsinkelserne anvendes af vejmyndigheden, men offentliggøres også via internettet til gavn for trafikanter. Ghods & Fu [2014] har ligeledes forsket i anvendelse af radardetektering i signalregulerede kryds. Forskningen har udmøntet sig i en algoritme, som sikrer en meget præcis registrering af retningsfordelingen i selve krydset. Af projektet fremgår det, at forskningen kan implementeres i virkeligheden, eksempelvis i kryds med adaptiv signalstyring.

Foruden de tre førnævnte detekteringsteknologier, som vurderes at være de pri-

mært benyttede, findes der en lang række andre detekteringsteknologier som eksempelvis [FHWA, 2006];

- Magnetsensorer
- LIDAR
- Bluetooth
- WiFi
- GPS
- DSRC
- LTE

I nogle tilfælde anvendes flere forskellige detekteringsteknologier i kombination for at tilvejebringe en endnu bedre detektering af eksempelvis trafik på en strækning eller henimod et kryds. Derudover udarbejdes der også kommercielle produkter, som kombinerer flere detekteringsteknologier. Et eksempel herpå er virksomheden Blip Systems, som kombinerer bluetooth, WiFi og radar. [Andersen, 2016]

1.4 Principper og procedurer

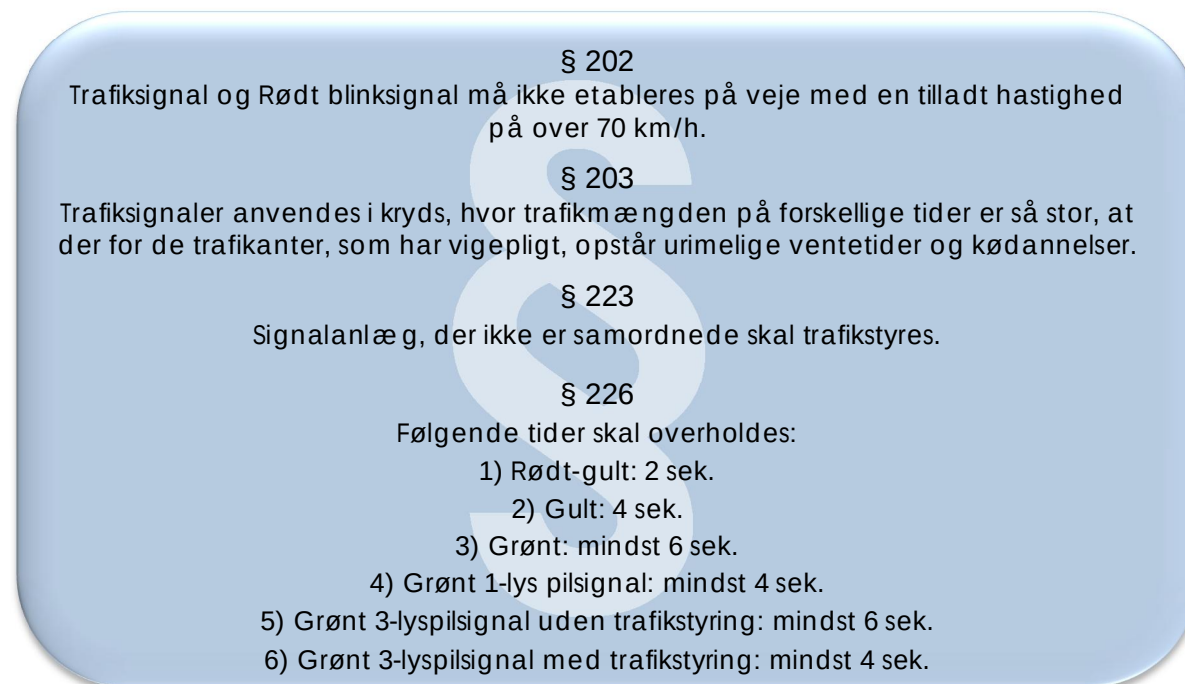
Helt generelt er store dele af arbejdet med signalanlæg styret af bekendtgørelser og håndbøger med tilhørende retningslinjer og vejledninger. De signalregulerede kryds i Danmark ses ofte i byområder og andre befærdede steder. Dette er i overensstemmelse med § 203 i *Bekendtgørelsen om anvendelse af vejafmærkning*, som fremgår af figur 1.11 og foreskriver, at trafiksignaler kan anvendes i kryds, hvor trafikmængden er så stor, at trafikanter, som har vigepligt, oplever urimelige ventetider og kødannelser. [Transport- og Bygningsministeriet, 2016]

I håndbøger anbefales omfangsrig dokumentation, hvor funktionsbeskrivelse, kapacitetsberegning, mellemtidsmatrix, signalgruppeplan og detektorplan blot er nogle af de trafiktekniske dokumenter, som skal udarbejdes. Disse har blandt andet til formål at dokumentere, at etableringen af signalanlægget er i overensstemmelse med gældende lovgivning. Derudover betragtes dokumentationen som en signalteknisk forudsætning for signalanlæggets udformning og styring. Dette gør det til en hver tid muligt at undersøge, hvorvidt forudsætningerne for signalanlæggets generelle indstillinger, herunder

styreform, stadig er til stede. Såfremt dette ikke er tilfældet, er der belæg for at revidere og optimere signalanlæggets indstillinger. I forlængelse af den trafiktekniske dokumentation bør der desuden redegøres for; *"principper, som sikrer, at ingen trafikanter skal vente unødvendigt for rødt"*. [Vejdirektoratet, 2013a]

Når nye signalanlæg skal projekteres og etableres er der også lovgivningsmæssige

forhold, som gør sig gældende. Således må signalanlæg kun etableres på veje med en maksimal tilladt hastighed på 70 km/t, mens alle ikke-samordnede signalanlæg skal trafikstyres, hvilket fremgår af § 202 samt § 223 i *Bekendtgørelse om anvendelse af vejafmærkning*, som ligeledes er vist på figur 1.11. Selve trafikstyringen er dog ikke specificeret yderligere, hvilket bevirker at graden af trafikstyring ikke fremgår. Hvorvidt et nyetableret signalre-



Figur 1.11: Uddrag af paragraffer fra *Bekendtgørelse om anvendelse af vejafmærkning* (BEK nr. 1194 af 21/9/2016). [Transport- og Bygningsministeriet, 2016]

guleret kryds med fodgængertryk og tilhørende kvitteringslys betragtes som trafikstyret i henhold til lovgivningen er således uklart. [Transport- og Bygningsministeriet, 2016]

Rettes fokus mod traditionelle principper indenfor styring af signalanlæg er indgående elementer forudbestemt faseskift (som i nogle tilfælde påkræver anmeldelse), faste offset-tider mellem samordnede kryds, faste maksimale omløbstider samt forskellige grøntidsudmålinger. Formålet med grøntidsudmålingen er at sikre, at signalanlægget er fleksibelt, og at den enkelte grøntid tilsvarende den aktuelle trafikale efterspørgsel. I den forbindelse arbejdes der blandt andet med begreberne minimum- og maksimumgrønt samt forskellige former for grøntidsforlængelse. I henhold til minimumgrønt er der lovgivet herom, hvor de respektive minimumtider findes af §226 og fremgår af figur 1.11 på forrige side [Transport- og Bygningsministeriet, 2016]. I modsætning til værdierne for minimumgrønt er der i forhold til maksimumgrønt ikke lovgivet herom. I diverse håndbøger og vejledninger er det dog normal procedure at udmåle en fast maksimal grøntid, hvilket bevirker, at en given signalfase afsluttes uafhængigt af den aktuelle trafiksituation som konsekvens af

en prædefineret maksimal grøntid. [Lauritzen, 1994; Vejdirektoratet, 2012b; Vejdirektoratet 2013a]

Styringsprincipper vedrørende minimum- og maksimumtider eksisterer ikke kun i en dansk kontekst. I forhold til procedurer og principper inden for signalstyring i Sverige arbejdes der også med minimum- og maksimumtider, som eksempelvis indgår i publikationen *Vägar och gators udformning – Trafiksignaler (Veje og gaders udformning – Trafiksignaler)*, der er udgivet af det daværende svenske Vägverket (i dag Trafikverket) i samarbejde med det Svenske Kommuneforbund. Her er argumentet for brug af maksimumgrønt, at der tilvejebringes en retfærdig fordeling af den samlede grøntid i eksempelvis myldretiden. Generelt er der mange ligheder mellem de danske og svenske arbejdsgange indenfor signalstyring, hvor eksempelvis den svenske LHOVRA-strategi, som er et akronym for flere elementer i signalstyringen, er adopteret i det danske materiale [Vejdirektoratet, 2013b; Vägverket, 2004]

Udenfor Skandinavien går flere af de før-omtalte principper indenfor styring af signalanlæg igen. Dette er blandt andet tilfældet i USA, hvor der også arbejdes med faste maksimale omløbstider, faste

offset-tider samt minimum- og maksimumgrønt, hvilket fremgår i flere versioner af *Highway Capacity Manual* [TRB, 2000; 2010]. *Federal Highway Administration (FHWA)* har ligeledes udgivet en informationsguide, som relaterer sig til arbejdet med signalregulerede kryds, hvor mange af de traditionelle styringsprincipper indgår [FHWA, 2013]. I Canada er der lighed med de øvrige nationer udarbejdet en håndbog, *Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections*, som beskriver procedurer og principper, hvor eksempelvis minimum- og maksimumgrønt også indgår [ITE, 2008].

Fælles for de indgående publikationer fra Danmark, Sverige, USA og Canada er, at arbejdsgange, procedurer og principper gennemgående er enslydende, hvor principper om faseskift, styreformer, omløbs- og grøntider indgår.

1.5 Alternative styringsprincipper og optimeringsmuligheder

Nationalt som internationalt arbejdes der på at optimere den eksisterende infrastruktur, for at imødekomme den stigende trængsel og tilvejebringe en bedre fremkommelighed. Optimeringen forventes primært at skulle realiseres gennem udvik-

ling af nye teknologier, som øjensynligt vil bevirke, at der gøres op med flere traditionelle principper inden for styring af signalanlæg.

I trafikstyrede signalanlæg er grøntidsfordeling og –forlængelser dynamiske og afhænger af den aktuelle trafik, som det specifikke anlæg detekterer. Der er dog nogle statiske parametre, som bevirker, at et trafikstyret signalanlæg kun i nogen grad responderer på den aktuelle trafiksituationen. Dette er eksempelvis minimum- og maksimumgrøntider. Princippet om en fast maksimal grøntid er ifølge Yun et al. [2007] uhensigtsmæssigt, da det i nogle perioder begrænser trafikstyringen. Derfor gør de op med princippet om en fast maksimal grøntid og introducerer i stedet en variable maksimal grøntid. Dette fungerer således, at den maksimale grøntid forlænges med eksempelvis 10 sekunder, såfremt den maksimale grøntid er anvendt i de to foregående omløb. Såfremt den nye maksimale omløbstid ikke anvendes i to på hinanden følgende omløb reduceres den maksimale grøntid ligeledes.

Shiri & Maleki [2016] betragter dette opgør med traditionelle principper som positivt, men påpeger samtidigt, at det er forholdsvist primitivt, da der ikke tages højde

for eksempelvis kødannelser og trafiksituationen i rødtiden. Derfor har de udviklet en algoritme, hvor både kødannelsen i grøn- og rødtiden samt ankomstfordelingen i grøntiden er indgående parametre. Forskningsresultaterne viser, at princippet om en fast maksimal grøntid forringer den overordnede fremkommelighed.

I en national kontekst forskes der ligeledes i at forbedre fremkommeligheden ved at optimere signalregulerede kryds. Således har Rambøll i samarbejde med Aarhus Kommune påbegyndt et projekt, hvor der gøres op med traditionelle principper inden for styring af signalanlæg. Dette inkluderer et opgør med faste omløbs- og grøntider og prædefinerede faseskift. I stedet introduceres vægte for krydsets respektive tilfarter, som er determinerende for grøn- og omløbstiden og derudover realiseres et frit fasevalg. Formålet med det omtalte projekt er at prioritere den overordnede fremkommelighed til fordel for principper, som tilgodeser den enkelte trafikstrøm. De foreløbige resultater viser, at den overordnede fremkommelighed forbedres, hvilket dækker over forbedret rejsetid, færre stop samt en overordnet reduktion af kølængderne. [Rambøll, 2016]

De foregående referencer er blot få blandt flere, som tilstræber at realisere et uudnyttet potentiale, som helt eller delvist befinder sig i en forældet infrastruktur, herunder utidssvarende signalanlæg. Det i litteraturstudiet indgående materiale er vist skematisk i appendiks A på side 75. Andre påpeger, at optimeringer kan realiseres via forbedret trafikantadfærd. Således behandler blandt andre Zhou et al. [2016] betydningen af trafikantadfærden i forhold til forsinkelser i signalregulerede kryds. Forskningen viser blandt andet, hvor store konsekvenser det har, når eksempelvis bilister udviser uhensigtsmæssig adfærd og fortsætter ud i et kryds velvidende om, at krydsarealet ikke kan rømmes på grund af tilbagestuvning fra andre tætvedliggende kryds. Dette forringer den overordnede fremkommelighed, hvilket understøtter, at der i nogle tilfælde er potentiale for optimering via trafikantadfærd. [Zhou et al., 2016]

De senere år har der også nationalt været et stigende fokus på trafikantadfærd, herunder uopmærksomhed i trafikken. Rådet for Sikker Trafik har således lanceret kampagnen *Kør bil, når du kører bil*, som primært har til formål at reducere antallet af trafikulykker. En undersøgelse i forbindelse med kampagnen dokumenterer, at knap

20 % af de adspurgte har skrevet eller læst sms'er, 15 % har snakket i håndholdt mobil mens hele 24 % har benyttet GPS inden for den seneste måned - vel at mærke mens de adspurgte er fører af et køretøj. Hvad enten der er tale om visuel, kognitiv, motorisk eller auditiv uopmærksomhed er dette bekymrende, da det fjerner fokus fra trafikken, hvilket udmønter sig i forringet trafikikkerhed. Det er dog ikke dokumenteret om, og i hvilken grad, uopmærksomhed forringer fremkommeligheden. [Rådet for Sikker Trafik, 2016]

Ikke desto mindre er der de senere år udviklet flere produkter og systemer, som gennem førerstøtte kan påvirke trafikantadfærden, hvilket blandt andet skal medvirke til en bedre fremkommelighed i al almindelighed, men specielt i større byer. I den forbindelse er projektet Compass4D igangsat den 1. januar 2013. Projektet er et EU-medfinansieret C-ITS pilotprojekt, som over en 3-årig periode testes i syv europæiske byer, herunder København. Projektet har til formål at forbedre trafikikkerheden, miljøpåvirkningen samt fremkommeligheden, hvor sidstnævnte har haft det primære fokus i København. Ved anvendelse af DSRC og/eller LTE er der mulighed for at realisere kommunikation mellem køretøj og den omkringliggende infrastruktur, hvil-

ket betegnes V2I kommunikation. Dette gøres ved at installere en enhed i køretøjet, som det fremgår af figur 1.12, hvilket bevirker, at køretøjet kan kommunikere med infrastrukturen, herunder de omkringliggende signalanlæg. Derved kan enheden assistere føreren af køretøjet, ved at give forskellige informationen som eksempelvis resterende grøntid i et signalreguleret kryds. [Københavns Kommune, 2016]

V2I kommunikationen testes og udvikles ikke kun af organisationer og vejbestyrer.

Bilproducenter samt ITS-leverandører har således også fokus på at optimere de kapacitetssættende kryds via forbedret trafikantadfærd. Således har SWARCO i samarbejde med Audi udviklet en ny teknologi kaldet *Traffic Light Assist*. Da ITS er meget udbredt i moderne byer, og et stigende antal køretøjer har kommunikationsenheder, er det muligt at anvende V2I kommunikation. Til forskel fra projektet i København introduceres funktionen GLOSA, som kommer med en anbefalet hastighed frem mod et signalanlæg for at undgå stop,



Figur 1.12: Compass4D kommunikationsenhed i en bus på rute A1 i København, hvor buschaufføren via enheden præsenteres for række forskellige informationer som udveksles via V2I kommunikation. [Københavnskommune 2016]

hvor funktionen er integreret i selve køretøjet og fremgår af det digitale instrumentbræt, som vist på figur 1.13. Foruden GLOSA-funktionen er der også fokus på at eliminere forringelser af fremkommeligheden som konsekvens af uopmærksomhed ved opstart. Derfor arbejdes der på en implementering af en funktion, hvor signalanlæg kan kommunikere med køretøjets automatiske start/stop funktion, hvilket bevirker at køretøjet starter automatisk ved grøntidens påbegyndelse. [SWARCO, 2014; 2015]

V2I kommunikation er indeholdt i begrebet VANET, som er et akronym for *Vehicular Ad-Hoc Network*. Dertil omtales V2R (Vehicle to Roadside) samt V2V (Vehicle to

Vehicle) ligeledes, hvor sidstnævnte vurderes at have et stort potentiale i forhold til såvel fremkommelighed, som trafikssikkerhed og miljøpåvirkning. [Ingeniøren, 2014; Wang et al., 2013]

Allerede nu forskes der blandt andet i, at anvende teknologien til at forbedre fremkommeligheden ved opstart i signalregulerede kryds. Således ønskes uopmærksomhed elimineret, eller som minimum reduceret, ved hjælp af platooning. Platooning, som er en realiseret automatisk kolonnekørsel i en given tidsperiode, tilvejebringes eksempelvis mellem køretøjer, som afventer grønt i samme kørebane, hvilket er illustreret på figur 1.14. Dette gøres via V2V kommunikation, som tillader køretøjerne at kommunikere og derved indgå i en kolon-

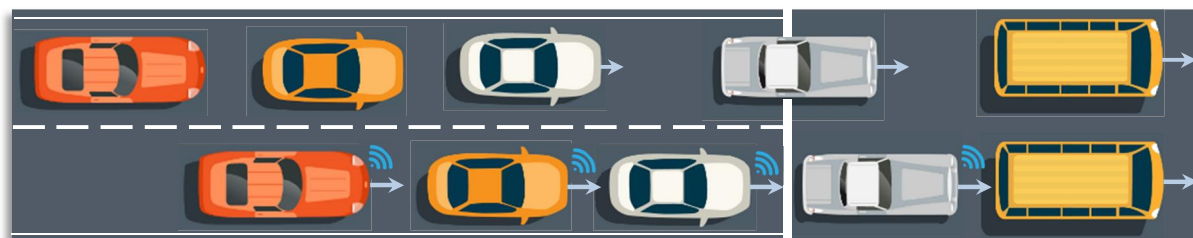
ne, hvilket bevirker, at køretøjerne accelererer simultant ved opstart. Platooning er således delvist uafhængig af reaktionstid og uopmærksomhed hos den enkelte bilist. Såfremt potentialet skal realiseres fuldt ud er det dog påkrævet at hovedparten af køretøjerne i en given kødannelser er i stand til at kommunikere med de øvrige køretøjer. [Barth et al., 2013; Günther et al., 2016]

1.6 Opsummering

På baggrund af litteraturgennemgangen er den generelle opfattelse, at der i arbejdet med de kapacitetssættende signalregulerede kryds, eksisterer nogle klare procedurer og principper, som til forveksling er identiske flere nationer imellem. Således



Figur 1.13: Udsnit af Audis digitale instrumentbræt, hvor GLOSA-funktionen er aktiv og informerer føreren om den optimale hastighed frem mod et signalreguleret kryds. [SWARCO, 2015]



Figur 1.14: I det venstre kørespor ses en traditionel opstart ved grønt, hvor køretøjerne starter enkeltvist mens køretøjerne i det højre spor anvender platooning, hvor køretøjerne via V2V kommunikation virtuelt sammenkøbes i en kolonne, som bevirker at køretøjerne accelererer simultant.

er gennemgående elementer faste offset-tider i forbindelse med samordnede signalanlæg, prædefinerede fasevalg, faste omløbstider samt minimum- og maksimumtider.

I diverse forskningsprojekter samt videnskabelige artikler er der udbredt enighed om, at der er flere uudnyttede optimeringspotentialer i forhold til kapacitet og fremkommelighed i signalregulerede kryds. Således er flere forskningsprojekter rettet mod at forbedre fremkommeligheden ved at optimere den eksisterende infrastruktur, hvilket blandt andet skal realiseres ved at gøre op med traditionelle principper inden for signalstyring. Derudover skal fremkommeligheden forbedres ved anvendelse af moderne detekteringsteknologier, herunder radar, som umiddelbart er til rådighed. Raderdetektering er således ét element, som potentielt kan medvirke til at forbedre fremkommeligheden, om end der stadig er mulighed for videreudvikling og forbedret anvendelse af radarer som detektorer.

I andre sammenhænge betragtes trafikantadfærden, som en optimeringsfaktor i tilstræbelsen mod forbedret trafikafvikling i de signalregulerede kryds, hvor blandt andet førerstøtte kan reducere de negative konsekvenser af uopmærksomhed i

trafikken. I forhold til førerstøtte vurderes der dog at være en risiko for, at implementeringen af funktioner og enheder i køretøjet kan have den modsatte effekt i tilfælde, hvor simultankapaciteten hos føreren er utilstrækkelig, hvilket i værste fald også kan reducere trafiksikkerheden.

I stedet for forskellige former for førerstøtte fremgår det i litteraturen, at der forskes i at optimere fremkommeligheden ved at lade de enkelte køretøjer overtage flere af førerens opgaver. V2I og V2V kommunikation betragtes derfor af flere som nøglen til optimering og derved realiseringen af en bedre kapacitet i byernes kapacitetssættende kryds.

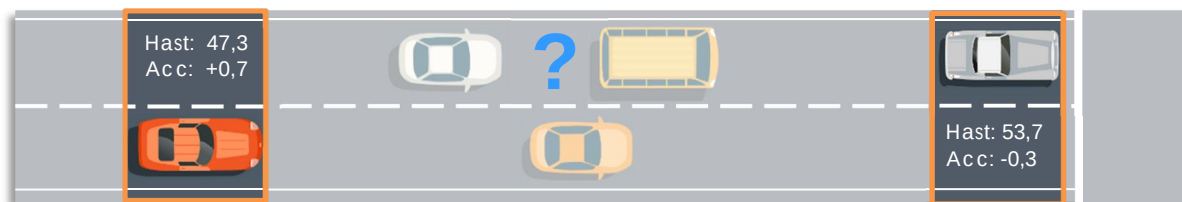
På grund af traditionelle principper inden for signalstyring samt anvendelse af ældre detekteringsteknologier vurderes trafikanter i større eller mindre grad at opleve unødigt forsinkelse for rødt i signalregulerede kryds. At trafikanter øjensynligt oplever unødigt forsinkelse synes paradoksalt, når det i vejledende håndbøger fremgår, at der skal redegøres for principper, som netop hindrer, at trafikanter skal vente unødigt for rødt.

1.7 Problemformulering

Med udgangspunkt i litteraturgennemgangen er den klare opfattelse, at der foruden det kendte optimeringspotentiale, som er dokumenteret af Vejdirektoratet, eksisterer et hidtil ukendt optimeringspotentiale. Vurderingen udspringer primært at to indgående elementer i arbejdet med signalanlæg, som er anvendelse af;

- Utidssvarende detekteringsformer
- Traditionelle styringsprincipper

Først og fremmest anvendes det, der betragtes som utidssvarende detektorteknologier i signalregulerede kryds. Dette skyldes, at der mange steder anvendes punktdetekteringer via induktionsspoler eller veldefinerede detekteringsområder ved anvendelse af radarer. Simple punktdetekteringer giver således information i de respektive punkter. Informationer fra køretøjer imellem disse punktdetekteringer frem mod et signalreguleret kryds vil dog ikke kunne viderebringes til signalanlægget, hvilket er illustreret på figur 1.15 på næste side. Dette kunne være essentiel informationen som eksempelvis hastighed, acceleration, deceleration eller hvorvidt det givne køretøj gør fuldt stop eller drejer fra, hvis sådanne muligheder eksisterer. Såfremt denne information bliver ind-



Figur 1.15: Traditionelle signalanlæg, som anvender punktdetekteringer i varierende afstand fra stopstreger, modtager ikke essentiel information fra køretøjer på den øvrige del af strækningen frem mod krydset.

samlet, videregivet og anvendt til signalstyring, er der en forventning om, at dette vil medvirke til en bedre trafikafvikling.

Derudover er det indtrykket, at der i forbindelse med arbejdet vedrørende signalregulering indgår nogle klare, traditionelle principper inden for signalstyring. Eksempler på sådanne principper kunne være forudbestemt faseskift, faste maksimale grøntider afledt af faste omløbstider samt faste offset-tider mellem samordnede signalregulerede kryds. Disse traditionelle principper er grundlæggende hensigtsmæssige, da de medvirker til at eliminere urimelige ventetider fra underordnede veje i kryds. Derudover danner de grundlag for en ensretning af de signalregulerede kryds, som gør dem forudsigelige, hvilket er til gavn for trafikanterne. Der vurderes dog at være en risiko for, at de traditionelle

principper inden for styring af signalanlæg i dag har en negativ effekt og i stedet fungerer som en barriere i forhold til at reducere unødigt forsinkelse for rødt og tilvejebringe en bedre fremkommelighed.



Figur 1.16: Principsskitse, som illustrerer situationer på en strækning med flere samordnede signalanlæg, hvor traditionelle principper, herunder teoretisk beregnede offset-tider samt en fast maksimal grøntid afledt af en fast omløbstid, medvirker til en unødigt ventetid for rødt på såvel primær- som sekundærvej.

for, at trafikanter på sekundærvejen kommer til at vente unødigt for rødt, da trafikken på primærvejen er afviklet hurtigere end forventet. Er den reelle hastighed derimod lavere end den anvendte ideal hastighed, er der en risiko for, at en kolonne på primærvejen ikke afvikles i løbet af grøntiden og derved splittes. At en kolonne af køretøjer splittes, vurderes også i nogle tilfælde at være forårsaget af en fast maksimal grøntid, som er afledt af en fast omløbstid. Derved vurderes det, at offset-tider beregnet på baggrund af en ideal gennemsnitshastighed samt faste omløbs- og grøntider er medvirkende til en overordnet forringelse af fremkommeligheden.

Som konsekvens af utidssvarende detekteringsformer samt traditionelle principper inden for styring af signalanlæg vurderes der at være flere tilfælde, hvor trafikanter oplever unødigt forsinkelser for rødt i nutidens signalregulerede kryds. Såfremt der gøres op med de traditionelle principper inden for signalstyring og nye, effektive detekteringsteknologier kan anvendes, er det hypotesen, at der eksisterer et hidtil ukendt optimeringspotentiale i de signalregulerede kryds.

I indeværende projekt tilstræbes det at dokumentere det forventede optimeringspotentiale ved at gøre op med traditionelle styringsprincipper og i stedet anvende en intelligent og mere fleksibel signalstyring, som tilvejebringes ved anvendelse af en matematisk optimeringsmodel. Dertil forventes moderne detekteringsteknologier anvendt som erstatning for de traditionelle punktdetekteringer. På baggrund af dette, er der udarbejdet følgende problemformulering:

Eksisterer der et ukendt optimeringspotentiale i nutidens signalanlæg, som kan indfries ved brug af matematiske optimeringsmodeller samt radarer, og i hvilken størrelsesorden er et sådant potentiale?

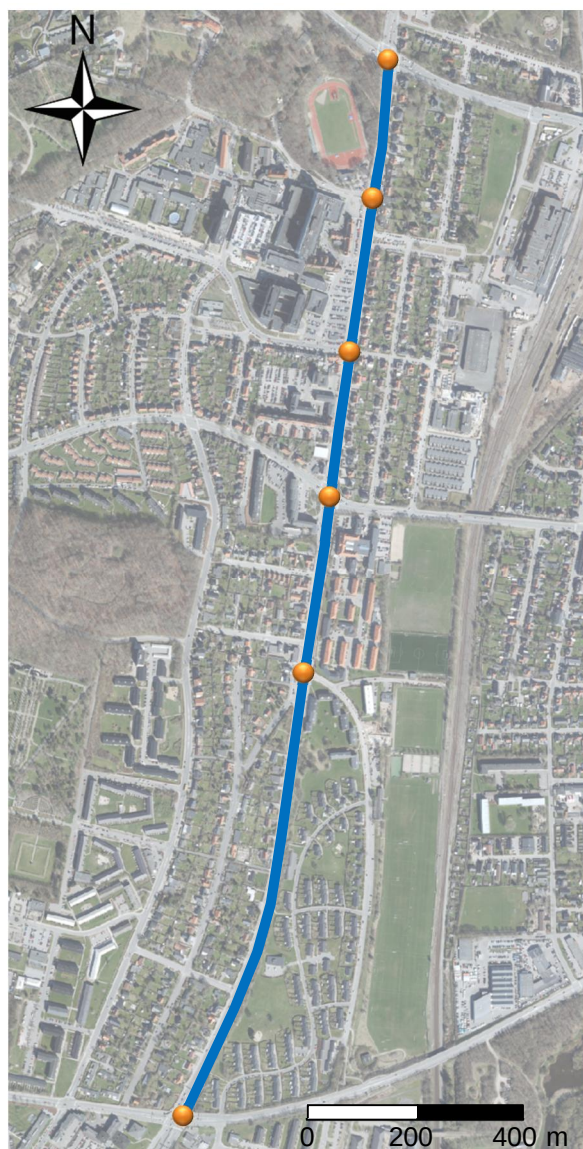
Indeværende projekt har således til formål at undersøge, hvorvidt der eksisterer et hidtil ukendt optimeringspotentiale. Hvis dette er tilfældet, ønskes størrelsesordenen af optimeringspotentialet belyst. Såfremt det er muligt at udvikle en mere intelligent signalstyring, forventes unødigt forsinkelse for rødt i signalregulerede kryds reduceret betydeligt.

Såfremt det omtalte optimeringspotentiale eksisterer og kan indfries, vurderes gevinsterne at være mærkbare. Således forventes trafikafviklingen at foregå mere flydende, som konsekvens af den reducerede ventetid i de signalregulerede kryds, hvilket bevirker, at den enkelte trafikant vil opleve et bedre serviceniveau. Det forventes ligeledes at resultere i et nedsat brændstofforbrug og derved en reduceret udledning af CO₂ og andre miljøskadelige stoffer. Alt sammen virkninger, som vil være til gavn for den enkelte trafikant og samfundet som helhed.

I bestræbelserne på at dokumentere optimeringspotentialet tages der udgangspunkt i en strækning på Hobrovej i Aalborg med seks signalregulerede kryds, hvilket fremgår af figur 1.17 på næste side. Strækningen er en betydelig indfaldsvej til Aalborg og derfor meget trafikeret. Derudover indgår flere af signalanlæggene i en samordning, hvorfor strækningen betragtes som ideel, i forhold til at undersøge, hvorvidt der eksisterer et optimeringspotentiale.

1.8 Projektafgrænsning

Indeværende projektet har til formål at dokumentere et muligt optimeringspotentiale i dagens signalregulerede kryds.



Figur 1.17: Strækning på Hobrovej samt markering af de signalregulerede kryds.

Denne opgave er yderst omfangsrig og forventes at strække sig over en årrække i forlængelse af DiCyPS-projektet [DiCyPS, 2017]. Dette rummer alt fra indledende tests ved anvendelse af trafikmodeller til en reel etablering i eksisterende signalregulerede kryds. Som konsekvens af projektets kompleksitet og omfang er det nødvendigt at definere det primære fokus i indeværende projekt, hvilket nødvendiggør en præcis projektafgrænsning.

Først og fremmest er der i indeværende projekt udelukkende fokus på at dokumentere, at der reelt eksisterer et ukendt optimeringspotentiale. For at realisere dette inden for en tidsbegrænset periode af fire måneders varighed, fokuseres der udelukkende på at dokumentere et optimeringspotentiale ved anvendelse af mikrosimuleringsmodeller - i dette tilfælde VISSIM. Dette skyldes, at en reel før- og efteranalyse vil være yderst ressourcekrævende og derved urealistisk i forhold til den tidsbegrænsede periode, hvor projektet pågår.

Selv ved anvendelse af mikrosimuleringsmodeller i VISSIM betragtes projektet som omfangsrigt. I bestræbelserne på at dokumentere optimeringspotentialet er det ideelt at undersøge flere områder og vej-

strækninger med signalregulerede kryds. Dette vil give mulighed for at dokumentere, hvorvidt en eventuel effekt er generel eller stedsspecifik. For at gengive de trafikale forhold i mikrosimuleringsmodellen skal den eksisterende trafikale situation korlægges, hvilket er ressourcekrævende. Derfor tages der i projektet kun udgangspunkt i én vejstrækning i form af den førnævnte strækning på Hobrovej. Selve optimeringen undersøges udelukkende i de fire signalregulerede kryds inde på selve strækningen, mens det nord- og sydligste kryds blot indgår for at tilvejebringe en virkelighedsnær trafikalsituation i mikrosimuleringsmodellen.

Af hensyn til kortlægningen af den aktuelle trafiksituation tages der udelukkende udgangspunkt i morgenmyldretiden i tidsrummet fra kl. 7:00 til kl. 9:00. Såfremt der viser sig at være en effekt, er denne således til stede i dette tidsrum. Umiddelbart forventes optimeringspotentialet at være i samme størrelsesorden i både morgen- og eftermiddagsmyldretiden. Der kan dog være en difference, da eksempelvis retningsfordelingerne i de respektive kryds er forskellige i de to myldretidsperioder.

Som tidligere nævnt er kortlægningen af den eksisterende trafik meget ressource-

krævende, da der skal foretages krydstællinger af to timers varighed i samtlige kryds på den indgående strækning. Dette bevirker, at der i indeværende projekt udelukkende er fokus på motortrafikken. Derfor indgår fodgængere og cyklister (herunder lille knallert) ikke i kortlægningen og indgår derved heller ikke i mikrosimuleringsmodellen. Dette skal ses som en nødvendighed, da de førnævnte trafikantgrupper ideelt set skulle indgå i projektet, da både fodgængere og cyklister i større eller mindre grad har indflydelse på den øvrige trafikafvikling. Den indflydelse fodgængere og cyklister eventuelt måtte have på den øvrige trafik antages at være identisk i både før- og efter-situationen. Derved forudsættes sammenligningen af resultaterne i før- og efter-situationen er være acceptabel.

Foruden de førnævnte trafikantgrupper fokuseres der heller ikke isoleret set på den kollektive trafik i form af busstrafik. Da det primære fokus er på den overordnede trafik, er det ikke muligt at undersøge de faktiske rejsetider for de konkrete buslinjer. Af samme årsag afgrænses der også fra busprioriteringen i de signalregulerede kryds på den i projektet indgående strækning. I stedet anvendes signalprogrammerne uden busprioritering.

Som tidligere skrevet er det primære fokus på den overordnede trafikafvikling, hvor der blandt andet sættes fokus på rejsetider, forsinkelser samt antal stop i de signalregulerede kryds. Derved centrerer projektet primært omkring fremkommelighed og trafikafvikling. Det forholdsvis snævre perspektiv bevirker således, at der ikke i nævneværdig grad fokuseres på de miljømæssige effekter samt trafiksikkerhed til trods for, at en ny signalstyring forventes at have indflydelse på disse parametre.

Som skrevet indledningsvist i projektafgrænsningen betragtes indeværende projekt, som et indledende skridt i bestræbelserne på at realisere et forventet optimeringspotentiale i nutidens signalregulerede kryds. I indeværende projekt anvendes decentrale styreapparater i signalanlæggende, hvor den efterfølgende forskning formegentligt vil centrere sig om en central signalstyring, da dette vurderes at have en endnu større effekt i forhold til trafikafviklingen i de signalregulerede kryds.

2 Metode

De metoder, som er anvendt i projektet, betragtes som det overordnede projektgrundlag. De anvendte metoder har således stor betydning for projektets kvalitet og har direkte indflydelse på resultater og konklusioner, som tilvejebringes på baggrund af projektarbejdet. Derfor beskrives metoder samt arbejdsgange og -processer, som er anvendt i projektet, i indeværende kapitel.

2.1 Systematisk litteratursøgning

Forud for selve projektet foreligger en omfangsrig og systematisk litteratursøgning af relevant litteratur i forhold til optimering af signalanlæg, herunder styringsprincipper samt optimeringsmuligheder. Den indgående litteratur indgår hovedsageligt i kapitel 1, straktende fra side 1 og er derudover sammenfattet i et litteraturstudie og fremgår af appendiks A på side 75. Formålet med litteratursøgningen er at afdække og

vurdere den internationale forskningsviden, som allerede er tilvejebragt, hvorved der for det efterfølgende projektarbejde er dannet et udgangspunkt.

Til litteratursøgningen er de primært anvendte databaser:

- TRID – Transportation Research Information Documentation
- IEEE Xplore: digital library

Den lavpraktiske søgeteknik har bestået i at anvende trunkering samt boolske operatoren, så der eksempelvis er foretaget søgning på både *Signalized Intersection* og *Traffic Light*. Trunkering er anvendt for at udvide søgningen, så endelser eller stavemåder ikke begrænser søgningen. Dette kunne eksempelvis være ved søgning på *Signalized/Signalised*, hvor begge stavemåder fremgår i litteraturen.

De overordnede nøgleord, som er anvendt i forbindelse med litteratursøgningen er;

- Traffic
- Radar
- Signali(s/z)ed Intersection
- Traffic light
- Real Time

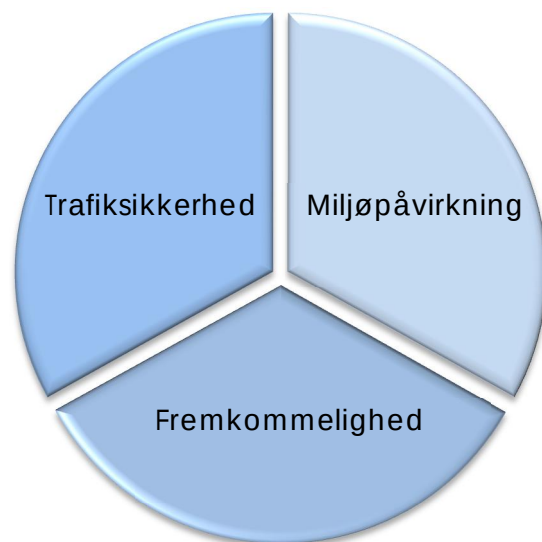
Da der ved en søgning på eksempelvis *Traffic, Signalized Intersection* fremkommer flere hundrede artikler, har det været nødvendigt at præcisere yderligere, hvorfor *Real Time* og *Radar* også er anvendt i søgningen. Denne præcisering begrænser materialet tilstrækkeligt, men medfører også en risiko for, at relevant materiale frasorteres. Dette vurderes dog at være nødvendigt i forhold til den begrænsede tidsramme.

På baggrund af litteratursøgningen er materialet gennemgået, hvor egnetheden i forhold til indeværende projekt er vurderet. I relevant materiale er indgående referencer gennemgået, hvoraf flere efterfølgende er benyttet. Det relevante materiale er foruden de primært anvendte databaser også tilgået via:

- Science Direct
- Google Scholar
- SpringerLink
- Primo (Aalborg Universitet)

Litteraturstudiet omfatter over 40 forskningsrapporter, videnskabelige artikler, foredrag samt håndbøger, brugervejledninger og produktbrochurer fra både ind- og udland. Det i litteraturstudiet indgående materiale vedrører tre primære områ-

der, som er fremkommelighed, trafiksikkerhed samt miljøpåvirkning, hvilket ligeledes fremgår af figur 2.1. Dele af materialet vedrører blot ét af de nævnte områder, mens hovedparten af det indgående materiale i større eller mindre grad indeholder elementer fra alle tre områder. I materialet indgår blandt andet optimering af trafikafviklingen, herunder signaloptimering, traditionelle og moderne detekteringsteknologier, dilemmazone-problematikken,



Figur 2.1: De tre overordnede områder, som er indgående elementer i litteraturen. Hovedparten af litteraturen indeholder dog elementer fra alle tre områder.

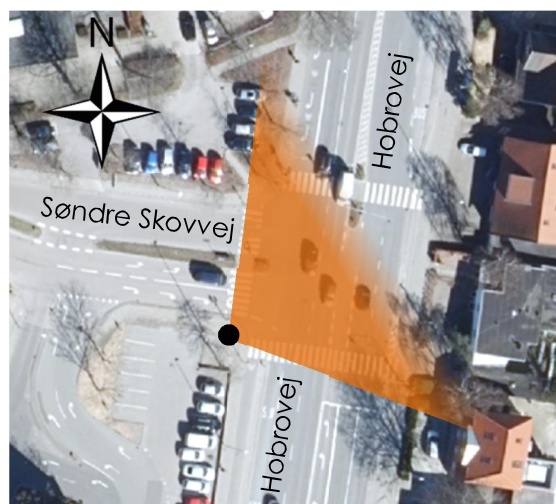
trafikantadfærd samt vejsignaler generelt. Kvaliteten af det indgående materiale vurderes at være høj, mens enkelte referencer er af varierende kvalitet.

2.2 Dataindsamling

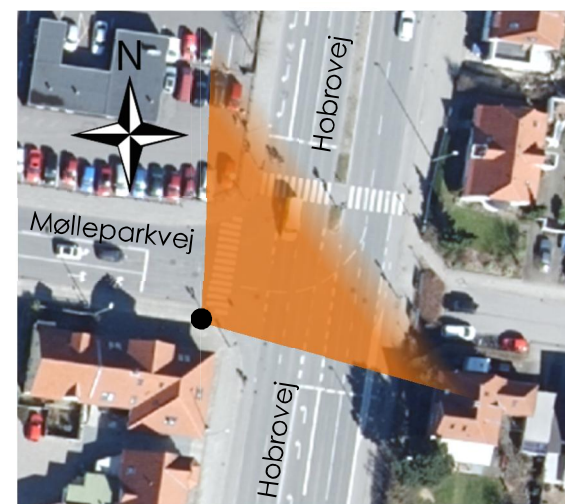
Indeværende projekt tager udgangspunkt i en 2 km. lang strækning på Hobrovej i Aalborg med 6 signalregulerede kryds, hvilket beskrives nærmere i kapitel 3 på side 35. Der er behov for data, som forholdsvis detaljeret beskriver den reelle trafik på strækningen. Foruden et indblik i den trafikale situation, skal data også bruges i forbindelse med modelopbygningen

i mikrosimuleringsprogrammet VISSIM. I den forbindelse er der, i samarbejde med Aalborg Kommune, indhentet videoobservationer af de 6 signalregulerede kryds i tidsrummet fra kl. 7:00 til kl. 9:00 på hverdage med undtagelse af fredag, da trafikken på denne ugedag i nogle tilfælde kan være uregelmæssig.

Videoobservationerne er indhentet ved at opsætte et videokamera i en nærliggende mast, som vist på figur 2.2 og 2.3, hvor selve krydsarealet er synligt, som det ses af henholdsvis figur 2.4 og 2.5. Af de fire førnævnte figurer fremgår således placering samt kameravinklen i de to signalregu-



Figur 2.2: Placering af kamera samt kameravinkel i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.



Figur 2.3: Placering af kamera samt kameravinkel i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.



Figur 2.4: Kameravinkel af selve krydsarealet i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.



Figur 2.5: Kameravinkel af selve krydsarealet i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

lerede kryds ved Hobrovej / Mølleparkvej og Hobrovej / Søndre Skovvej. Den viste fremgangsmåde er identisk for dataindsamlingen i de fire resterende signalregulerede kryds. På figur 2.6 fremgår den lavpraktiske opsætning af et videokamera. Dato for indsamling af de respektive videoobservationer fremgår af tabel 2.1. På baggrund af videoobservationerne kan der foretages en krydstælling, som er det primære formål med videoobservationerne. Derudover giver disse også mulighed for, at kvalitetssikre den opbyggede mikrosimuleringsmodel, da trafikafviklingen i modellen kan holdes op mod den reelle trafikafvikling.

Foruden videoobservationerne er alt signalteknisk dokumentation, i relation til de indgående signalanlæg, udleveret af Aalborg Kommune, herunder signalprogrammer, spoleplaner mv.

Kryds	Udført
Hobrovej / Østre Allé	Tor, 30.03.17
Hobrovej / Søndre Skovvej	Tir, 6.12.16
Hobrovej / Mølleparkvej	Tir, 6.12.16
Hobrovej / Ny Kærvej	Tor, 23.03.17
Hobrovej / Provst ejorden	Tir, 11.10.16
Hobrovej / Over Kæret	Ons, 23.11.16

Tabel 2.1: Dato for udførelse af videoobservationerne i de respektive kryds.



Figur 2.6: Opsætning af videokamera i signalmast.

2.3 Databehandling

På baggrund af dataindsamlingen i form af videoobservationer er det muligt at foretage krydstællinger i de enkelte kryds. I samtlige 6 signalregulerede kryds foretages der således krydstællinger i morgen myldretiden fra kl. 7:00 til kl. 9:00. Selve krydstællingerne foretages i kvartersintervaller, mens der foretages en køretøjsklassifikation, hvor der separat registreres;

- Person- og varebiler
- Lastbiler/busser
- Lastbiler med påhæng/sættevogn
- Motorcykler

Som nævnt i projektafgrænsningen indgår de bløde trafikanter ikke i projektarbejdet, hvorfor fodgængere og cyklister ikke registreres. Selve tællingen samt den efterfølgende opregning til personbilenheder er foretaget efter foreskrevne principper i vejledningen, *Trafiktællinger – Planlægning, udførelse & efterbehandling*. Krydstællingerne fremgår af appendiks B på side 79. [Vejdirektoratet, 2006]

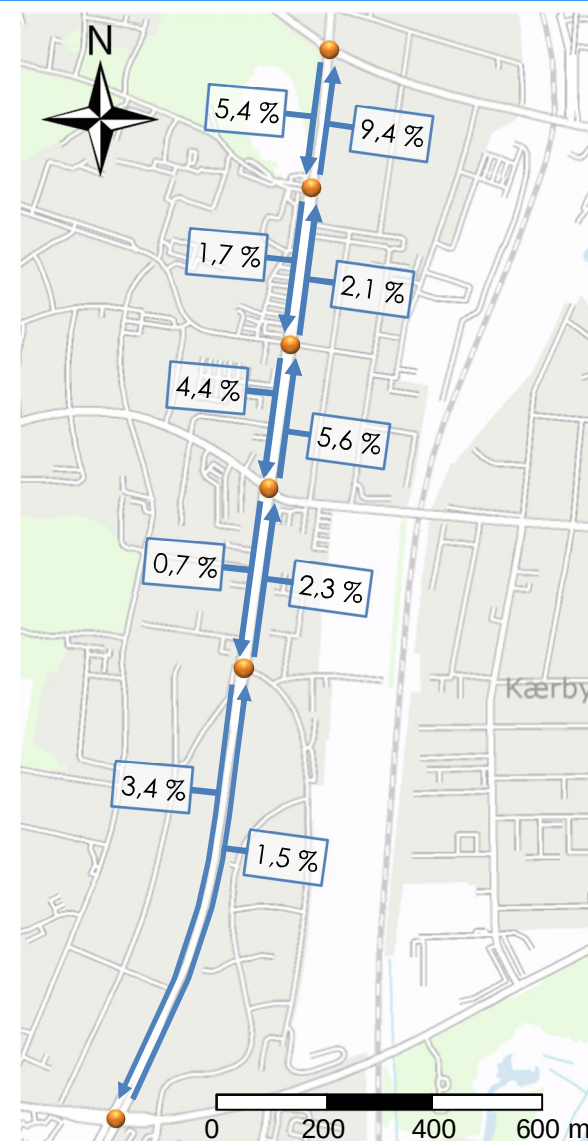
Da videoobservationerne kun dækker selve krydsarealet og ikke samtlige tilfarter, vil den registrerede trafik være lig den afviklede trafik, som bestemmes af kapaciteten i det enkelte kryds. Såfremt den trafikale efterspørgsel overstiger kapaciteten i et

givent kryds, vil dette resultere i kødannelse, som ikke registreres med denne fremgangsmåde. Da krydstællingerne foretages i kvartersintervaller vurderes førnævnte problematik dog ikke at have nævneværdig indflydelse, da efterspørgsel ikke vurderes at overstige kapaciteten i længevarende perioder på strækningen.

Da de indgående krydstællinger er foretaget på forskellige ugedage over flere måneder ønskes validiteten kontrolleret. Derfor er der foretaget en sammenligning mellem den udkørende trafik i ét kryds, og den indkørende trafik i det efterfølgende kryds i både nord- og sydgående retning. Af figur 2.7 fremgår den procentuelle afvigelse mellem den ind- og udkørende trafikstrømme i de signalregulerede kryds. Som det fremgår, er afvigelserne relativt beskedne og vurderes at skyldes dag-til-dag variation. Derudover er der også flere mindre sideveje, indkørsler til beboelsesejendomme samt indkørsler til enkelte erhvervsejendomme, hvilket bevirker, at der naturligt vil være en afvigelse mellem krydstællinger udført i samme tidsrum.

2.4 Trafikmodellering

I indeværende projekt ønskes det undersøgt, hvorvidt der er et ukendt optimeringspotentiale, som kan realiseres ved en



Figur 2.7: Kvalitetssikring af den ind- og udkørende trafik i de signalregulerede kryds.

intelligent signalstyring. Effekten skal således dokumenteres, hvor også størrelsesordenen er interessant at få belyst. Det vurderes ideelt at vurdere effekten på baggrund af en før- og efteranalyse via et fuldskalaforsøg, hvor virkninger og konsekvenser af den intelligente signalstyring vil vise sig direkte efter en eventuel indkøringsperiode. Da dette forudsætter radar-detektering i samtlige kryds, vil dette være ressourcekrævende. Derudover er et fuldskala også forbundet med en vis risiko, da effekten af den nye signalstyring kan være ikke eksisterende eller i værste fald negativ. Disse elementer bevirker, at det ikke er muligt at udføre et fuldskalaforsøg i bestræbelserne på at dokumentere effekten af en intelligent signalstyring. Som alternativ til et ressourcekrævende og risikobetonet fuldskalaforsøg anvendes trafikmodellering. Ved at opbygge en trafikmodel, som tilnærmelsesvis gengiver den eksisterende trafiksituation, er det muligt at vurdere effekten af den intelligente signalstyring ved at udføre en før- og efteranalyse. Dette forudsætter dog, at trafikmodellen betragtes som repræsentativ og opfylder krav til validitet.

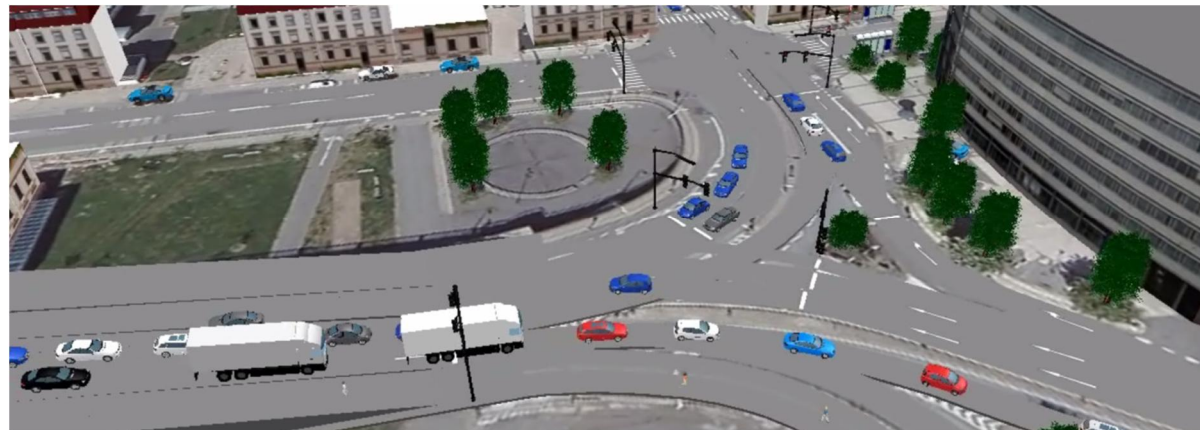
I arbejdet med trafikmodellering arbejdes der grundlæggende med to overordnede niveauer som er:

- Makroskopiske modeller
- Mikroskopiske modeller

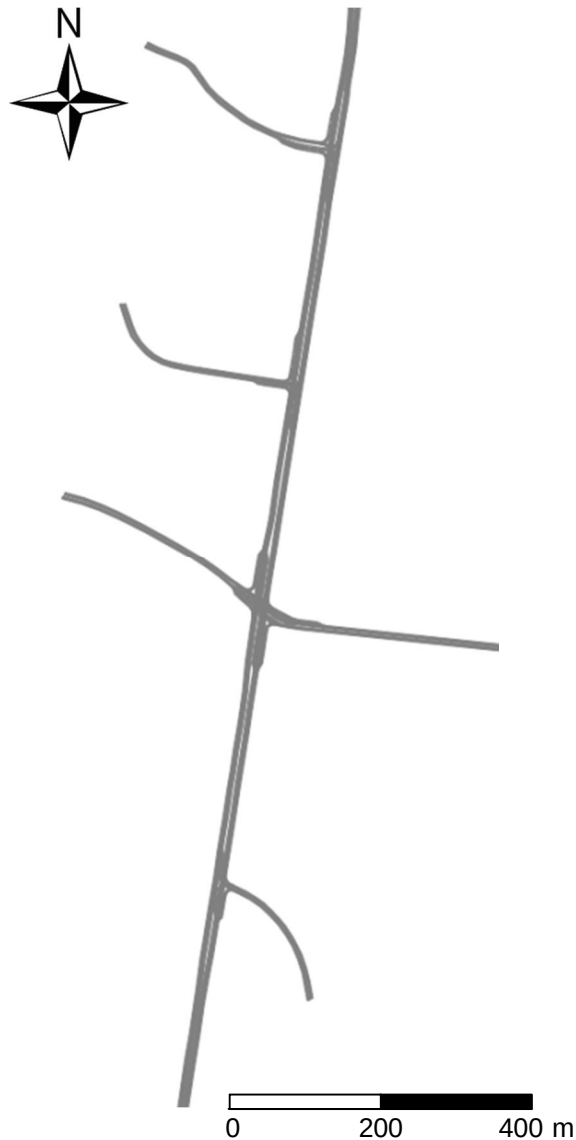
Trafikmodellering på et makroskopisk niveau er meget overordnet med en grov inddeling af zoner og vejsegmenter, hvormed detaljeringsgraden betegnes som værende lav. Modsat er trafikmodeller, som opererer på et mikroskopisk niveau, forholdsvis detaljeret, da der arbejdes på individniveau. Dette indebærer, at den enkelte trafikants ageren i modellen kan monitoreres, hvilket giver et detaljeret og minutiøst datagrundlag. [vejregelrådet, 2010]

Da evalueringen af den intelligente signalstyring skal vurderes ud fra parametre som antal stop, forsinkelse og brændstoffor-

brug anvendes en mikroskopiske trafikmodel, da det herigennem er muligt at tilvejebringe resultater med en meget høj detaljeringsgrad. I projektet anvendes VISSIM, som udvikles af PTV Group i Tyskland. VISSIM karakteriseres som et multimodalt mikrosimuleringsprogram med en høj detaljeringsgrad, hvilket fremgår af figur 2.8. VISSIM er et af de verdensførende programmer indenfor mikrosimulering og har i en dansk kontekst monopol på området. Dette skyldes blandt andet, at der er udført en vejregel, *Anvendelse af mikrosimuleringsmodeller*, som kommer med en række anbefalinger i forbindelse med mikrosimuleringsarbejdet, hvilket er medvirkende til at ensrette parameterværdier og procedurer. Dette sikrer i nogen grad en ensretning mellem modeller fra forskel-



Figur 2.8: Eksempel på mikrosimulering i VISSIM, hvor den meget høje detaljeringsgrad fremgår.



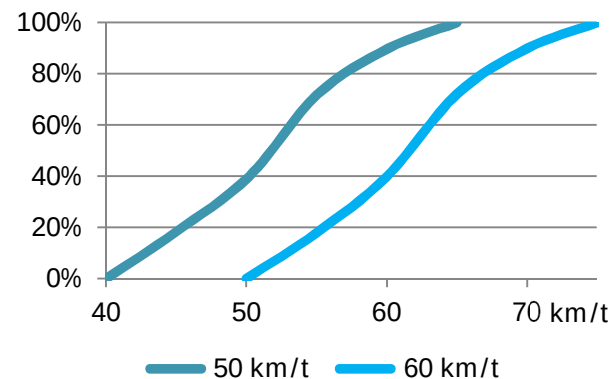
Figur 2.9: Modelopbygningen i VISSIM, hvor baggrundkort er deaktiveret.

lige rådgivningsvirksomheder, som primært udfører mikrosimuleringer. [Vejreglerådet, 2010]

Modelopbygning

Modelopbygningen i VISSIM foregår intuitivt på baggrund af et integreret ortofoto som baggrundkort i selve programmet. Derved er det muligt at modellere de enkelte kørespor, svingbaner og kryds. For at udarbejde en model, som tilnærmelsesvis er identisk med virkeligheden, tages der udgangspunkt i faktiske forhold og udformninger i området, som gennemgås i kapitel 3 på side 35. Modelopbygning i VISSIM fremgår af figur 2.9.

I forhold til hastighedsfordelingen i modellen tages der udgangspunkt i den fører-



Figur 2.10: De anvendte hastighedsfordelinger i modellen.

talte vejregel, som indeholder nogle gennemsnitlige hastighedsfordelinger på baggrund af reelle hastighedsmålinger. På den i projektet indgående strækning er den tilladte hastighed 50 km/t og 60 km/t på henholdsvis den nord- og sydlige del af strækningen, mens den tilladte hastighed på samtlige sideveje er 50 km/t. Den ønskede hastighed for køretøjerne i modellen er således givet med udgangspunkt i hastighedsfordelingerne, som fremgår af figur 2.10. [Vejreglerådet, 2010]

Foruden den tilladte hastighed ønskes hastigheden også reduceret i forbindelse med svingmanøvrer, for at gengive de faktiske forhold. Til dette anvendes funktionen *Reduced Speed Areas*, hvilket fremgår af figur 2.11. Funktionen bevirker, at



Figur 2.11: Modelling af Reduced Speed Areas i det krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

hastigheden reduceres fra den tilladte hastighed til en hastighed på mellem 18 og 22 km/t. Denne hastighed realiseres inden køretøjet påkører det hastighedsreducerende areal.

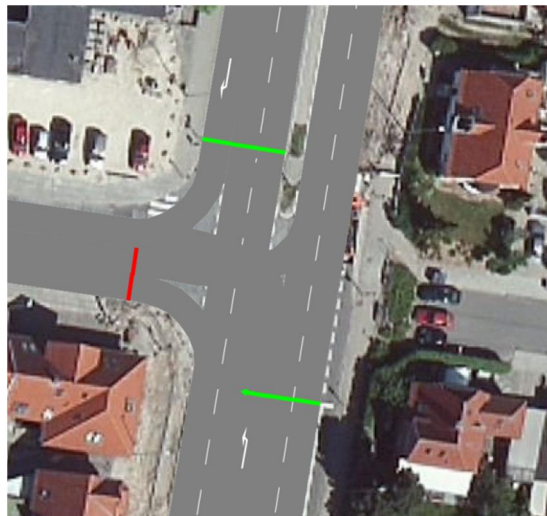
I VISSIM modelleres de fire signalregulerede kryds på selve strækningen, mens de to signalregulerede kryds i henholdsvis den nord- og sydlige ende af strækningen ikke gengives eksakt. I stedet indlægges blot nogle fiktive signaler, som bevirker, at køretøjerne ankommer mere eller mindre grupperet til de øvrige kryds, hvilket er i overensstemmelse med virkeligheden. De fire signalregulerede kryds er modelleret, som eksemplificeret på figur 2.12, hvor der tages udgangspunkt i krydsudformningen. Derudover er der taget udgangspunkt i de reelle signalgruppeplaner mm., som fremgår af kapitel 3 på side 35. Da krydsene i dag er trafikstyret er det nødvendigt at anvende tillægsprogrammet VISVAP i forbindelse med modellering af den eksisterende signalstyring. VISVAP anvendes ikke i forbindelse med den intelligente signalstyring, som beskrives i afsnit 2.5 i indeværende kapitel. Tillægsprogrammet VISVAP giver mulighed for at modellere trafikstyrede kryds, hvor forlængelser og fasevalg bestemmes afhængigt af anmeldelser på de indlagte detektorer. En mere detaljeret

beskrivelse af modelleringen i VISVAP fremgår af appendiks C på side 85.

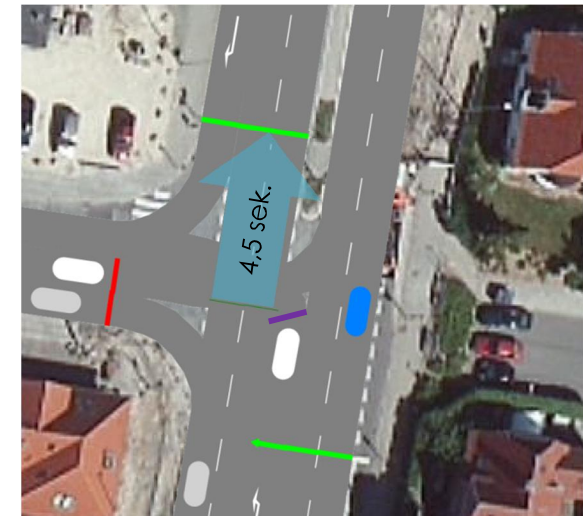
Med de signalregulerede kryds følger også en eliminering af primærkonflikter i krydsarealet. Sekundærkonflikter skal dog reguleres ved almindelig vigepligt i mikrosimuleringsmodellen. Til dette anvendes funktionen *Priority Rules*, som lavpraktisk er en vigelinje, for den underordnede strøm, hvortil der angives en længde- og/eller tidsafstand. Funktionen baserer sig således på tidsgabsteorien, hvilket også fremgår af figur 2.13. I modellen er det anbefalede tidsgab på 4,0 sekunder, på baggrund af

vejreglen, anvendt. En visuel inspektion af mikrosimuleringerne viser dog, at dette gab i flere tilfælde ikke er tilstrækkeligt i de signalregulerede kryds. Derfor opjusteres tidsgabet for den overordnede strøm til 4,5 sekunder, hvilket også ligger inden for normalområdet i vejreglen. Derved undgås kollisioner i simuleringerne.

Foruden de omtalte funktioner er der også en lang række indstillinger, som relaterer sig til trafikantadfærden. Dette gælder eksempelvis kørselsafstand, trafikantens evne til at observere flere objekter, adfærd ved vognbaneskitte og i signalregule-



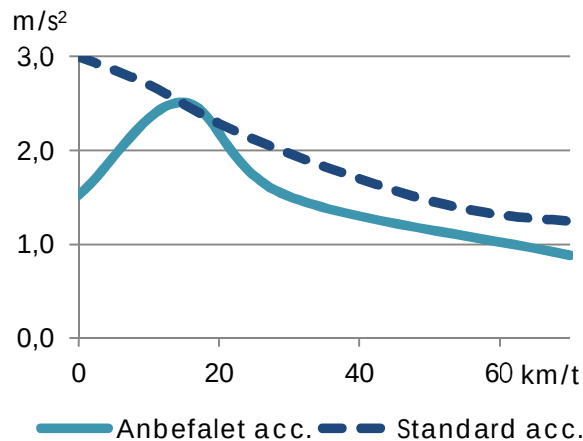
Figur 2.12: Eksempel på modellering af et signalreguleret kryds i VISSIM.



Figur 2.13: Principskitse, som illustrerer vigepligt i et signalreguleret kryds i VISSIM.

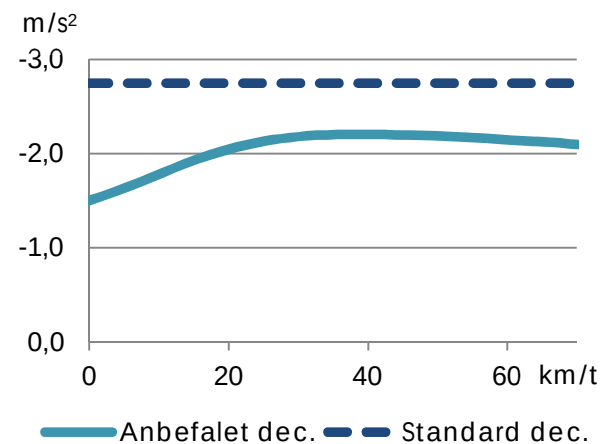
rede kryds samt acceleration og deceleration af køretøjerne i modellen. Specielt de to sidstnævnte parametre, acceleration og deceleration, har en betydelig indflydelse på trafikafviklingen i modellen. De tyske standardparametre fremgår af figur 2.14 og 2.15 og betragtes som meget optimistiske og realisere derved en betydeligt mere effektiv trafikafviklingen. Dette er også belyst i den vejledende vejregel og er naturligt tilpasset i modellen, så trafikantadfærden afspejler den danske trafikantadfærd.

Før modellen er færdigopbygget skal det trafikale input samt rutevalg defineres i



Figur 2.14: Standard acceleration i VISSIM samt den i vejreglen anbefalede acceleration.

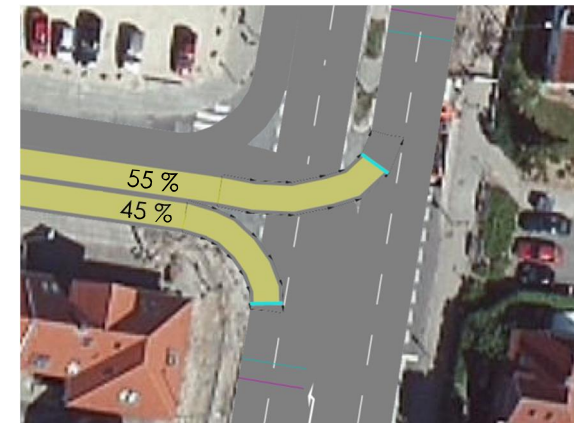
modellen. Som tidligere nævnt er der udført krydstællinger i de 6 signalregulerede kryds med registrering i kvartersintervaller, hvor krydstællingerne fremgår af appendiks B på side 79. Den talte trafik implementeres i modellen med en stokastisk variable, som afspejler dag-til-dagvariationen, hvormed trafikintensiteten varierer fra simulering til simulering. Rutevalget er ligeledes modelleret på baggrund af krydstællingerne, hvor retningsfordelingen i de signalregulerede kryds er indlagt i VISSIM. Selve modelleringen af rutevalget fremgår af figur 2.16.



Figur 2.15: Standard deceleration i VISSIM samt den i vejreglen anbefalede deceleration.

Mikrosimulering

Som tidligere nævnt anvendes mikrosimuleringer som værktøj til at bestemme effekten af den intelligente signalstyring gennem en før- og efteranalyse. Simuleringerne er identiske i før- og efter-situation, hvor det således kun er selve signalstyringen der ændres. Der foretages i alt 5 simuleringer for både før- og efter-situationen, hvor der anvendes forskellige *random seeds*, hvilket bevirker, at ankomstfordelingen i modellen vil variere fra simulering til simulering. Trafikmængden er således identisk, men den varierende ankomstfordelingen betyder, at hver enkelt simulering er unik. Den varierende ankomstfordeling anvendes



Figur 2.16: Eksempel på modellering af rutevalg i VISSIM.

des for at mindske risikoen for statistisk usikkerhed.

Den enkelte simulering foretages i morgenmyldretiden over to timer i tidsrummet fra kl. 7:00 til kl. 9:00. Forud for de to timer anvendes en opstartsperiode på et kvarter for at generere trafik i modellen, så trafiksituationen tilnærmelsesvis afspejler den reelle trafiksituation. Selve simuleringen foretages i step af 0,1 sekund, hvilket giver en god overensstemmelse mellem model og virkelighed.

Evaluerings

For at evaluere effekten af den intelligente signalstyring foretages mikrosimuleringer med denne samt mikrosimuleringer med den eksisterende signalstyring, hvorved effekten kan bestemmes.

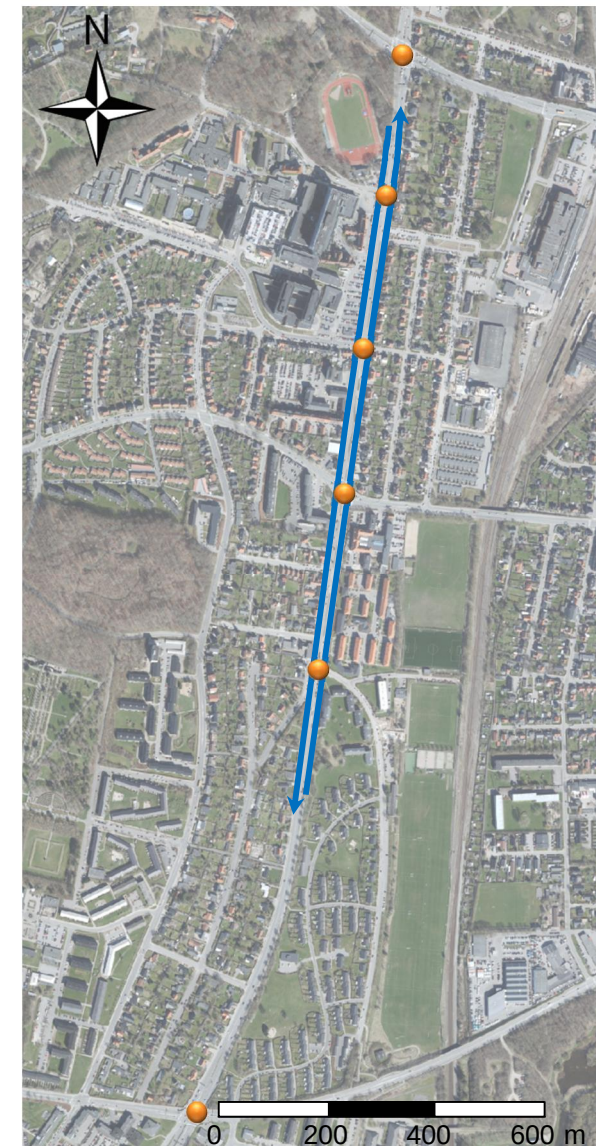
Til evaluering af trafikafviklingen i de enkelte kryds anvendes funktionen *Nodes* i VISSIM. Funktion giver mulighed for at markere et område, i dette tilfælde et signalreguleret kryds. Funktionen registrerer en lang række data fra de enkelte køretøjer. Dette gælder blandt andet retningsfordeling, kølængde, forsinkelse, antal stop samt brændstofforbrug. Disse data aggregeres efterfølgende, hvilket giver mulighed for at bestemme middelforsinkelsen

samt 95 %-fraktilen af kølængden i krydssets respektive tilfartsspor. I det enkelte kryds sammenholdes;

- Middelforsinkelsen
- Kølængden (95 %-fraktil)
- Samlet antal stop i krydset
- Samlede brændstofforbrug i krydset

Foruden evalueringen i det enkelte kryds er det også relevant at undersøge rejsetiden på Hobrovej. Som det fremgår af figur 2.17 registreres rejsetiden i nord- og sydgående retning på en strækning med fire signalregulerede kryds. Årsagen til at henholdsvis det nord- og sydlige kryds ikke medtages i evalueringen af rejsetid skyldes, at disse kryds som tidligere beskrevet ikke er modelleret eksakt. Registreringen af rejsetiden foregår ved anvendelse af funktionen *Vehicle Travel Times* i VISSIM, som helt lavpraktisk beregner rejsetiden ved gennemkørsel af strækningen i både nord- og sydgående retning.

Derved evalueres trafikafviklingen isoleret i de respektive kryds, hvilket gør det muligt at bestemme effekten for de forskellige trafikstrømme, herunder trafik fra sidevejene. Dertil evalueres rejsetiden for den gennemkørende trafik på Hobrovej, hvorved



Figur 2.17: Strækningen for evaluering af rejsetiden vha. *Vehicle Travel Times*.

effekten på en strækning med flere tætliggende kryds ligeledes kan bestemmes.

Dataindsamlingen finder sted under hele den enkelte simulering, dog med undtagelse af opstartsperioden, som dækker over det første kvarter af simuleringen. På baggrund af evalueringen udføres før- og efteranalysen, hvor resultaterne fremgår af kapitel 4 på side 49.

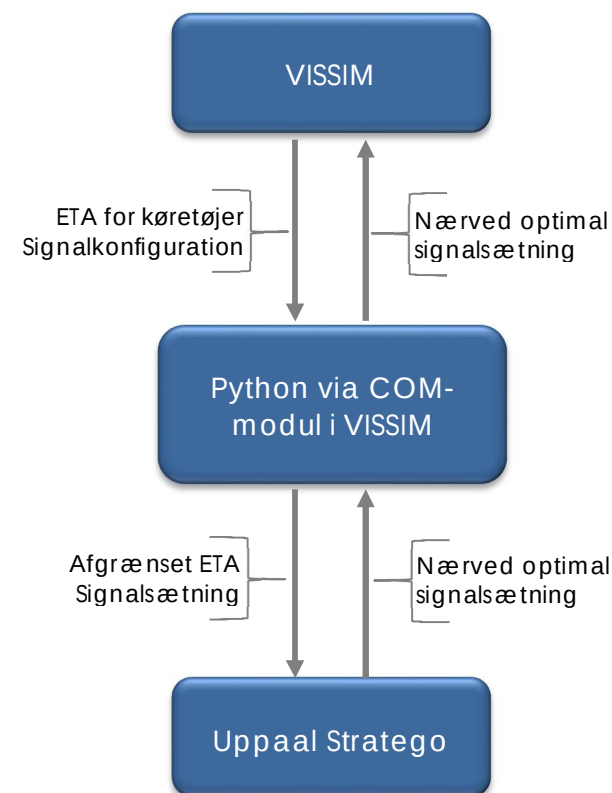
2.5 Intelligent signalstyring

Den intelligente signalstyring betegnes som omdrejningspunktet for indeværende projekt og dækker over en innovativ og dynamisk signalstyring sammenholdt med nutidens signalstyring. Den grundlæggende forståelse for signalstyringen og principperne bag er beskrevet mere detaljeret i kapitel 3 på side 42, som omhandler den intelligente signalstyring, som ved anvendelse i flere tætliggende kryds realiserer en adaptiv signalstyring i realtid. Som tidligere beskrevet foretages mikrosimuleringer via VISSIM til at evaluere effekten af den intelligente signalstyring. Den intelligente signalstyring forudsætter anvendelse af objektetektering, hvilket kan realiseres ved anvendelse af radardetektering. Det er imidlertid kun muligt at implementere veldefinerede detekteringsområder, som fungerer som punktdetektering i VISSIM.

For at realisere objektetektering i VISSIM emuleres radardetektering ved kontinuerligt at trække rådata direkte ud af modellen for samtlige trafikanter. Disse rådata videregives, ved hjælp af Python, til Uppaal Stratego. Uppaal Stratego er et program, som i indeværende projekt anvendes til at genere en nærværd optimal signalstyring. Fremgangsmåden er illustreret på figur 2.18, hvor hastighed og position for samtlige køretøjer samt den nuværende signalsætning trækkes direkte ud af VISSIM. Derefter foretages en selektion, så ETA kan beregnes for køretøjer, der befinder sig op til 200 meter fra stopstregen i de respektive signalregulerede kryds. I Uppaal Stratego anvendes disse data efterfølgende til at generere en nærværd optimal signalstyring, hvor selve processen er beskrevet detaljeret i kapitel 3 på side 42. Efterfølgende sendes den nærværd optimale signalstyring tilbage til VISSIM via Python, hvor VISSIM slutteligt effektuerer denne.

Uppaal Stratego

Uppaal Stratego er et værktøj, som er udviklet af Uppsala Universitet og Aalborg Universitet. Uppaal Stratego anvender maskinlæring til at genere nærværd optimale strategier, som kan anvendes til forskellige formål. I dette projekt anvendes Uppaal



Figur 2.18: Illustration af processen, hvor køretøjsdata fra VISSIM via Python sendes til Uppaal Stratego. Derefter beregnes en nærværd optimal signalstyring, som sendes retur til VISSIM via Python, hvor signalstyringen slutteligt effektueres. Denne proces foretages planmæssigt én gang pr. sekund.

Stratego til at optimere signalsætningen i fire signalregulerede kryds i realtid. [Larsen et al., 2017]

For at forstå processen i Uppaal Stratego er denne illustreret på figur 2.19. Grundlæggende indgår to elementer:

- Tilstande
- Transaktioner

Tilstandene udgøres af punkterne, mens transitionerne udgøres af forbindelserne mellem disse. Fra en tilstand udgøres mu-

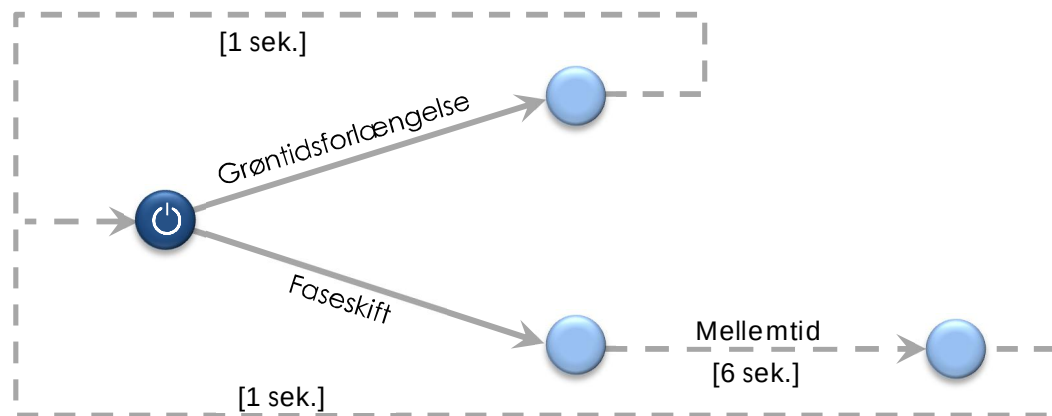
lighederne af de fuldt optrukne linjer, mens en stiplet linje illustrerer en tvungen transition.

I et givent sekund tages der udgangspunkt i start-tilstanden, hvor der i den aktive fase er mulighed for at foretage en grøntidsforlængelse eller et faseskift. Efterfølgende vil valget bevirke, at handlingen effektueres, hvor eksempelvis et faseskift har en varighed på 6 sekunder.

Selve valget foretages på baggrund af data fra den emulerede radardetektering

gen. Med disse informationer forsøger Uppaal Stratego at bestemme den mest optimale signalsætning inden for en horisont på 20 sekunder. Dette gøres ved at teste forskellige signalsætninger for derefter at effektuere den signalsætning, som resulterer i den laveste totale forsinkelse i krydset. Denne metode benævnes også *reinforcement learning*.

En mere detaljeret beskrivelse af selve signalstyringen baseret på Uppaal Stratego, fremgår af kapitel 3 på 42. Dertil fremgår den anvendte og forholdsvis komplicerede model i Uppaal Stratego af appendiks D på side 89.



Figur 2.19: Illustration af processen i Uppaal Stratego, hvor kombinationsmulighederne, i et givent sekund i simuleringen, undersøges inden for horisonten på 20 sekunder. De forskellige kombinationsmuligheder repræsenterer hver især en unik signalsætning inden for horisonten, hvor data fra den emulerede radardetektering bevirker, at modellen kan effektuere den signalsætning, som realiserer den mindst mulige forsinkelse i det signalregulerede kryds.

3 Adaptiv signalstyring i realtid

I indeværende kapitel præsenteres projektlokaliteten med fokus på de signalregulerede kryds, herunder signalgruppeplaner og den aktuelle trafik. Efterfølgende beskrives baggrunden for den intelligente signalstyring inklusiv detekteringsform, signalstyringsprincipper samt processen bag signalreguleringen.

3.1 Projektlokalitet

Projektlokaliteten for indeværende projekt er beliggende i Aalborg nærmere bestemt Hobrovej, hvor der tages udgangspunkt i en godt to kilometer lang vejstrækning, som fremgår af figur 3.1. Vejstrækningen indeholder seks signalregulerede kryds, hvor de fire er firbenede kryds, mens de to resterende er T-kryds. Hobrovej er en betydelig indfaldsvej til Aalborg med en ÅDT på omkring 25.000. Trafikken på strækningen er præget af bolig/arbejdsstedtrafik. [Kmastra, 2017]

Omkring Hobrovej findes flere boligområder, hvor flere villaer og beboelsesejendomme er beliggende direkte ud til selve Hobrovej. Derudover er flere mindre erhvervsejendomme beliggende langs Hobrovej, herunder flere *take away*-restauranter, en cykelhandler samt en tankstation.

Uddannelsesinstitutionen University College Nordjylland (UCN) er også beliggende på Hobrovej, hvilket fremgår af figur 3.2. På UCN udbydes erhvervsakademisk samt professionsbacheloruddannelser, hvilket generer trafik på Hobrovej. Foruden UCN generer Aalborg Universitetshospital,



Figur 3.2: Uddannelsesinstitutionen, UCN, som er beliggende midt på strækningen.



Figur 3.1: De 6 signalregulerede kryds på Hobrovej samt den indbyrdes afstand.

som fremgår af figur 3.3, også trafik i området. Hospitalet er beliggende på en omkring 70.000 m² stor grund nær den nordligste del af vejstrækningen. Hospitalet beskæftiger mange tusinde ansatte og rummer flere hundrede sengepladser. [Aalborg Universitetshospital, 2017]

Vejstrækningen på Hobrovej har to gennemgående spor i både nord- og sydgående retning, hvor der på dele af strækningen er etableret midterrabat, hvilket ses af figur 3.4. På hele strækningen er der ligeledes etableret cykelbane eller -sti, da strækningen dagligt benyttes af omkring



Figur 3.3: Aalborg Universitetshospital er beliggende nær den nordlige del af Hobrovej.

2.000 cyklister [Mastra, 2017]. På den nordligste del af strækningen er den tilladte hastighed 50 km/t, mens der på den sydligste del af strækningen er en skiltet hastighed på 60 km/t, hvilket er illustreret på figur 3.5.

Signalregulerede kryds

De signalregulerede kryds gennemgås enkeltvist, hvor signalgruppeplan samt den udførte krydstælling fremgår. Spoleplanerne fremgår af appendiks E på side 91. For det nord- og sydligste kryds på strækningen ses der bort fra signalgruppeplanen, da signalstyringen, som tidligere nævnt,



Figur 3.4: 4-sporet vejprofil med tilhørende cykelstier og midterrabat på Hobrovej.



Figur 3.5: Hastighedsklassificering samt placeringen Aalborg Universitetshospital samt UCN.

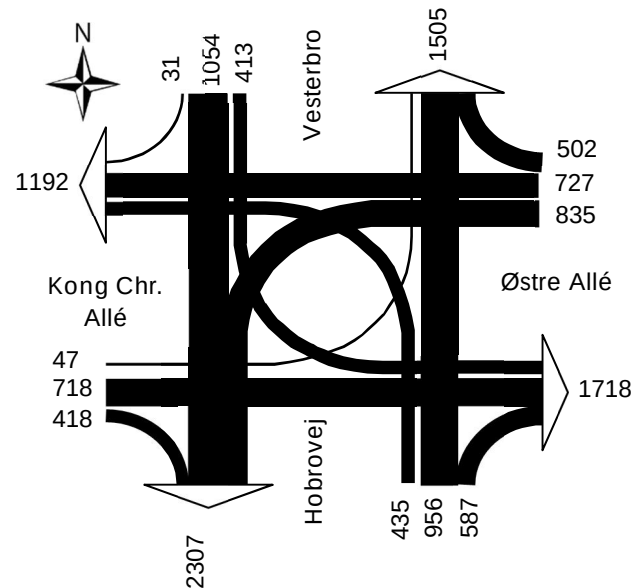
kun optimeres i de fire signalregulerede kryds inde på selve vejstrækningen. I henhold til krydstællingerne er der, for at lette overskueligheden, lavet en opregning til personbilenheder (pe.). Mere detaljerede data af krydstællingerne fremgår af appendiks B på side 79. De signalregulerede kryds gennemgås startende fra nord, og benævnes med Hobrovej og den mest trafikerede sidevej.

Det nordligste af de 6 signalregulerede kryds er beliggende mellem vejene Hobrovej, Østre Allé, Kong Christians Allé



Figur 3.6: Det signalregulerede kryds Hobrovej / Østre Allé.

samt Vesterbro, hvilket fremgår af figur 3.6. Samtlige tilfarter har to gennemgående spor til den ligeudkørende trafik, ligesom der er separate højre- og venstresvingspor for alle fire tilfarter. Krydssets tilfarter har ligeledes cykelstier helt frem til selve krydset. Krydset er forholdsvis trafikkeret, hvilket skyldes at krydsningen sker mellem Hobrovej og Østre Allé, som er henholdsvis indfalds- og ringvej – begge meget trafikkeret.

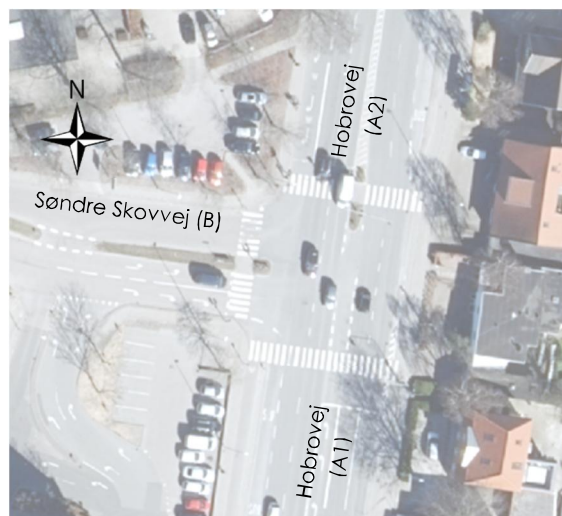


Figur 3.7: Krydstælling fra 7.00 til 9.00 i krydset Hobrovej / Østre Allé [pe.].

At krydset er meget trafikeret understøttes af krydstællingen, som fremgår af figur 3.7, hvor den indkørende trafik er betydelig i samtlige fire tilfarter. Hovedparten af trafikkanterne kører dog ad Østre Allé eller Hobrovej i sydgående retning, mens der også er betydelig trafik i de to øvrige tilfarter. På baggrund af krydstællingen er lastbilprocenten bestemt til 3,4 %, som primært udgøres af buslinjer som benytter Østre Allé og Hobrovej.

Omkring 260 meter længere mod syd er det signalregulerede T-kryds mellem Hobrovej og Sønder Skovvej beliggende, hvor krydset er vist på figur 3.8 på næste side. På Hobrovej er der to gennemgående spor, mens der er etableret højre- og venstresvingsbane ved henholdsvis den nord- og sydlige tilfart. Fra Sønder Skovvej er der etableret både et højre- og venstresvingspor. Fra den nordlige tilfart er der en afkortet cykelsti, mens der ikke er etableret nogen form for cykelfaciliteter på Sønder Skovvej.

Signalanlægget er fuldt trafikstyret, hvor der er mulighed for diverse forlængelser, som det fremgår af signalgruppeplanen, som ses af figur 3.9 på næste side. At krydset er fuldt trafikstyret bevirker også at omløbstiden er variabel. A1v indkobles kun



Figur 3.8: Det signalregulerede kryds Hobrovej / Søndre Skovvej.

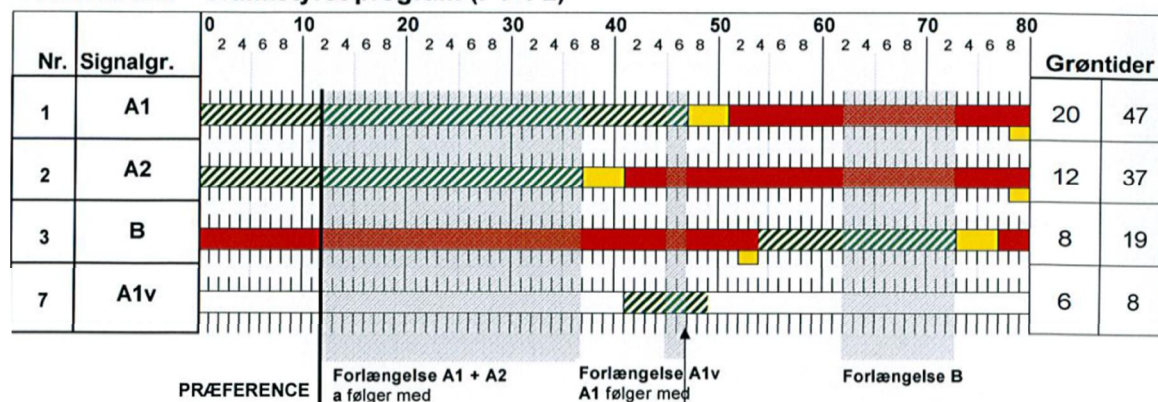
ved kødannelse i venstresvingssporet ved afslutning af grønt i A-retningen. Såfremt der kontinuerligt forekommer anmeldelser fra begge retninger, er omløbstiden typisk 80 sekunder. I krydset anvendes desuden hvilestillingen præference, hvor krydset i trafiksvage perioder uden anmeldelser fra Søndre Skovvej, vil opretholde grønt signal på Hobrovej.

Fokuseres der på trafikken i krydset, fremgår det af krydstællingen på figur 3.10, at trafikken overordnet udgøres af gennemkørende trafik på Hobrovej. Den gennemkørende trafik udgør således 75 % af den samlede trafik i krydset. Det er dog værd

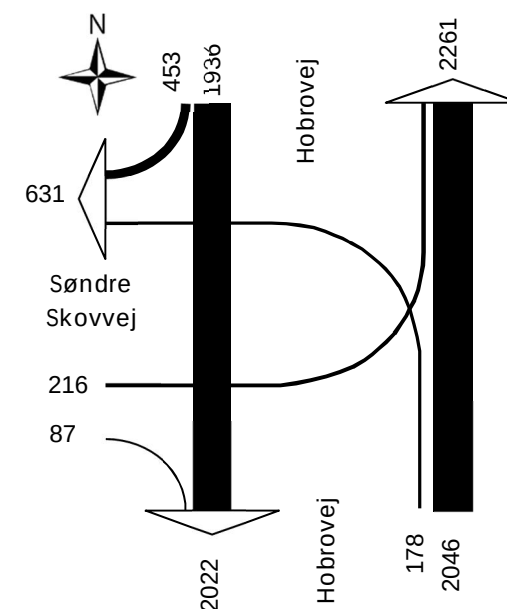
at bemærke, at en del af trafikken kører mod vest ad Søndre Skovvej, hvor flere formodes at have ærinde på Aalborg Universitetshospital. På baggrund af krydstællingen er lastbilprocenten bestemt til 4,2 %. Andelen dækker over flere busser, hvis ruter går via Hobrovej.

Omkring 290 meter mod syd er det signalregulerede T-kryds kryds mellem Hobrovej og Mølleparkvej beliggende, hvilket er vist

PROGRAM: Trafikstyret program (P1+P2)



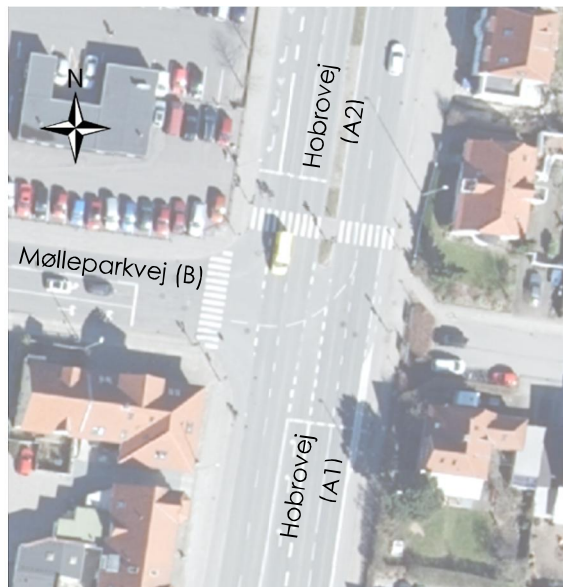
Figur 3.9: Signalgruppeplan i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej. [Aalborg Kommune, 2017]



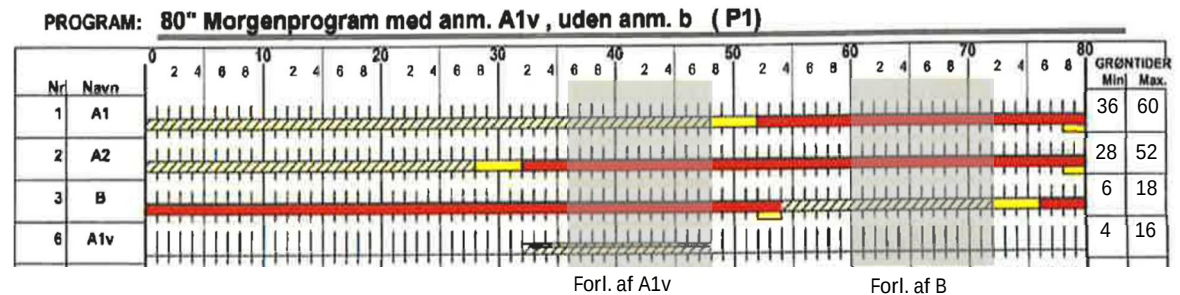
Figur 3.10: Krydstælling fra 7.00 til 9.00 i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej [pe.].

på figur 3.11. I lighed med det forrige kryds er der to spor forbeholdt den gennemkørende trafik på Hobrovej, mens der er et højre- og venstresvingspor ved henholdsvis den nord- og sydlige tilfart. Fra Mølleparkvej er der etableret et venstresvingsspor samt et kombineret højre- og venstresvingsspor, som dog fortrinsvis benyttes af højresvingende bilister.

Det signalregulerede T-kryds er det nordligste kryds i en samordning, hvor de to næstkommende signalanlæg mod syd



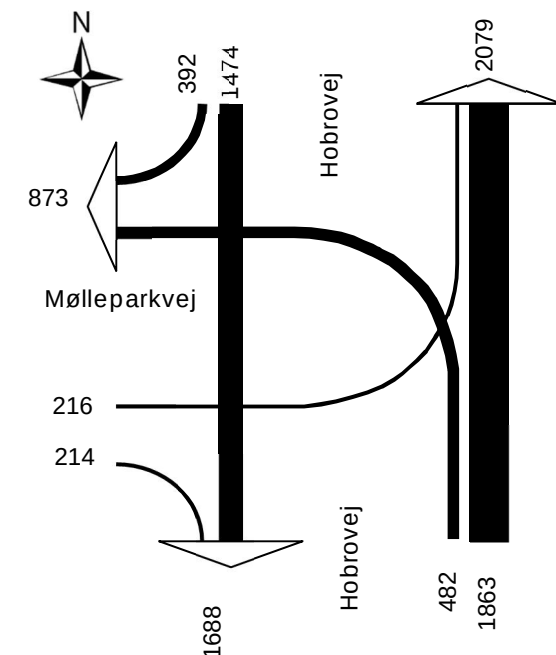
Figur 3.11: Det signalregulerede kryds Hobrovej / Mølleparkvej.



Figur 3.12: Signalgruppeplan i krydset Hobrovej / Mølleparkvej. [Aalborg Kommune, 2017]

ligeledes indgår. Samordningen bevirker, at omløbstiden er fast i samtlige omløb, og i morgenprogrammet er bestemt til 80 sekunder, hvilket fremgår af figur 3.12. Krydset har dog også en intern trafikstyring, som giver mulighed for at forlænge grøntiden for trafikken på Mølleparkvej og indkoble venstresvingsfasen på Hobrovej. Da omløbstiden er fast bevirker dette at grøntiden på Hobrovej reduceres.

Krydstællingen, som fremgår af figur 3.13, viser, at hovedparten af trafikken som forventet er gennemkørende. Derudover kører flere ad Mølleparkvej i vestgående retning, hvilket øjensynligt skal forklares ved, at Mølleparkvej også er adgangsvej til Aalborg Universitetshospital. På baggrund af krydstællingen er lastbilprocenten bestemt til 3,8 %, som igen også dækker over flere busser på Hobrovej.



Figur 3.13: Krydstælling fra 7.00 til 9.00 i krydset Hobrovej / Mølleparkvej [pe.].

Det signalregulerede kryds mellem Hobrovej og sidevejene Vestre Allé og Ny Kærvej er beliggende yderligere 280 meter mod syd. Selve udformningen fremgår af figur 3.14, hvor der på Hobrovej er to gennemkørende spor i begge retninger. På både Vestre Allé samt Ny Kærvej er der kun ét spor til den ligeudkørende trafik. Derudover er der etableret højre- og venstresvingspor i samtlige tilfarter.

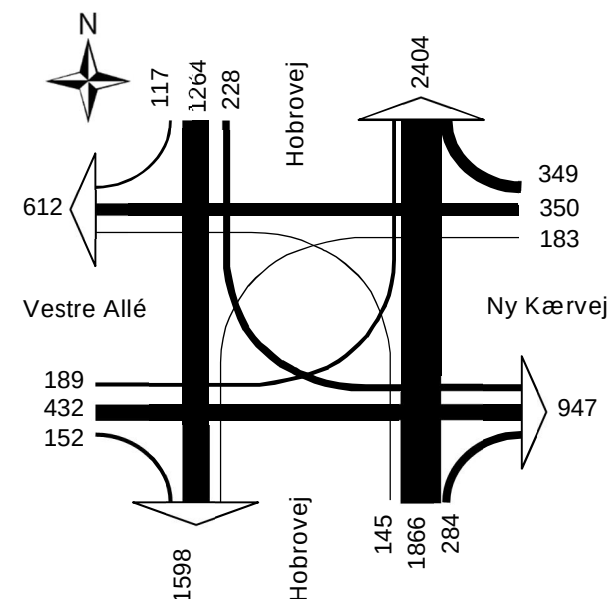
Det signalregulerede kryds er det midterste af de tre samordnede kryds. Derfor er omløbstiden ligeledes 80 sekunder fast i hvert omløb i myldretidsprogrammet, hvilket fremgår af figur 3.15. I lighed med det forrige kryds mellem Hobrovej og Møllepark



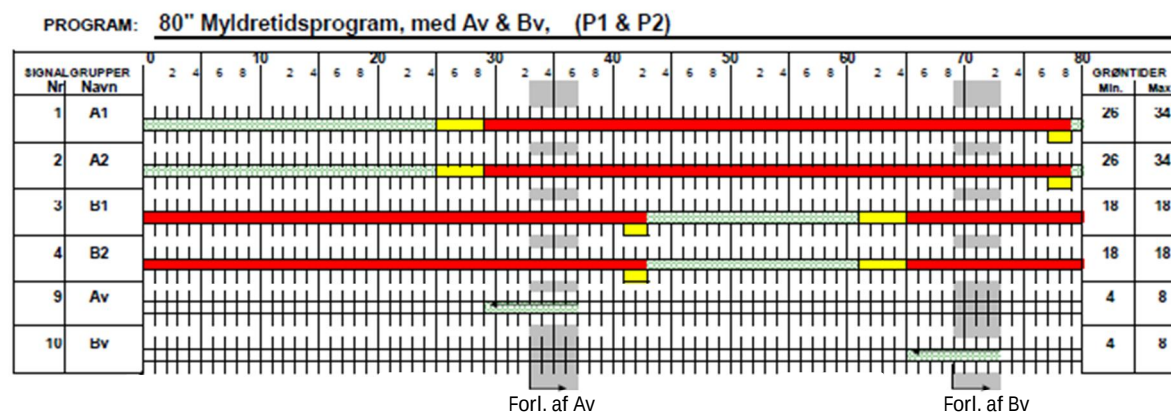
Figur 3.14: Det signalregulerede kryds Hobrovej / Ny Kærvej.

vej er der også i dette kryds en intern trafikstyring, som bevirker, at venstresvingfaserne, Av og Bv, kan indkobles i situationer, hvor flere køretøjer anvender venstresvingbanerne. Derudover vil der efter de obligatoriske 4 sekunder være mulighed for yderligere forlængelser af fasen, hvilket ligeledes fremgår af signalgruppeplanen.

Hovedparten af trafikken i krydset er gennemgående, hvilket ses af figur 3.16, og udgør 58 % af den samlede trafik. Dette er dog betydeligt lavere end de forrige kryds, da trafikken fra Vestre Allé og Ny Kærvej også er betydelig. På baggrund af krydstællingen er lastbilprocenten bestemt til 3,7 %, hvilket tilnærmelsesvis er identisk med lastbilprocenten i de foregående kryds.



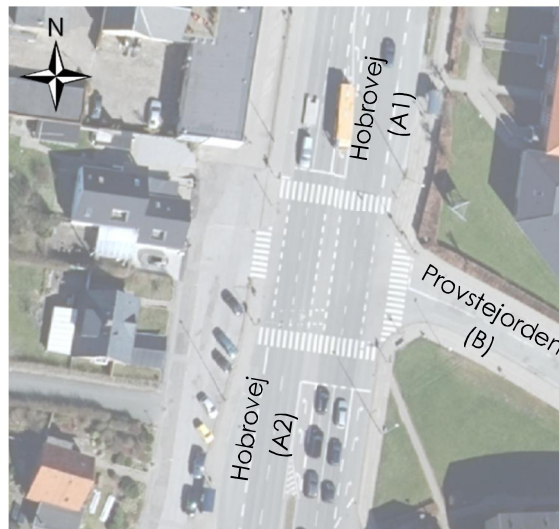
Figur 3.16: Krydstælling fra 7.00 til 9.00 i krydset Hobrovej / Ny Kærvej [pe.].



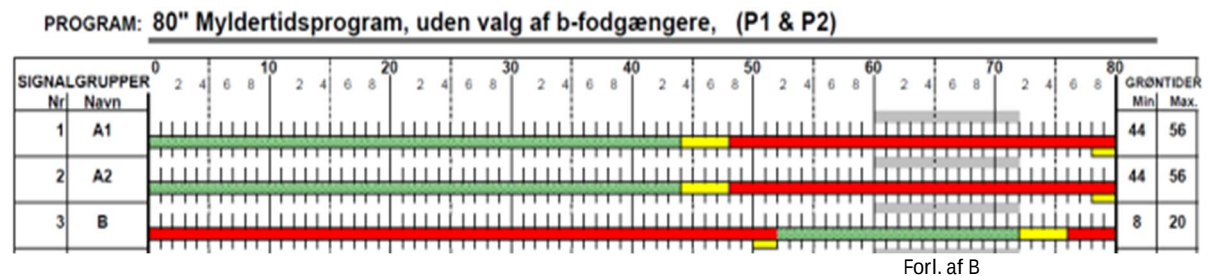
Figur 3.15: Signalgruppeplan i krydset Hobrovej / Ny Kærvej. [Aalborg Kommune, 2017]

340 meter længere mod syd er det signalregulerede kryds mellem Hobrovej og Provstejorden beliggende. Krydset er reelt set et firbenet kryds, men da der er udkørsel forbudt fra vest, fungerer krydset i praksis som et T-kryds, hvilket også fremgår af krydsudformningen på figur 3.17. Som i de øvrige kryds er der to gennemgående spor på Hobrovej. Fra Provstejorden udgøres tilfarten af ét spor, da trafikken fra de nærliggende boligområder er begrænset.

Det signalregulerede kryds indgår i en samordning med de to førnævnte kryds. Af denne årsag er omløbstiden ligeledes



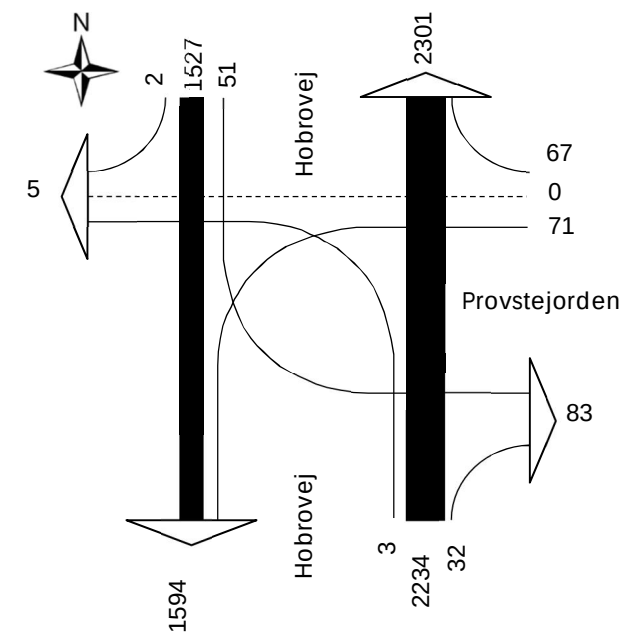
Figur 3.17: Det signalregulerede kryds Hobrovej / Provstejorden.



Figur 3.18: Signalgruppeplan i krydset Hobrovej / Provstejorden. [Aalborg Kommune, 2017]

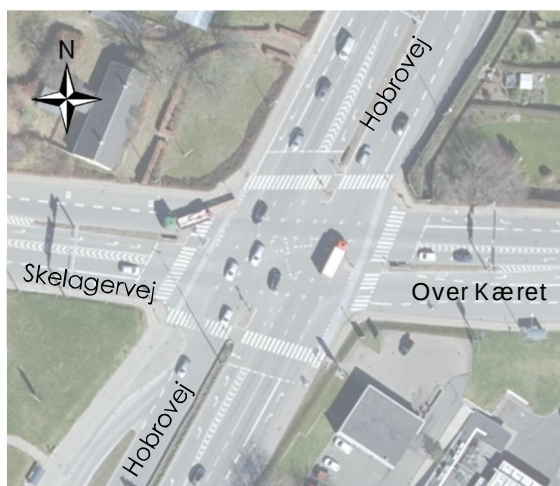
80 sekunder i morgenprogrammet, hvilket fremgår er signalprogrammet, som er vist på figur 3.18. Heraf fremgår det desuden, at der er mulighed for at forlænge grøntiden fra Provstejorden i op til 20 sekunder om nødvendigt.

Af krydstællingen, som ses på figur 3.19, fremgår det at 97 % af den samlede trafik i krydset er gennemkørende trafik på Hobrovej, hvilket adskiller sig fra de øvrige kryds på den indgående strækning. Til trods for den beskedne trafikmængde fra Provstejorden indkobles B-fasen fast i programmet, hvilket bevirker at der i hvert omløb vil være grønt fra Provstejorden i minimum 8 sekunder uanset trafikens størrelse eller mangel på samme. På baggrund af krydstællingen er lastbilprocenten bestemt til 3,1 %.



Figur 3.19: Krydstælling fra 7.00 til 9.00 i krydset Hobrovej / Provstejorden [pe.].

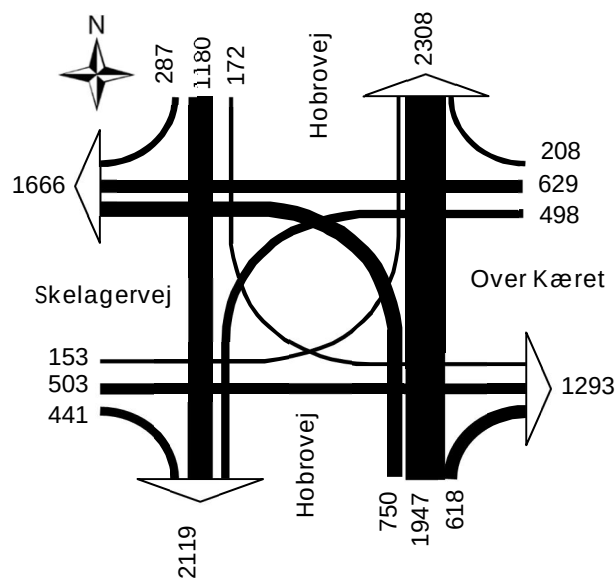
Det sidste af de seks signalregulerede kryds på den i projektet indgående strækning er beliggende 880 meter syd for krydset ved Provstejorden. Krydset udgøres af vejene Hobrovej, Skelagervej og Over Kæret, som det fremgår af figur 3.20. Krydset betegnes som meget trafikkeret, hvilket skyldes, at krydsningen sker mellem indfaldsvejen Hobrovej og Skelagervej/Over Kæret, som er den sydlige ringvej mellem det øst- og vestlige Aalborg. Derudover bevirker indføringen af Mariendals Mølle Motorvejen få hundrede meter syd for krydset, at der skal afvikles yderligere trafik i krydset. I krydset er der fortsat to gennemgående spor på Hobrovej, mens



Figur 3.20: Det signalregulerede kryds Hobrovej / Skelagervej.

der kun er ét spor til den ligeudkørende trafik på både Skelagervej og Over Kæret. For samtlige tilfarter er der etableret separate højre- og venstresvingsspor.

Som konsekvens af den store trafikmængde i krydset, i specielt myldretidsperioderne, foretages et trafikstyret programvalg i krydset. Såfremt der er længere kødannelser i tilfartssporene træder et myldretidsprogram i kraft, hvor omløbstiden er 110 sekunder, hvorved krydset betragtes som uafhængigt trafikstyret. [Aalborg Kommune, 2017]



Figur 3.21: Krydstælling fra 7.00 til 9.00 i krydset Hobrovej / Skelagervej [pe.].

Den udførte krydstælling, som fremgår af figur 3.21, underbygger ligeledes det faktum, at krydset er meget trafikkeret. Det fremgår således, at hovedparten af den indkørende trafik kommer fra syd, herunder via motorvejsindføringen. Modsat de fornævnte kryds på strækningen er retningsfordelingen i krydset mere uensartet, hvor den gennemkørende biltrafik på Hobrovej blot udgør 45 % af den samlede trafik. Dette skyldes, at en betydelig andel af bilisterne fra syd kører ad ringvejen som udgøres af Skelagervej og Over Kæret, mens den indkørende trafik fra disse veje også er betydende. På baggrund af krydstællingen er lastbilprocenten bestemt til 2,8 %.

Derved er den i projektet indgående strækning på Hobrovej kortlagt, hvor de seks signalregulerede kryds ligeledes er præsenteret. Kortlægningen skal danne grundlag for før-situationen i VISSIM, hvor den registrerede trafik samt eksisterende signalprogrammer indlægges, så modellen med god tilnærmelse afspejler den reelle trafiksituation på Hobrovej.

3.2 Intelligent signalstyring

Til simulering af den intelligente signalstyring anvendes de samme aktuelle trafikmængder, mens den traditionelle signal-

styring udskiftes med den intelligente signalstyring. Således er alle øvrige forhold tilsvarende før-situationen, som er baseret på en omfangsrig og minutøs kortlægning af de eksisterende forhold på Hobrovej.

Emuleret radardetektering

Objektdetektering kan i dag realiseres ved hjælp af radarer. I de tidligere generationer af radarer var der problemer med at adskille køretøjer med eksempelvis samme hastighed. Derudover kan radaren isoleret set ikke detekterer stillestående køretøjer, da en detektering sker ved en ændring af de udsendte mikrobølgers frekvens. De nyeste generationer af radarer kan dog adskille køretøjer, da der separeres på afstand, hastighed og vinkel, hvilket er relativt nyt. Dertil anvendes software, som fastholder detekteringen af stillestående køretøjer. [Westhausen, 2017]

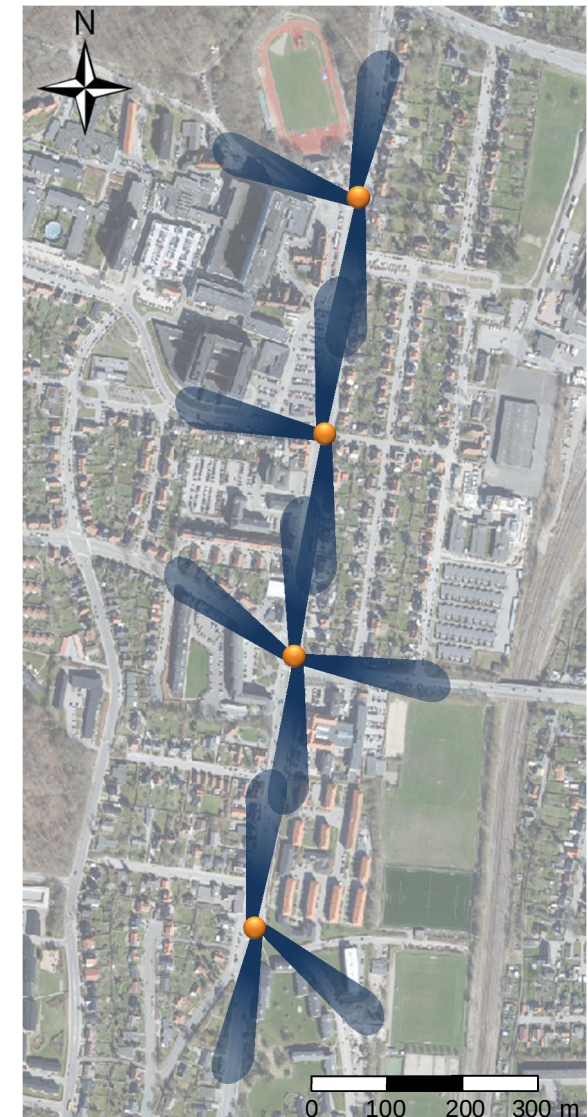
Det vurderes, at radarer i dag er den bedste teknologi i forhold til at realisere en kontinuerlig objektdetektering af trafikanterne, hvorfor disse anvendes til detektering i forbindelse med den intelligente signalstyring

I mikrosimuleringsmodellen emuleres radarer i de fire signalregulerede kryds, som er

beliggende mellem det nord- og sydligste kryds på Hobrovej. Den emulerede radar-detektering muliggøres, da det i VISSIM er muligt at trække specifikke data ud for det enkelte køretøj. Radarens registreringsafstand afhænger af det enkelte produkt og varierer fra 150 meter til 450 meter [Smart-micro, 2016]. Derudover er der også mulighed for at placere radarer i forlængelse i hinanden, hvormed registreringsafstanden kan øges yderligere. I modellen foretages detektering af køretøjer, som befinder sig inden for en afstand på 200 meter fra stopstregen i den enkelte tilfart, hvilket er illustreret på figur 3.22. Inden for denne afstand foretages objektdetektering af køretøjerne i op til 20 gange i sekundet. På baggrund af objektdetekteringen er det således muligt at bestemme de enkelte køretøjers ETA. Denne information udgør således et essentielt datagrundlag i forhold til at realisere den intelligente signalstyring

Signalstyringsprincipper

Som beskrevet indledningsvist i projektet er nutidens signalstyring, foruden lovmæssige krav, baseret på en række faste principper, som indgår i diverse håndbøger og vejledninger såvel nationalt som internationalt. Følgende elementer indgår således i arbejdet med signalstyring:



Figur 3.22: Principskitse, som illustrerer radar-detektering i de fire signalregulerede kryds.

- Offset-tid
- Fast omløbstid
- Fast maksimal grøntid
- Prædefineret fasevalg
- Minimumgrønt

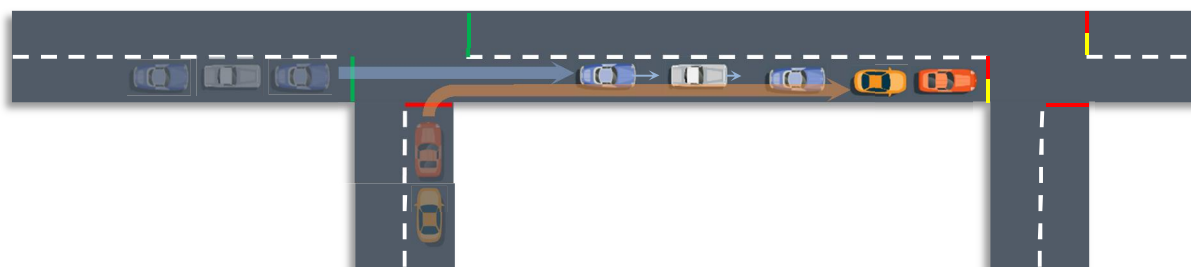
Foruden minimumgrønt, som er et lovkrav, er de øvrige principper, som i en lang årække har været en fast bestanddel af arbejdet med signalstyring.

Anvendelsen af radardetektering giver nye muligheder i forhold til styringen i signalanlæg. Således er hypotesen i indeværende projekt, at en traditionel offset-tid mellem de signalregulerede kryds er overflødig i sin nuværende form. Dette skyldes, at offset-tiden typisk bestemmes på baggrund af en ideal hastighed, eksempelvis 45 km/t på en strækning med en tilladt hastighed på 50 km/t. Offset-tiden er typisk ikke baseret på trafikanternes reelle gennemsnitshastighed, ligesom der heller ikke tages højde for, at trafikanternes hastighed kan variere over tid. Ved anvendelse af offset-tider tages der heller ikke højde for, at der i det efterfølgende kryds, kan holde køretøjer for rødt, som er kommet fra en sidevej. Dette er illustreret på figur 3.23 og forringer effekten af samordningen. Der arbejdes derfor ikke med disse direkte binding mellem de intelligente signalanlæg

på Hobrovej. Selvom de enkelte signalanlæg styres decentralt og derved isoleret, vil der i nogle tilfælde være en indirekte samordning mellem de respektive signalanlæg, da dette i flere tilfælde vil være optimalt i forhold til den samlede trafikafvikling. Den indirekte samordning kommer til udtryk, hvis et givent kryds giver grønt signal til en kolonne af køretøjer på eksempelvis Hobrovej. Denne kolonne vil sandsynligvis også opnå grønt i det efterfølgende kryds, da radaren i dette kryds vil detektere den snarligt ankomne kolonne af køretøjer.

Det typiske argument for at have faste omløbstider i samordnede signalanlæg er, at de enkelte signalanlæg ellers vil bryde

med den øvrige samordning, da en fast offset-tid vil miste sin funktion. Da der ikke anvendes traditionelle offset-tider i forbindelse med den intelligente signalstyring, er der intet belæg for at opretholde en fast omløbstid. Dette bevirker naturligt, at der heller ikke er behov for en fast maksimal grøntid, som normalvis tilvejebringer en hensigtsmæssig fordeling af grøntiden. Derudover vurderes en fast maksimal grøntid at være uhensigtsmæssig, hvis der eksempelvis er en kolonne af køretøjer i relativt kort afstand fra krydset på den overordnede vej, hvor den maksimale grøntid er udnyttet. I denne situation vil det i mange henseende være ideelt for den overordnede trafikafvikling at opretholde det grønne signal på den over-



Figur 3.23: Principskitse, som illustrerer en situation, hvor køretøjerne fra sidevejen foretager et højresving ind på strækningen med de samordnede kryds. Da offset-tiden mellem de to signalregulerede kryds prioriterer den ligudkørende trafik på strækningen, vil køretøjerne fra sidevejen holde for rødt, når kolonnen af køretøjer på den overordnede vej ankommer til det næste kryds, hvilket forringer effekten af samordningen.

ordnede vej, indtil kolonnen af køretøjer er kørt ind i krydset, hvorefter fasen kan lukkes ned.

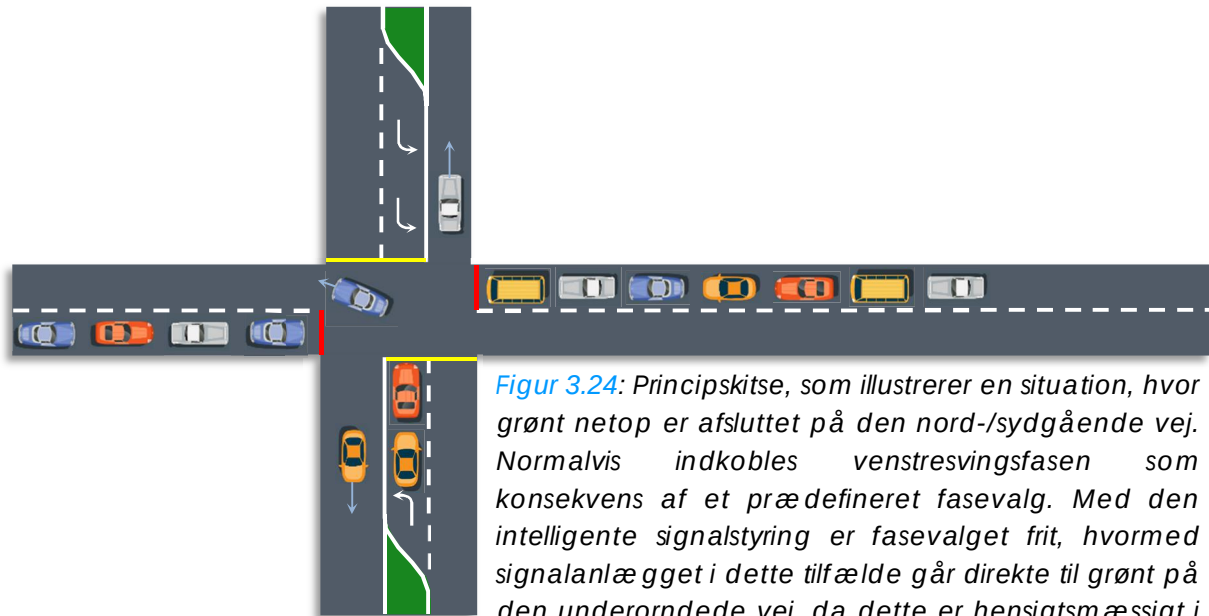
Et andet princip, som også typisk går igen i arbejdet med signalstyring er prædefineret fasevalg, som dog typisk forudsætter en anmeldelse. Grundlæggende hindrer princippet urimelige ventetider, da alle faser aktiveres i et givent omløb. Derudover realiseres en ensretning, som gør signalstyringen forudsigelig for trafikanterne. Det vurderes dog, at et frit fasevalg vil realisere en mere effektiv trafikafvikling. Dette kunne eksempelvis være tilfældet i en situation som vist på figur 3.24, hvor grønt afsluttes på den overordnede vej. Med et prædefineret fasevalg samt anmeldelse i venstresvingsbanen, vil venstresvingsfasen normalvis blive aktiveret. Hvis antallet af køretøjer på den underordnede vej langt overstiger antallet af køretøjer i venstresvingsbanen på den overordnede vej, vil det være mere hensigtsmæssigt at give grønt på den underordnede vej. Af denne årsag gøres der op med princippet om et prædefineret fasevalg til fordel for et frit fasevalg, som afhænger af den aktuelle trafiksituation.

Minimumgrønt er ikke blot et princip men et decideret lovkrav. Nationalt skal der

således være minimum seks sekunders grønt i hovedsignalet, mens fire sekunder er tilstrækkeligt ved anvendelse af pilsignaler forudsat at krydset er trafikstyret. [Transport- og Bygningsministeriet, 2016]

Lovkravet skal sandsynligvis hindre, at biler, som eventuelt er uopmærksomme eller går i stå ved igangsætning, kan nå over for grønt. I mange henseende er dette fordelagtigt, og i perioder med meget trafik vil grøntiden normalvis langt overstige de seks sekunders minimum

grønt. I nogle situationer, eksempelvis i trafiksvage perioder, er der dog en risiko for, at de seks sekunders minimumgrønt bevirker, at der vil forekomme unødigt ventetid for rødt for krydsets øvrige trafikanter. Dette kunne eksempelvis være tilfældet, såfremt et enkelt køretøj i fart henimod et signalreguleret kryds får grønt og har passeret stopstegen efter blot to sekunder. I dette tilfælde vil de fire sekunders resterende grøntid blot udmønte sig unødigt ventetid for de øvrige trafikanter i krydset. Anvendelsen af radardetekteringen sikrer



Figur 3.24: Principskitse, som illustrerer en situation, hvor grønt netop er afsluttet på den nord-/sydgående vej. Normalvis indkobles venstresvingsfasen som konsekvens af et prædefineret fasevalg. Med den intelligente signalstyring er fasevalget frit, hvormed signalanlægget i dette tilfælde går direkte til grønt på den underordnede vej, da dette er hensigtsmæssigt i forhold til den overordnede trafikafvikling.

desuden, at afslutningen af grønt kun sker efter to sekunder, såfremt der ikke er andre køretøjer nær krydset, hvormed trafikken fortsat afvikles forsvarligt og trafiksikkert. Da dele af optimeringspotentialet forventes at relatere sig til minimumgrøntiden anvendes denne ikke i forbindelse med den intelligente signalstyring. Såfremt dette skal implementeres i virkeligheden forudsætter dette en lovændring eller mulighed for dispensation.

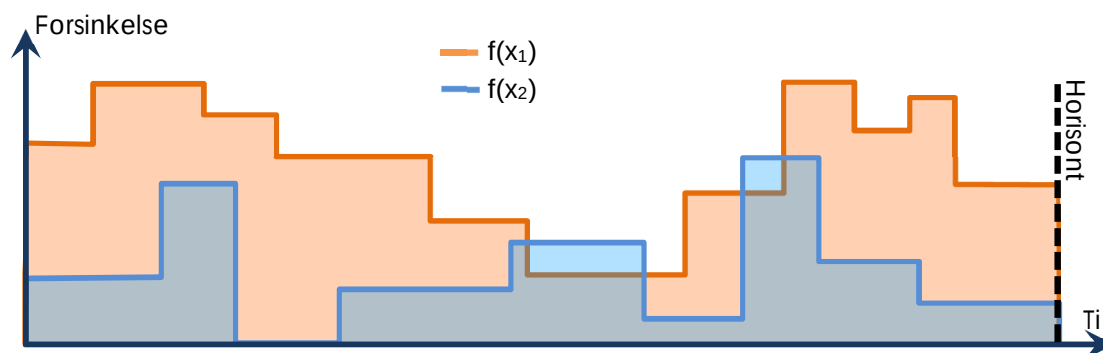
Den intelligente signalstyring gør således op med traditionellen principper inden for signalstyring, hvilket dækker over offset-tider, faste omløbstider, fast maksimale grøntider, prædefineret fasevalg samt lovkravet vedrørende minimumgrønt. I stedet anvendes variable grøn- og omløbstider hvortil fasevalget af frit og afhænger af den aktuelle trafiksituation.

Adaptiv signalstyring i realtid

Ved anvendelse af radardetektering og nye signalstyringsprincipper kan den intelligente signalstyring realiseres. Signalstyringen sker i hvert af de fire signalregulerede kryds og derved decentralt. Som alternativ til de traditionelle signalstyringsprincipper anvendes et kvalitetsmål, som bestemmer den mest hensigtsmæssige signalsætning i det pågældende signalanlæg. Kva-

litetsmålet kan være en kombination af flere parametre, eksempelvis kødannelse og forsinkelse, hvortil der kan tilføjes regler således at kødannelsen eksempelvis vægtes højere end forsinkelsen. Da parametre som kødannelse, antal stop, forsinkelse og brændstofforbrug i større eller mindre grad betragtes som korrelerede, optimeres signalstyringen med henblik på at minimere den samlede forsinkelse i det enkelte kryds. I den forbindelse skelnes der ikke mellem forskellige køretøjstyper, hvorfor al trafik vægtes ligeligt. Dette begrænser desuden kompleksiteten og letter gennemskueligheden af de bagvedliggende processer.

Det tilstræbes således at bestemme den optimale signalsætning med henblik på at minimere den samlede forsinkelse i det enkelte signalregulerede kryds. Den mest optimale signalsætning undersøges i Uppaal Stratego, hvor utallige signalsætninger testes inden for en given horisont, som er bestemt til 20 sekunder. Ved hjælp af den emulerede radardetektering muliggøres en beregning af forsinkelsen, som kan akkumuleres inden for horisonten, hvormed den samlede forsinkelse, afledt af den givne signalsætning, kan bestemmes. Processen er illustreret på figur 3.25, som viser to signalsætninger. Af figuren står det klart at funktionen, $f(x_2)$, som er vist med blå, giver den mindste forsinkelse samlet set og derfor effektueres.



Figur 3.25: Eksempel, som illustrerer processen i Uppaal stratego, hvor to signalsætninger undersøges i forhold til den samlede forsinkelse. Af figuren fremgår det af funktionen, som udgøres af den blå linje, giver den mindste samlede forsinkelse og derfor effektueres.

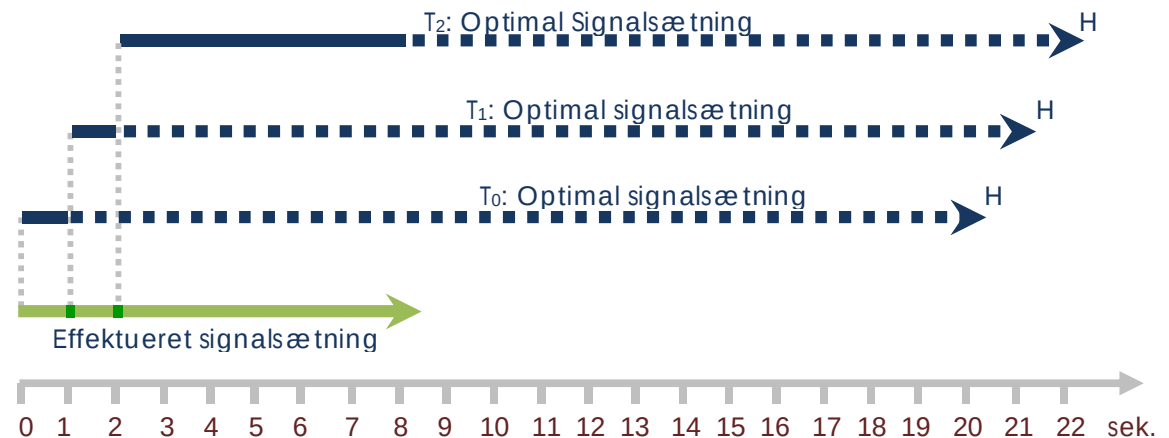
Hypotesen er, at denne metode realiserer en mere effektiv trafikafvikling sammenholdt med traditionelle metoder. Da den optimale signalsætning i Uppaal Stratego er baseret på et øjebliksbillede i det første sekund, er der dog en risiko for, at den trafikale situation ændres betydeligt indenfor horisonten på 20 sekunder. Dette kan skyldes, at flere køretøjer er kommet inden for radarens registreringsafstand på 200 meter. Derudover kan det skyldes, at køretøjer er drejet fra før det signalregulerede kryds eller har foretaget et fuldt stop, hvis disse muligheder eksisterer. Dette kan bevirke, at den effektuerede signalsætning i sidste ende viser sig at være ikke-optimal.

For at imødekomme denne udfordring introduceres en rullende horisont i forbindelse med signalstyringen. Den rullende horisont giver således mulighed for løbende at tilpasse signalsætningen til den aktuelle trafikale situation, hvilket er illustreret på figur 3.26. Derved kan signalsætningen ændres hvert sekund. Dette bevirker, at signalsætningen i langt de fleste tilfælde vil være den optimale med henblik på at minimere den samlede forsinkelse.

Da signalstyringen er baseret på registreringerne fra radarerne i krydset er det es-

sentielt at disse er funktionelle. Derudover forudsætter en optimal signalstyring af trafikken i det enkelte kryds kan afvikles. Såfremt der er sammenbrud i krydset på grund af trafikuheld eller tilbagestuvning fra et nærliggende kryds, som bevirker, at trafikken i krydset ikke kan afvikles ved grønt, bør tilbagefaldsprogrammer træde i kraft. Dette skyldes at Uppaal Stratego sandsynligvis ikke kan optimere trafikafviklingen i situationer, som ligger langt fra normalbilledet.

Ved anvendelse af objekt-detektering, nye signalstyringsprincipper samt Uppaal Stratego som optimeringsmodel, realiseres en adaptiv signalstyring i realtid. Den nye signalstyring forventes at kunne forbedre trafikafviklingen mærkbart i de indgående signalregulerede kryds, hvilket undersøges og efterfølgende sammenholdes med før-situationen i VISSIM.



Figur 3.26: I tiden nul bestemmes en optimal signalsætning i de næste 20 sekunder. Af denne effektueres eksempelvis det første sekund, som i dette tilfælde er en grøntidsforlængelse. Efter det første sekund beregnes en ny signalsætning, hvor det første sekund ligeledes effektueres i form af yderligere et sekunds grøntid. Den optimale signalsætning efter 2 sekunder viser, modsat de to foregående signalsætninger, at det nu vil være optimalt at foretage et faseskift, hvormed seks sekunders mellemtid effektueres. Den rullende horisont giver derved mulighed for at tilpasse signalsætningen i forhold til den trafikale situation.

4 Resultatbehandling

I indeværende kapitel sammenholdes simuleringsresultaterne fra VISSIM. Ved at sammenholde simuleringsresultaterne på baggrund af den eksisterende signalstyring med simuleringsresultaterne med den intelligente signalstyring kan effekten af sidstnævnte dokumenteres. Indledningsvist evalueres parametrene middelforsinkelse og kølængde i de fire signalregulerede kryds. Efterfølgende evalueres effekten i forhold til brændstofforbrug, antal stop og den overordnede rejsetid på Hobrovej. Slutteligt fremgår en opsamling samt samfundsøkonomiske gevinster.

Af tabel 4.1 fremgår sammenligningen af middelforsinkelsen i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej. Overordnet set viser resultaterne, at middelforsinkelsen gennemsnitligt reduceres med hele 29,6 %. Middelforsinkelsen på Hobrovej er reduceret med omkring 50 % med undtagelse af den venstresvingende trafik, som kører ad Søndre

Middelforsinkelse (Hobrovej / Søndre Skovvej)						
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[sek./kt.]	[sek./kt.]	[kt.]	Absolut [sek./kt.]	Relativ [%]
Hobrovej N	Hobrovej S	4,1	1,8	1756	-2,3	-56,8
Hobrovej S	Hobrovej N	3,6	1,9	1827	-1,7	-48,4
Hobrovej S	Søndre Skovvej	18,1	12,8	184	-5,2	-29,0
Søndre Skovvej	Hobrovej N	24,9	31,3	193	6,4	25,6
Søndre Skovvej	Hobrovej S	22,9	28,2	74	5,3	23,3
Hobrovej N	Søndre Skovvej	4,7	2,4	446	-2,2	-47,7
Vægtet gennemsnit		5,7	4,0	4481	-1,7	-29,6

Tabel 4.1: Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

Kølængde, 95 %-fraktil (Hobrovej / Søndre Skovvej)						
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	Absolut [m]	Relativ [%]
Hobrovej N	Hobrovej S	29,9	13,1	1756	-16,8	-56,3
Hobrovej S	Hobrovej N	31,0	15,8	1827	-15,2	-49,0
Hobrovej S	Søndre Skovvej	10,1	5,3	184	-4,9	-48,1
Søndre Skovvej	Hobrovej N	22,5	25,0	193	2,5	11,2
Søndre Skovvej	Hobrovej S	10,8	11,8	74	1,0	9,3
Hobrovej N	Søndre Skovvej	14,1	6,0	446	-8,1	-57,7
Vægtet gennemsnit		27,3	13,6	4481	-13,7	-50,0

Tabel 4.2: Kølængden i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

Skovvej. Den overordnede reduktion i middelforsinkelsen sker dog på bekostningen af de omkring 270 bilister fra Søndre

Skovvej, som oplever at middelforsinkelsen øges med 5,3 og 6,4 sekunder. Af tabel 4.2 ses effekten på kødannelsen, som over-

ordnet set er den samme. Køddannelsen på Hobrovej reduceres omkring 50 %, mens køddannelsen på Søndre Skovvej er marginalt længere. Samlet set realiserer den intelligente signalstyring en markant reduktion af køddannelsen på hele 50 %.

Trafikafviklingen i krydset Hobrovej / Mølleparkvej forbedres også betydeligt ved anvendelse af den intelligente signalstyring. Dette fremgår blandt andet af tabel 4.3, hvor effekten i forhold til middelforsinkelsen ses. Overordnet set reduceres den gennemsnitlige middelforsinkelse fra 8,7 til 6,4 sekunder, hvilket er en reduktion på 27,1 %. Fokuseres der på de enkelte trafikstrømme, viser resultaterne, at samtlige vil opnå en lavere middelforsinkelse ved anvendelse af den intelligente signalstyring. Således reduceres middelforsinkelsen i intervallet fra 12,1 % til 44,2 % i krydset.

Den intelligente signalstyring bevirker også, at køddannelsen overordnet set reduceres med 41,5 %, sammenholdt med køddannelsen afledt af den traditionelle signalstyring, hvilket fremgår af tabel 4.4. Køddannelsen er således gennemsnitligt 14,1 meter kortere. Reduktionen er gældende for hovedparten af trafikstrømmene, mens køddannelsen i to trafikstrømme tilnærmelsesvis er status quo.

Et element, som delvist forklarer, at trafikken afvikles mere effektivt i de to førnævnte T-kryds, er det frie fasevalg, som intro-

duceres med den intelligente signalstyring. At der gøres op med det prædefinerede fasevalg bevirker, at det er muligt at

Middelforsinkelse (Hobrovej / Mølleparkvej)						
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[sek./kt.]	[sek./kt.]	[kt.]	Absolut [sek./kt.]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	4,5	2,5	1807	-2,0	-44,2
Mølleparkvej	Hobrovej N	32,4	27,3	203	-5,1	-15,8
Hobrovej N	Mølleparkvej	5,5	3,7	354	-1,8	-33,3
Hobrovej S	Mølleparkvej	18,8	13,4	490	-5,4	-28,6
Mølleparkvej	Hobrovej S	34,7	30,5	212	-4,2	-12,1
Hobrovej N	Hobrovej S	4,4	3,1	1472	-1,3	-30,1
Vægtet gennemsnit		8,7	6,4	4539	-2,4	-27,1

Tabel 4.3: Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

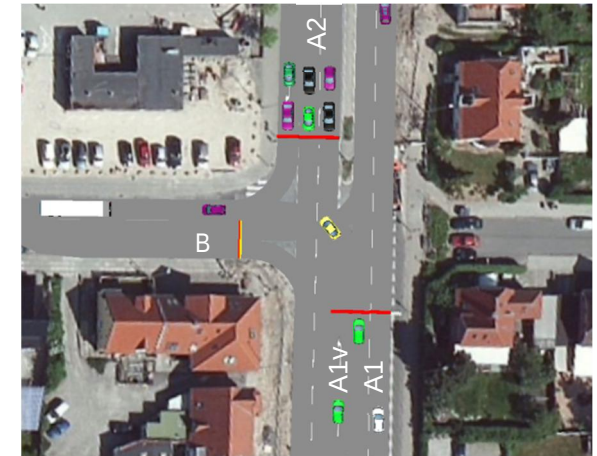
Køllængde, 95 %-fraktil (Hobrovej / Mølleparkvej)						
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	Absolut [m]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	39,1	19,2	1807	-19,9	-50,9
Mølleparkvej	Hobrovej N	23,8	23,9	203	0,1	0,4
Hobrovej N	Mølleparkvej	16,3	9,7	354	-6,7	-40,9
Hobrovej S	Mølleparkvej	32,8	21,1	490	-11,7	-35,6
Mølleparkvej	Hobrovej S	25,2	25,6	212	0,4	1,7
Hobrovej N	Hobrovej S	34,9	21,3	1472	-13,6	-39,0
Vægtet gennemsnit		33,9	19,8	4539	-14,1	-41,5

Tabel 4.4: Køllængden i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

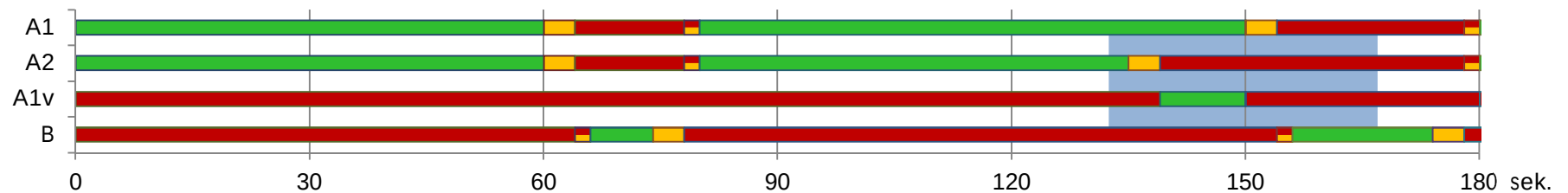
prioritere de trafikstrømme, som overordnet set resulterer i den laveste forsinkelse. Helt konkret ses forskellen af de effektuerede signalprogrammer, for henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring på figur 4.1 og 4.2. Ved den traditionelle signalstyring bevirker det prædefinerede fasevalg, at B-fasen skal indkobles efter fase A1/A1v afsluttes. I forhold til den overordnede trafikafvikling er dette yderst u hensigtsmæssigt, da der i flere perioder er langt mere trafik på Hobrovej, hvilket er illustreret på figur 4.3. Ved at give grønt fra B-retningen, hvor der i dette tilfælde, ikke

befinder sig i nogle køretøjer, afventer de 9 køretøjer i de øvrige tilfartsspor unødigt for rødt. Foruden det frie fasevalg, fremgår det også af de effektuerede signalprogrammer, at den intelligente signalstyring har mere dynamiske grøntider, som tilnærmelsesvis tilsvarende den aktuelle trafikale efterspørgsel.

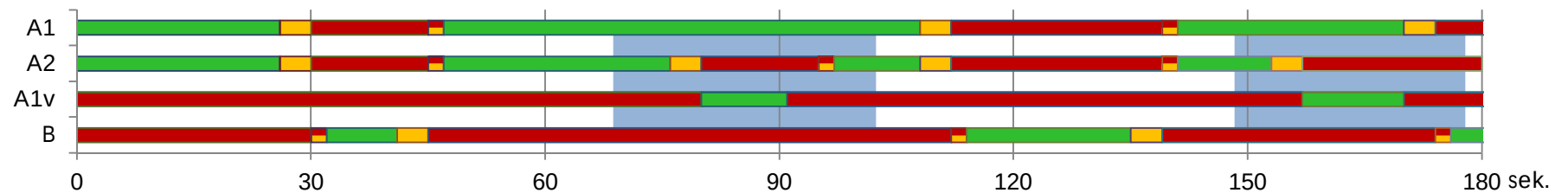
I lighed med de to forrige signalregulerede T-kryds forbedres trafikafviklingen overordnet set også i det firebenede kryds, Hobrovej / Ny Kærvej. Simuleringsresultaterne dokumenterer, at middelforsinkelsen redu-



Figur 4.3: B-fasen aktiveres ved den traditionelle signalstyring som konsekvens af det prædefinerede fasevalg, hvilket er u hensigtsmæssigt.



Figur 4.1: Effektueret signalprogram fra kl. 8:00 med den traditionelle signalstyring i krydset Hobrovej / Mølleparkvej. Med blå fremgår faseskift afledt af det prædefinerede fasevalg.



Figur 4.2: Effektueret signalprogram fra kl. 8:00 med den intelligente signalstyring i krydset Hobrovej / Mølleparkvej. Med blå fremgår faseskift afledt af et frit fasevalg.

ceres fra 20,1 til 9,3 sekunder, hvilket fremgår af tabel 4.5. Altså en gennemsnitlig reduktion af middelforsinkelsen på knap 11 sekunder for hver af de knap 5.500 biler, som krydset betjener i løbet af de to timer, simuleringen pågår. Dette svarer til en reduktion af middelforsinkelsen hele 53,7 %, ved anvendelse af den intelligente signalstyring. Sættes der fokus på effekten i forhold til de enkelte trafikstrømme, står det klart, at samtlige 12 trafikstrømme i krydset oplever en lavere middelforsinkelse.

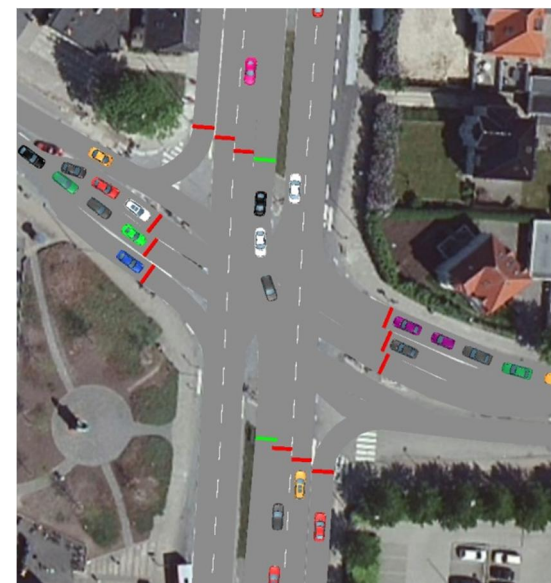
Størst er effekten for trafikken fra Vestre Allé og Ny Kærvej, hvor middelforsinkelsen er reduceret med op til mere et halvt minut.

En af årsagerne til at middelforsinkelsen reduceres så markant er, at venstresvingsfaserne i mindre grad indkobles ved den intelligente signalstyring sammenholdt med den traditionelle signalstyring. Ved den traditionelle signalstyring aktiveres venstresvingsfasen, såfremt der forekom-

mer anmeldelse via tilstedeværelsesspolen i én af venstresvingssporene. Derved lukkes den nord- og sydgående trafik ned på Hobrovej, da der er en anmeldelse fra tre køretøjer i den ene venstresvingsbane på Hobrovej, som det ses af eksemplet på figur 4.4. Anmeldelsen bevirker dog, at venstresvingsfasen på Hobrovej indkobles, hvilket tager minimum 16 sekunder, som udgøres af mellemtid og grøntid inden der kan gives grønt til trafikken på Ny Kærvej og Vestre Allé. Denne handling er i øvrigt

Middelforsinkelse		(Hobrovej / Ny Kærvej)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[sek./kt.]	[sek./kt.]	[kt.]	Absolut [sek./kt.]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	13,5	8,3	1819	-5,2	-38,5
Ny Kærvej	Vestre Allé	29,9	10,4	340	-19,5	-65,1
Ny Kærvej	Hobrovej S	35,0	15,1	174	-20,0	-57,0
Vestre Allé	Ny Kærvej	45,6	10,7	411	-34,9	-76,6
Vestre Allé	Hobrovej S	48,1	9,9	139	-38,2	-79,5
Vestre Allé	Hobrovej N	50,1	19,6	147	-30,6	-61,0
Ny Kærvej	Hobrovej N	29,3	9,6	333	-19,7	-67,3
Hobrovej S	Ny Kærvej	13,4	6,2	290	-7,2	-53,9
Hobrovej S	Vestre Allé	20,5	13,9	159	-6,6	-32,2
Hobrovej N	Ny Kærvej	25,8	17,1	252	-8,8	-33,9
Hobrovej N	Vestre Allé	9,4	5,3	95	-4,1	-43,9
Hobrovej N	Hobrovej S	9,4	6,9	1337	-2,5	-26,3
Vægtet gennemsnit		20,1	9,3	5495	-10,8	-53,7

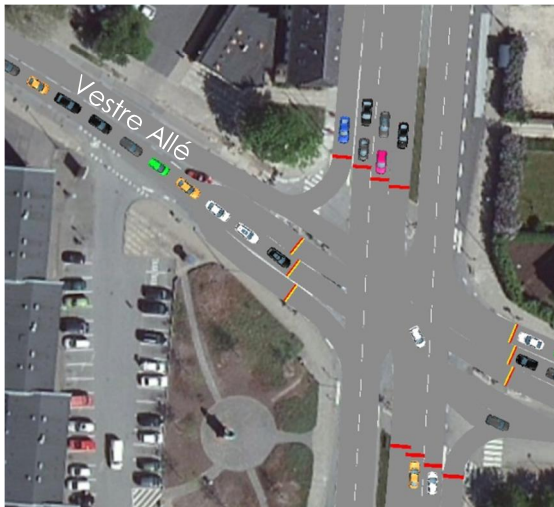
Tabel 4.5: Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.



Figur 4.4: Indkobling af venstresvingsfasen ved den traditionelle signalstyring, hvilket forringer den overordnede trafikafvikling.

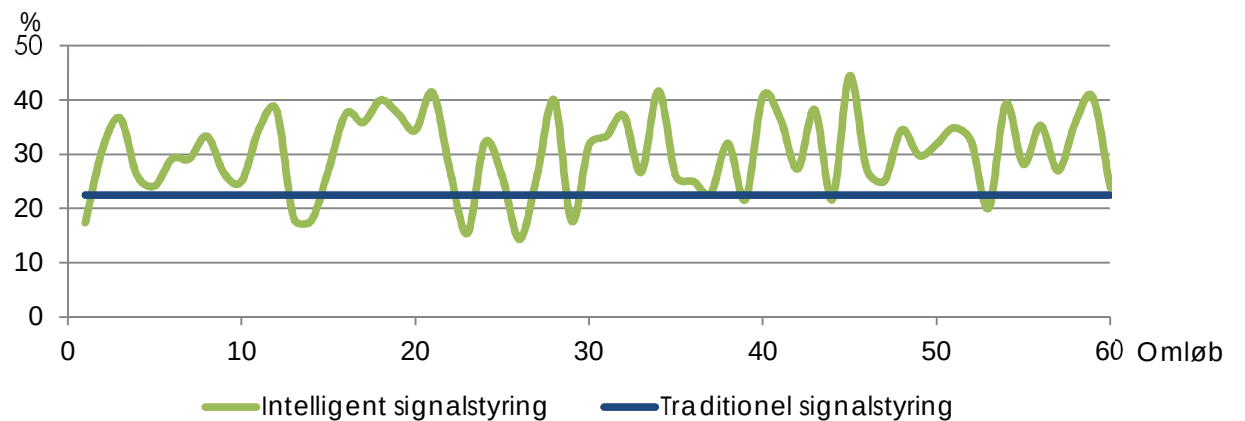
uafhængig af, hvor mange trafikanter der befinder sig i de øvrige tilfarter, hvilket ikke er hensigtsmæssigt i forhold til den overordnede trafikafvikling.

En anden årsag til at den intelligente signalstyring er så effektiv er, at grøntidsfordelingen foregår dynamisk uden begrænsninger som fast omløbstid eller maksimal grøntid. Den intelligente signalstyring tilstræber således at fordele grøntiden, så den overordnede forsinkelse reduceres til et minimum. Når eksempelvis trafikintensiteten



Figur 4.5: Grøntiden ved den traditionelle signalstyring er periodevis utilstrækkelig, hvilket forringer den overordnede trafikafvikling.

teten fra Vestre Allé er på sit højeste omkring kl. 8, øges grøntiden sammenholdt med grøntiden relativt trafiksvage perioder. Grøntidsfordelingen afhænger således af den trafikale efterspørgsel og tilpasses kontinuerligt i realtid. I forbindelse med den traditionelle signalstyring udgør grøntiden på Ny Kærvej og Vestre Allé 18 af de 80 sekunders omløbstid uanset tidspunkt og trafikale efterspørgsel i morgenmyldretiden. Da de 18 sekunder ikke er tilstrækkeligt omkring kl. 8 i forhold til at afvikle trafikken fra Vestre Allé, øges middelforsinkelsen betydeligt. Dette gør sig især gældende i de perioder, hvor den svingende trafik ikke kan tilgå de respektive svingbaner, hvilket er vist på figur 4.5. For at illustrere den dynamiske grøntidsfordeling, er den procentvise grøntid fra Vestre Allé af 60 på



Figur 4.6: Den procentuelle grøntid fra Vestre Allé i 60 på hinanden følgende signalomløb med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring.

hinanden følgende signalomløb vist på figur 4.6. Som det fremgår udgør grøntiden fra Vestre Allé med den traditionelle signalstyring 22,5 % over hele perioden uafhængigt af den trafikale efterspørgsel fra denne tilfart. I modsætningen hertil varierer den procentuelle grøntid fra 14 til 44 % ved den intelligente signalstyring, og afhænger i høj grad af den trafikale efterspørgsel. At den procentvise grøntid gennemsnitligt at højere skyldes, foruden efterspørgslen, at andelen af mellemtid reduceres, da venstresvingfaserne i mindre grad indkøbes.

At grøntiden periodevis er utilstrækkelig kommer også til udtryk i forhold til kødannelserne i krydset, som fremgår af tabel 4.6 på næste side. Her ses det, at kø-

længderne for enkelte trafikstrømme er omkring 200 meter. Kølængderne reduceres dog betydeligt ved anvendelse af den intelligente signalstyring, hvor kølængderne i gennemsnit reduceres med 64,1 %, hvilket svarer til over 44 meter. Hvad der også er bemærkelsesværdigt er, at kølængderne i samtlige tilfartsspor reduceres. Dette skyldes blandt andet de førømtalte uhensigtsmæssigheder med grøntidsfordelingen samt indkobling af svingfaser, hvilket afhjælpes med den intelligente signalstyring.

I det signalregulerede kryds mellem Hobrovej og Provstejorden reduceres middelforsinkelsen også betydeligt. Af tabel 4.7 fremgår det, at middelforsinkelsen i gennemsnit reduceres fra 4,3 til 2,2 sekunder, hvilket er en reduktion på hele 49,4 %. Af resultaterne fremgår det ligeledes, at trafikkanterne i samtlige tilfarter opnår en forbedret middelforsinkelsen. Derved sker der ikke blot en omfordeling af grøntiden, men derimod en mere intelligent grøntidsfordeling. Dette kommer blandt andet til udtryk for de 135 trafikkanter fra Provstejorden, som ved den traditionelle signalstyring får grønt én gang fast pr. omløb. Da den intelligente signalstyring i stedet anvender køretøjernes ETA, er det muligt at give grønt, når der opstår et tilpas stort

Kølængde, 95 %-fraktil		(Hobrovej / Ny Kærvej)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	Absolut [m]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	86,6	39,1	1819	-47,5	-54,8
Ny Kærvej	Vestre Allé	41,2	16,5	340	-24,6	-59,8
Ny Kærvej	Hobrovej S	18,0	11,8	174	-6,2	-34,4
Vestre Allé	Ny Kærvej	200,0	20,4	411	-179,6	-89,8
Vestre Allé	Hobrovej S	193,0	6,7	139	-186,4	-96,5
Vestre Allé	Hobrovej N	182,5	11,1	147	-171,5	-93,9
Ny Kærvej	Hobrovej N	36,9	16,0	333	-20,8	-56,5
Hobrovej S	Ny Kærvej	21,1	12,5	290	-8,6	-40,5
Hobrovej S	Vestre Allé	10,6	6,5	159	-4,1	-38,5
Hobrovej N	Ny Kærvej	17,8	12,4	252	-5,4	-30,4
Hobrovej N	Vestre Allé	6,3	6,0	95	-0,3	-4,1
Hobrovej N	Hobrovej S	34,9	25,1	1337	-9,8	-28,0
Vægtet gennemsnit		69,6	24,9	5495	-44,6	-64,1

Tabel 4.6: Kølængden i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Middelforsinkelse		(Hobrovej / Provstejorden)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[sek./kt.]	[sek./kt.]	[kt.]	Absolut [sek./kt.]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	4,1	1,5	2209	-2,6	-63,9
Provstejorden	Hobrovej S	33,8	24,2	62	-9,6	-28,3
Provstejorden	Hobrovej N	34,4	21,4	73	-13,0	-37,8
Hobrovej S	Provstejorden	4,3	1,2	33	-3,1	-72,3
Hobrovej N	Provstejorden	10,1	9,5	57	-0,6	-6,3
Hobrovej N	Hobrovej S	1,9	1,2	1595	-0,7	-37,3
Vægtet gennemsnit		4,3	2,2	4030	-2,1	-49,4

Tabel 4.7: Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / provstejorden.

gab i trafikken på Hobrovej, hvorved generne for trafikken på Hobrovej minimeres. Derudover gives der kun grønt fra Provstejorden, såfremt der reelt befinder sig køretøjer i tilfartssporet.

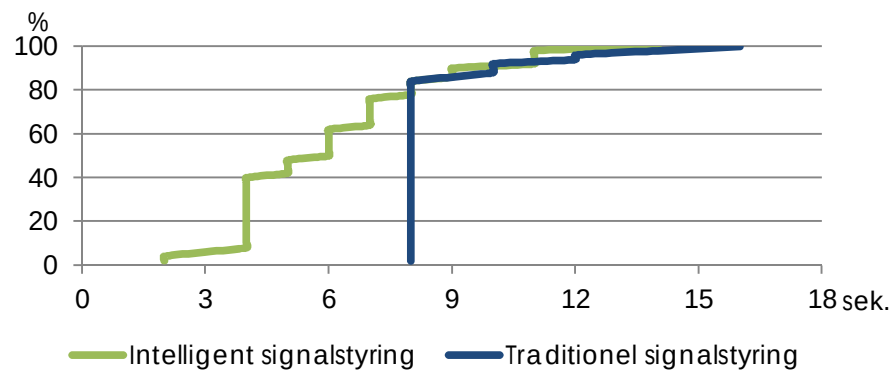
Grøntidsfordeling er illustreret på figur 4.7 og 4.8, hvor grøntiden pr. omløb er vist for henholdsvis Provstejorden og Hobrovej med den traditionelle og intelligente signalstyring. Fra Provstejorden er 2-6 sekunder i 50 % af tilfældene tilstrækkeligt til af afvikle trafikken herfra med den intelligente signalstyring, mens der minimum tildeles 8 sekunders grønt i hvert opløb, med mulighed for forlængelse, med den traditionelle signalstyring. På Hobrovej varer grøntiden 52-60 sekunder, hvilket skyldes en maksimal grøntid. Ved den intelligente signalstyring er grøntiden mere dynamisk

og opretholder grønt på Hobrovej i op til 262 sekunder i tilfælde, hvor der ikke kommer trafik af Provstejorden. Den dynamiske grøntidsfordeling er således et afgørende element i forhold til at realisere en langt mere effektiv trafikafvikling og reducerer unødigt ventetid for rødt.

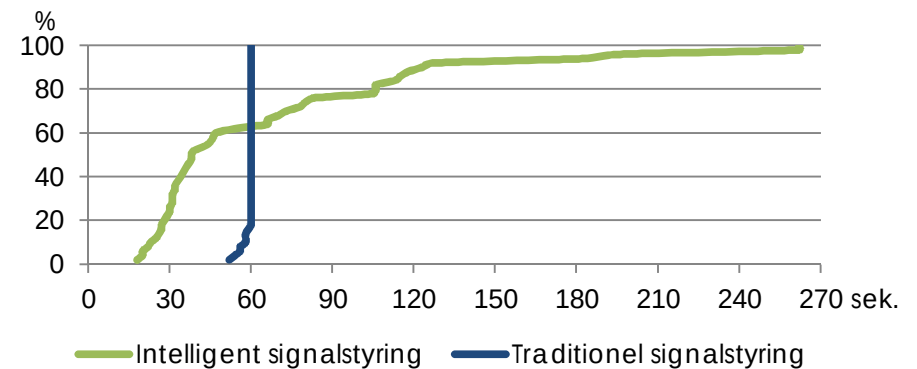
Dette har også betydning i forhold til kølængderne som ses af tabel 4.8. Således reduceres kølængderne betydeligt og helt op til 69,8 %, hvilket er tilfældet for den nordgående trafik på Hobrovej. Igen reduceres kølængderne for samtlige tilfartsspor med undtagelse af den svingende

Kølængde, 95 %-fraktil (Hobrovej / Provstejorden)						
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
					Absolut	Relativ
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	[m]	[%]
Hobrovej S	Hobrovej N	37,7	11,4	2209	-26,3	-69,8
Provstejorden	Hobrovej S	18,4	13,6	62	-4,8	-26,1
Provstejorden	Hobrovej N	18,4	13,6	73	-4,8	-26,1
Hobrovej S	Provstejorden	0,0	0,0	33	0,0	0,0
Hobrovej N	Provstejorden	0,0	0,0	57	0,0	0,0
Hobrovej N	Hobrovej S	8,7	6,6	1595	-2,1	-24,5
Vægtet gennemsnit		24,7	9,3	4030	-15,4	-62,3

Tabel 4.8: Kølængden i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / provstejorden.



Figur 4.7: Sumkurve over grøntiden på Provstejorden med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring.



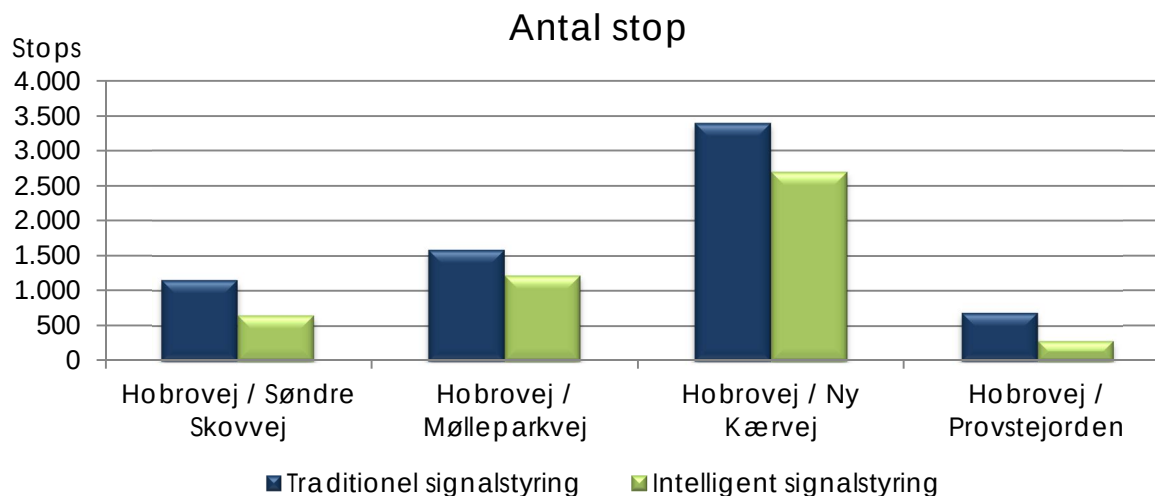
Figur 4.8: Sumkurve over grøntiden på Hobrovej med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring.

trafik fra Hobrovej mod Provstejorden, da der heller ikke forekommer kødannelse med den traditionelle signalstyring.

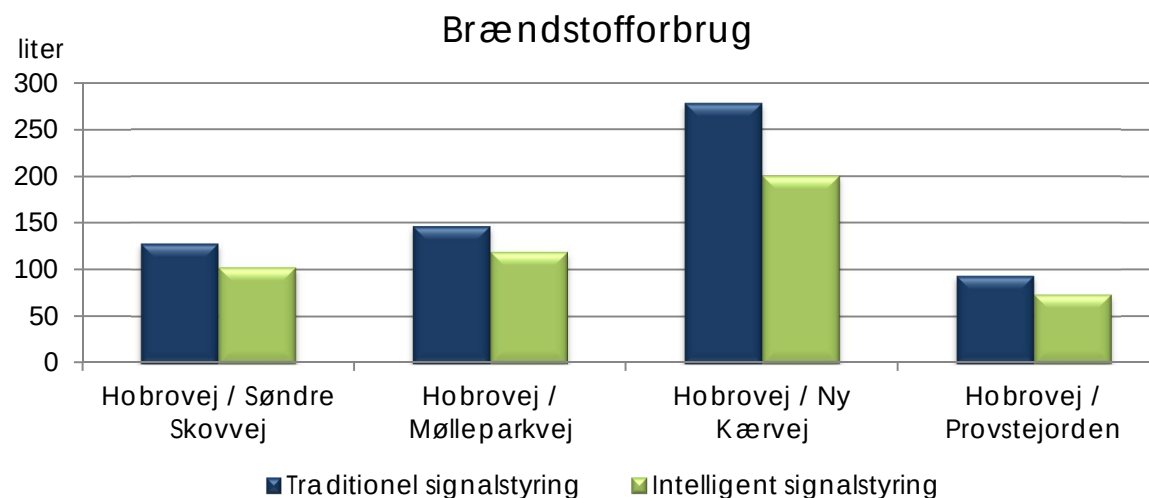
Foruden evalueringen af middelforsinkelsen og kølængden for de respektive trafikstrømme i de fire signalregulerede kryds, er der også foretaget registrering af antal stop samt brændstofforbrug i de signalregulerede kryds.

Registreringen af stop fremgår på figur 4.9 med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring. Som det fremgår foretages der 1.160 stop i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej modsat 654 med den intelligente signalstyring, hvorved antallet af stop næsten er halveret. I krydset Hobrovej / Mølleparkvej reduceres antallet af stop fra 1591 til 1228, hvilket er 22,2 % færre ved anvendelse af den intelligente signalstyring. I krydset Hobrovej / Ny Kærvej, som er der mest trafikkede af de 4 kryds, reduceres antallet af stop med 20,5 % fra 3.304 til 2.706. I det sydligste af de fire kryds mere end halveres antallet af stop, hvilket skydes, at den intelligente signalstyring tilstræber at give grønt for trafikken fra Provstejorden, når der er et passende gab i trafikken på Hobrovej.

Af figur 4.10 fremgår effekten af intelligente signalstyring i forhold til brændstoffor-



Figur 4.9: Det samlede antal stop i de fire signalregulerede kryds med henholdsvis den traditionelle signalstyring og den intelligente signalstyring.



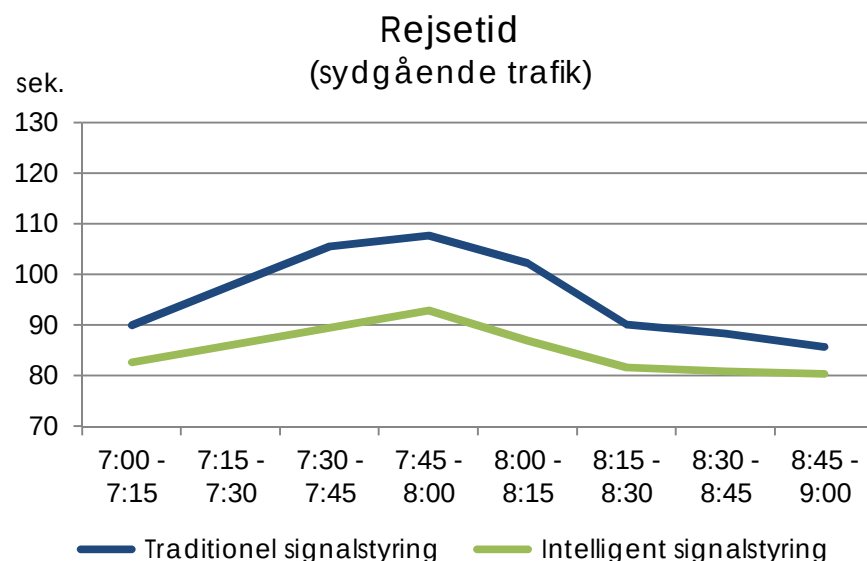
Figur 4.10: Det samlede brændstofforbrug i de fire signalregulerede kryds med henholdsvis den traditionelle signalstyring og den intelligente signalstyring.

bruget. Effekten er tilnærmelsesvis ens i de to T-kryds ved Søndre Skovvej og Mølleparkvej, hvor brændstofforbruget reduceres med 25-27 liter i morgenmyldretiden. I krydset ved Hobrovej / Ny Kærvej reduceres brændstofforbruget med knap 28 %, hvilket svarer til over 75 liter brændstof. I det signalregulerede kryds ved Provstejorden reduceres brændstofforbruget med 21,7 % som konsekvens af den intelligente signalstyring. Samlet set er den gennemsnitlige brændstofbesparelse på 23,3 % eller omkring 150 liter brændstof over to

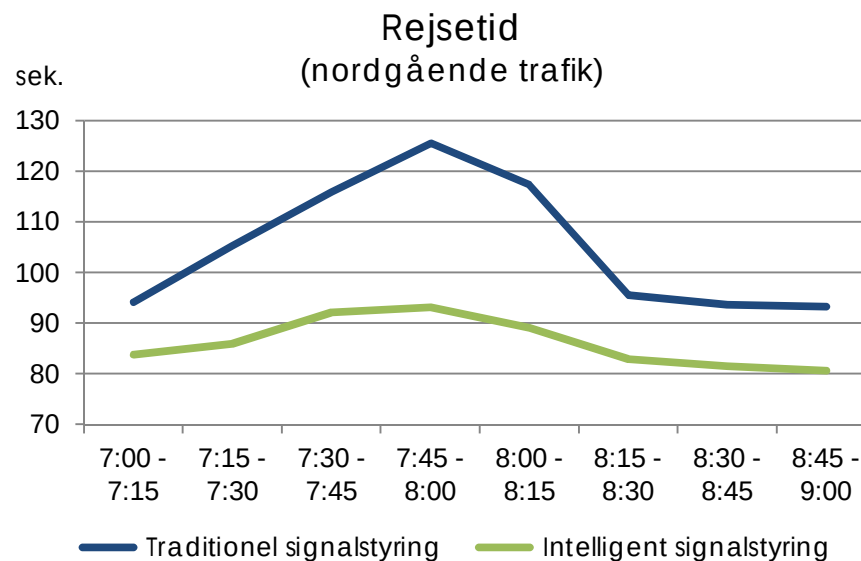
timer i de fire signalregulerede kryds. Dermed reducerer den intelligente signalstyring en direkte omkostning, som relaterer sig til såvel erhvervskørende som privatebiler.

Foruden effekten af den intelligente signalstyring i det enkelte signalanlæg ønskes effekten også kendt på en strækning med flere signalanlæg. I sådanne tilfælde forventes den intelligente signalstyring at kunne realisere en adaptiv signalstyring i realtid, som et alternativ til en traditionel

samordning. Derfor er der foretaget rejsetidsmålinger, hvor disse er sammenholdt på figur 4.11 for den sydgående trafik. Rejsetiden reduceres således med 5 til 16 sekunder for trafikanter, som gennemkører de fire signalregulerede kryds. Omregnet til rejsehastighed bevirker den adaptive signalstyring, at denne hæves fra 37,7 km/t til 42,7 km/t, hvilket svarer til knap 13 %. For den nordgående trafik er effekten mere markant, hvilket fremgår af figur 4.12. Her reduceres rejsetiden med op til et halvt minut i tidsrummet 7:30 til 8:00. Dette svarer



Figur 4.11: Den overordnede rejsetid i sydgående retning med henholdsvis den traditionelle signalstyring og den intelligente signalstyring i morgenmyldretiden.



Figur 4.12: Den overordnede rejsetid i nordgående retning med henholdsvis den traditionelle signalstyring og den intelligente signalstyring i morgenmyldretiden.

til at rejsehastigheden øges fra 34,3 km/t til 42,3 km/t, hvilket er en stigning på mere end 23 %. Derved kan det dokumenteres, at den intelligente signalstyring ved anvendelse i flere tætliggende kryds tilvejebringer en adaptiv signalstyring i realtid, som realiserer en markant bedre trafikafvikling sammenholdt med en traditionel samordning.

4.1 Resultatopsamling

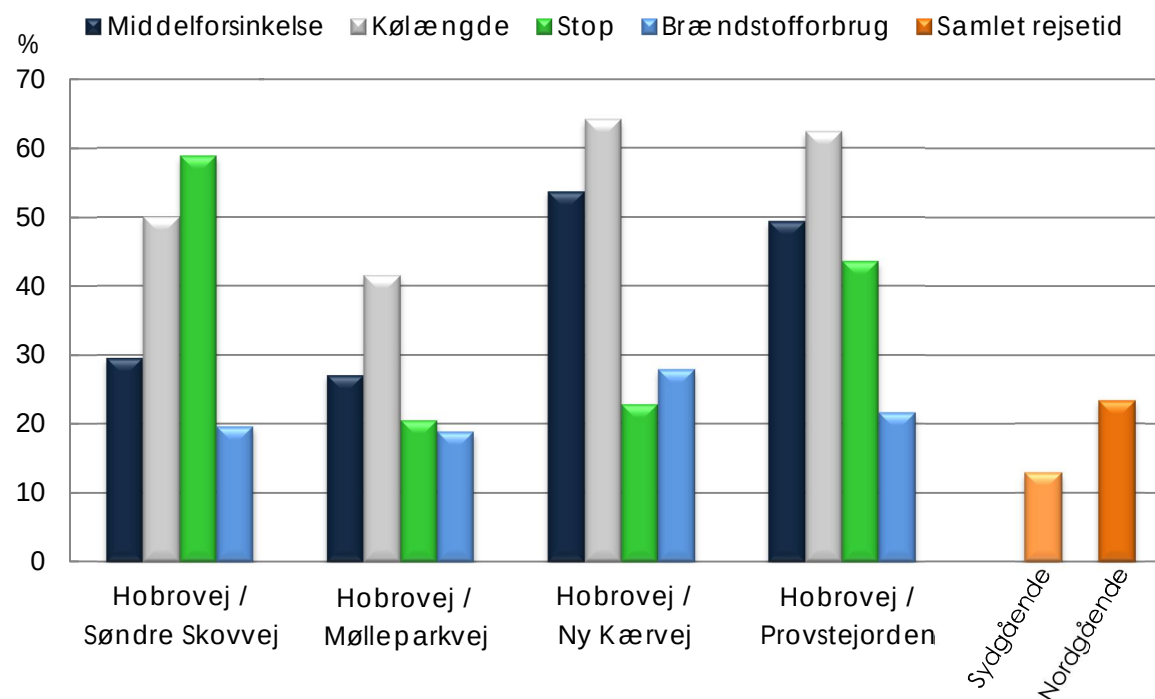
I indeværende kapitel er effekten af den intelligente signalstyring dokumenteret ved at sammenholde simuleringsresultaterne med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring. På baggrund af simuleringsresultaterne står det klart, at der befinder sig et betydeligt optimeringspotentiale i nutidens signalanlæg, som forventeligt kan realiseres ved anvendelse af den intelligente signalstyring.

De konkrete effekter ved den intelligente signalstyring er samlet i figur 4.13, som giver et overblik over effekterne i de fire signalregulerede kryds, samt effekten i forhold til den samlede rejsetid for henholdsvis den nord- og sydgående trafik på Hobrovej. Af figuren fremgår det, at den intelligente signalstyring har en betydelig effekt for samtlige af de indgående parametre. Således forbedres middelforsinkelsen fra 27

% til 54 %. Kølængderne reduceres med i intervallet 42-64 %. Antallet af stop reduceres med mellem 20 % og 59 % mens brændstofforbruget reduceres med 19 % til 28 %. Dertil reduceres den samlede rejsetid med 23 % og 13 % i henholdsvis nord- og sydgående retning.

4.2 Samfundsøkonomi

For at gøre effekterne af den intelligente signalstyring mere konkrete foretages en samfundsøkonomisk beregning med udgangspunkt i vejledende materiale fra Transport-, Bygnings-, og Boligministeriet [2017]. I selve beregningen medtages tids- og brændstofgevinsten. Den samfunds-



Figur 4.13: De reducerede effekter ved anvendelse af den intelligente signalstyring i forhold til parametrene middelforsinkelse, kølængde, stop, brændstofforbrug samt den samlede rejsetid i nord- og sydgående retning på Hobrovej.

økonomiske beregning er naturligvis forbundet med stor usikkerhed og bør betragtes som et forsigtigt estimat. selvom der kun foreligger resultater af effekterne af den intelligente signalstyring i morgenmyldretiden forventes effekten at være tilsvarende i eftermiddagsmyldretiden. I øvrige tidsrum forudsættes effekterne som minimum at være tilsvarende, da unødigt ventetid for rødt i trafiksvage perioder kan elimineres. Derfor forudsættes effekten at være ens over hele døgnet året rundt.

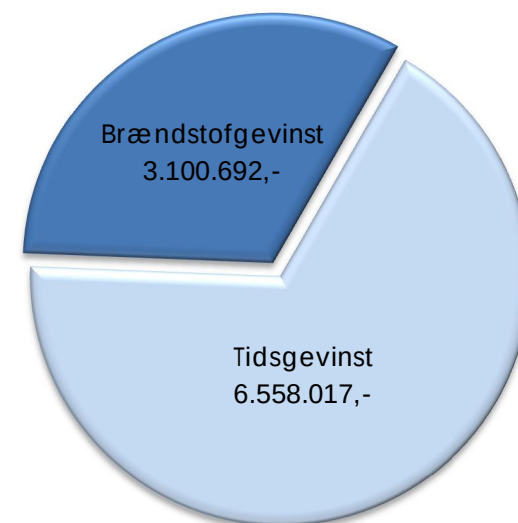
Med udgangspunkt i Vejdirektoratets vejledning *Trafiktælling – Planlægning, udførelse og efterbehandling*, udgør trafikken i tidsrummet 7:00-9:00 19 % af årsdøgntrafikken, hvorfor trafikken kan opskrives [Vejdirektoratet, 2006]. Den samfundsøkonomisk beregning inklusiv forudsætninger fremgår således af tabel 4.9, mens den estimerede gevinster fremgår af figur 4.14. Den intelligente signalstyring i de 4 kryds forventes således at kunne reducere de samfunds-

mæssige omkostninger med over 9,6 mio. kr. årligt.

Etableringen af den intelligente signalstyring skønnes forsigtigt at beløbe sig til et femcifret beløb pr. signalreguleret kryds. Set i forhold til de forventede gevinster vurderes rentabiliteten at være høj sammenholdt med øvrige optimeringer af infrastrukturen.

Samfundsøkonomisk beregning		
Forudsætninger		
Andel af talt trafik (i tidsrummet 7:00-9:00) i forhold til ÅDT	19	%
Vægtet enhedspris (97 % personbiler, 3 % lastbiler)	142,5	kr./time
Vægtet brændstofpris (benzin & diesel)	10,68	kr.
Reduceret tidsomkostning		
Tidsbesparelse pr. døgn (i de 4 signalregulerede kryds)	126,1	timer
Årlig tidsbesparelse (126,1 timer over 365 dage)	46.034,1	timer
Årlig tidsgevinst	6.558.017	kr.
Reduceret brændstofomkostning		
Brændstofbesparelse pr. døgn (i de 4 signalregulerede kryds)	795,4	liter
Årlig brændstofbesparelse (795,4 liter over 365 dage)	290.326,9	liter
Årlig brændstofgevinst	3.100.692	kr.
Årlig samfundsøkonomisk gevinst	9.658.709	kr.

Tabel 4.9: Samfundsøkonomisk beregning af effekterne afledt af den intelligente signalstyring [Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2017].



Figur 4.14: De estimerede årlige gevinster afledt af den intelligente signalstyring.

5 Diskussion

Indeværende kapitel har til formål at sammenfatte og diskutere de i projektet anvendte metoder samt de afledte resultater heraf.

Den systematiske litteratursøgning, som indledningsvist er foretaget og sammenfattet i et litteraturstudie, er baseret på materiale fra ind- såvel som udland. I forhold til den traditionelle signalstyring dokumenteres det, at mange af de traditionelle principper inden for signalstyring går igen på tværs af nationer. I forhold til optimeringsmuligheder i signalregulerede kryds pågår mange forskellige forskningsprojekter nationalt som internationalt, hvor flere af dem er præsenteret i litteraturstudiet. I forhold til projektets tidsramme og ressourcer har det været nødvendigt at specificere litteratursøgning via bestemte nøgleord, hvilket har begrænset mængden. Dette har således medført en risiko for, at relevant materiale ikke er

medtaget i indeværende projekt. I det indgående forskningsmateriale dokumenterer det, at de traditionelle signalstyringsprincipper virker hindrende for den overordnede trafikafvikling, hvilket understøtter hypotesen om, at der findes et optimeringspotentiale i nutidens signalanlæg.

Dataindsamlingen af videoobservationer i samarbejde med Aalborg Kommune er foretaget på forskellige ugedage i forskellige uger. Dette er naturligvis ikke optimalt, men da der ikke har været tilstrækkeligt materiel og ressourcer, har det ikke været muligt at udføre videoobservationerne på én og samme dag. For at kvalitetssikre krydstællingerne, som er udført på baggrund af videoobservationerne, er den ind- og udkørende trafik sammenholdt i nabokryds. Heraf fremgår det, at afvigelserne mellem den ind- og udkørende trafik i de respektive kryds er minimal, hvorved den registrerede trafik vurderes at være repræsentativ for strækningen.

I forhold til at realisere den intelligente signalstyring er Uppaal Stratego anvendt som matematisk optimeringsmodel. Det vides ikke, hvorvidt der reelt findes alternativer til Uppaal Stratego, men da programmet beregner en nærværd optimal signalstyring inden for en given horisont, er der ikke

belæg for eventuelt at anvende alternative programmer til dette formål.

Til at dokumentere effekten af den intelligente signalstyring er mikrosimuleringsprogrammet VISSIM anvendt. Selvom der findes flere andre mikrosimuleringsprogrammer, har VISSIM reelt monopol på området inden for mikrosimulering i Danmark, da der er udarbejdet en vejregel med anbefalinger og vejledninger i forbindelse med mikrosimuleringsarbejdet.

I arbejdet med mikrosimuleringsmodeller er en eksakt gengivelse af virkeligheden utopi, hvorfor overensstemmelsen mellem model og virkelighed er tilnærmelsesvis. Dette forventes primært at gælde for adfærdsparametre, som eksempelvis hastighed, acceleration, reaktionstid og tidsgab i forbindelse med vigepligt. Selvom der i større eller mindre grad vil forekomme afvigelser mellem de faktiske parameter-værdier og parameter-værdierne anvendt i VISSIM, vurderes de simuleringsmæssige fejlkilder at have en minimal betydning. Dette skyldes, at de udførte simuleringer er fuldstændig identiske – med undtagelse af signalstyringen. Derved vil betydningen af eventuelle fejlkilder formegentlig være identisk i simuleringerne med den traditionelle og intelligente signalstyring.

I forhold til projektlokaliteten er der i projekt taget udgangspunkt i en strækning på Hobrovej med 6 signalregulerede kryds, hvor de 4 kryds inde på selve strækningen er modelleret eksakt. Det nord- og sydligste kryds anvendes blot til at realisere en mere grupperet ankomstfordelingen af den indkørende trafik på strækningen. At omkringliggende kryds ikke er medtaget skyldes, at effekten af den intelligente signalstyring alene ønskes bestemt uden indflydelse af øvrige traditionelle signalanlæg. Såfremt den intelligente signalstyring etableres i et konkret kryds, bør det naturligt undersøges, om effekten eksempelvis begrænses af et tætvedliggende signalreguleret kryds, hvor trængselsproblemerne blot forskydes til.

I forbindelse med et forskningsprojekt som dette, skal der naturligt ses kritisk på resultaterne og ikke mindst tilblivelsen af disse uanset størrelsesorden. En plausibel forklaring på de markante effekter kunne være, at før-situationen med den traditionelle signalstyring har været ganske dårlig, hvilket naturligt vil få den intelligente signalstyring til at stå i et fordelagtigt lys. Dette kan dog afvises, da den traditionelle signalstyring på Hobrovej først og fremmest udgøres af tre samordnede signalanlæg, som er en meget udbredt styreform. Derudover

betegnes den reelle trafikafvikling, som forventelig taget i betragtning at Hobrovej som indfaldsvej betjener omkring 25.000 køretøjer dagligt. Det sidste af de fire signalanlæg er trafikstyret med hele 13 spoler alene til detektering af motorkøretøjer i krydssets tre tilfarter. Der kan således ske grøntidsforlængelser for alle trafikstrømme ligesom præferencestillingen anvendes på Hobrovej.

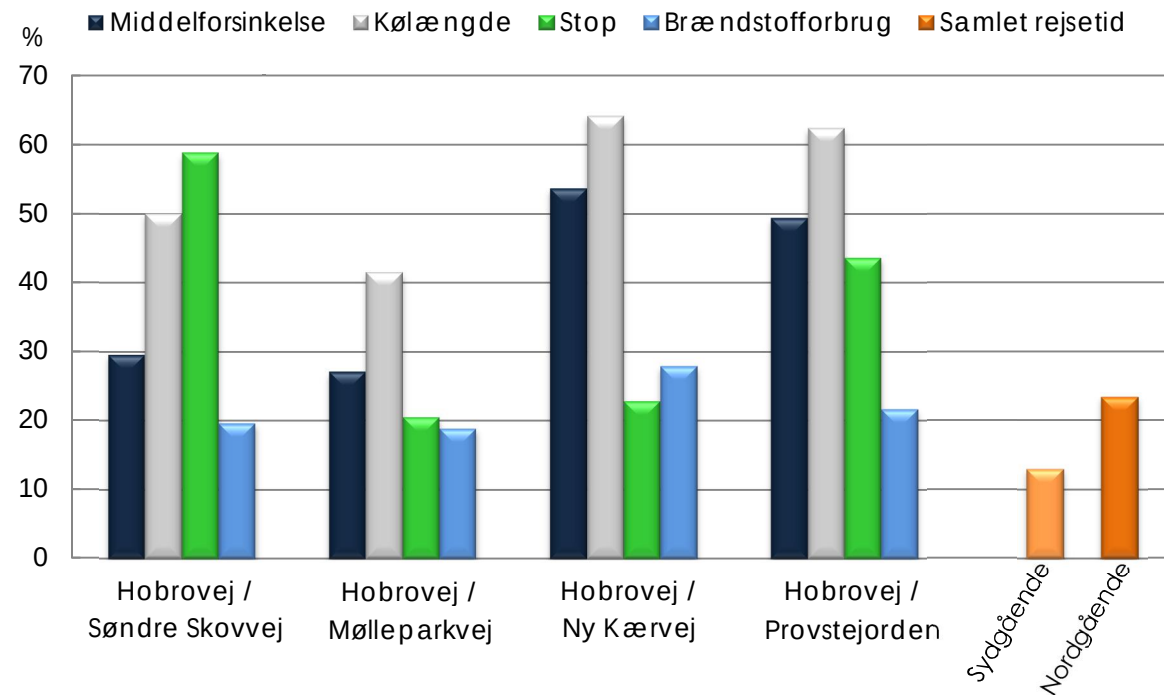
I forbindelse med videoobservationerne samt reelle observationer i løbet af projektperioden er der en mistanke om, at nogle af signalanlæggene har fejlbehæftede detektorer, hvilket formodes på baggrund af uforklarlige og uhensigtsmæssige grøntidsforlængelser. I selve modelleringen af den eksisterende signalstyring er de fejlbehæftede detektorer ikke gengivet, hvorfor effekterne forudsætter fuldt ud funktionelle detektorer. Såfremt flere af disse reelt er fejlbehæftet, vil effekterne ved implementeringen af den intelligente signalstyring være endnu større. Derved betragtes effekterne som realistiske og muligvis marginalt konservative.

6 Konklusion

Med udgangspunkt i kapitel 1, som belyser indgående elementer i den traditionel signalstyring samt nye detekteringsteknologier og alternative styringsprincipper, blev følgende problemformulering udarbejdet:

Eksisterer der et ukendt optimeringspotentiale i nutidens signalanlæg, som kan indfries ved brug af matematiske optimeringsmodeller samt radarer, og i hvilken størrelsesorden er et sådant potentiale?

Der har således været en forventning om, at der eksisterer et ukendt optimeringspotentiale i de signalregulerede kryds. I bestræbelserne på at dokumentere optimeringspotentialet er der udviklet en intelligent signalstyring som alternativ til den traditionelle signalstyring.



Figur 6.1: De reducerede effekter ved anvendelse af den intelligente signalstyring i forhold til parametrene middelforsinkelse, kølængde, stop, brændstofforbrug samt den samlede rejsetid i nord- og sydgående retning på Hobrovej.

Resultatbehandlingen dokumenterer, at den intelligente signalstyring har en effekt i forhold til parametrene middelforsinkelse, kødannelse, antal stop, brændstofforbrug samt den overordnede rejsetid på Hobrovej. Foruden optimeringspotentialets eksistens er størrelsesorden af dette også belyst. Overordnet set forbedres samtlige

parametre i de 4 signalregulerede kryds, hvilket fremgår af figur 6.1. Derudover forbedres rejsetiden også mærkbart på strækningen, da den gennemsnitlige rejsehastighed er øget betydeligt. Helt konkret viser simuleringresultaterne, at middelforsinkelsen forbedres med mellem 27 og 54 %. Kølængderne reduceres med 42

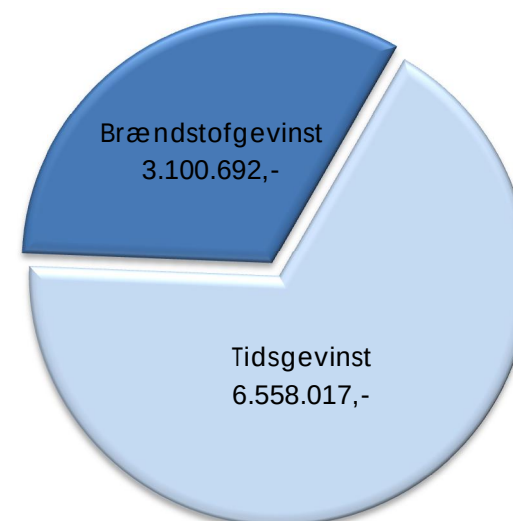
% til 64 %. Antallet af stop reduceres i intervallet 20-59 % mens brændstofforbruget reduceres med 19 % til 28 %. Dertil reduceres den samlede rejsetid med 23 % og 13 % i henholdsvis nord- og sydgående retning.

Fra et samfundsøkonomisk perspektiv er de betydelige effekter af den intelligente signalstyring gjort op, hvilket fremgår af tabel 6.1 samt figur 6.2. I den samfundsøkonomisk beregning indgår gevinsterne som relaterer sig til tids- og brændstof-

omkostningen. Af den samfundsøkonomiske beregning baseret på simuleringresultaterne er den samfundsøkonomiske effekt estimeret til over 9,6 mio. kr. årligt i de 4 signalregulerede kryds.

Samfundsøkonomisk beregning	
Forudsætninger	
Andel af talt trafik (i tidsrummet 7:00-9:00) i forhold til ÅDT	19 %
Vægtet enhedspris (97 % personbiler, 3 % lastbiler)	142,5 kr./time
Vægtet brændstofpris (benzin & diesel)	10,68 kr.
Reduceret tidsomkostning	
Tidsbesparelse pr. døgn (i de 4 signalregulerede kryds)	126,1 timer
Årlig tidsbesparelse (126,1 timer over 365 dage)	46.034,1 timer
Årlig tidsgevinst	6.558.017 kr.
Reduceret brændstofomkostning	
Brændstofbesparelse pr. døgn (i de 4 signalregulerede kryds)	795,4 liter
Årlig brændstofbesparelse (795,4 liter over 365 dage)	290.326,9 liter
Årlig brændstofgevinst	3.100.692 kr.
Årlig samfundsøkonomisk gevinst	9.658.709 kr.

Tabel 6.1: Samfundsøkonomisk beregning af effekterne afledt af den intelligente signalstyring [Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2017].



Figur 6.2: De estimerede årlige gevinster afledt af den intelligente signalstyring.

7 Perspektivering

I indeværende kapitel sættes der fokus på projektets indgangsvinkel. Dette gøres med henblik på skabe et bredere perspektiv i forhold til det omtalte optimeringspotentiale og belyse udfordringer og dilemmaer i henhold til dette. Derudover skal projektet ses som en indledende undersøgelse under DiCyPS-projektarbejdet, hvor det overordnede mål er at udvikle en mere intelligent signalstyring. Derved forventes projektarbejdet at fortsætte de kommende år, hvorfor det fremtidige arbejde belyses.

Indgangsvinklen til projektet har været at undersøge, hvorvidt der eksisterer et ukendt optimeringspotentiale i nutidens signalregulerede kryds samt en eventuel størrelsesorden af dette. Dette forventes realiseret ved anvendelse af radardetektering som alternativ til traditionelle induktionsspoler, hvilket muliggør objektetektering i stedet for punktdetektering. Derud-

over gøres op med traditionelle signalstyringsprincipper, hvortil Uppaal Stratego anvendes som matematisk optimeringsmodel med henblik på at realisere en nærværd optimal signalstyring.

Som konsekvens af projektets omfang og kompleksitet har indgangsvinklen været relativt snæver, hvor det primære fokus har været på de kapacitets- og fremkommelighedsmæssige aspekter. Foruden disse rummer projektet også trafiksikkerheds- og tryghedsmæssige aspekter, som ikke har været indgående elementer i selve projektarbejdet.

I henhold til trafiksikkerheden, forventes anvendelse af radardetektering umiddelbart at give nye muligheder i forhold til at højne trafiksikkerheden i de signalregulerede kryds. Dette skyldes den kontinuerlige detektering af trafikanternes hastighed nær krydset, hvormed den omtalte ETA-funktion kan anvendes. ETA-funktionen gør det muligt at realisere en sikker afslutning af grønt, så eventuelt ankomende køretøjer ikke befinder sig i valg- eller dilemma-zonen når grønt afsluttes. Dette gælder især for køretøjer, som har en lavere hastighed end den dimensionsgivende hastighed i forhold til grøntidsforlængelser afledt af punktanmeldelser. I disse tilfælde

anvendes ETA-funktionen, hvormed køretøjer kommer sikkert gennem krydset og grønt efterfølgende afsluttes. Foruden en trafiksikkerhedsmæssig effekt bevirker ETA-funktionen også, at grøntiden ikke forlænges forgæves, hvormed færre trafikanter vil holde unødigt for rødt i krydssets øvrige tilfartsspor. Køretøjer, som har en højere hastighed end den dimensionsgivende ved traditionel punktdetektering, får en præcis grøntidsforlængelse, så der ikke forlænges unødigt. Derved har ETA-funktionen både en kapacitets- og trafiksikkerhedsmæssig effekt.

I projektet har fokus været på motortrafikken, mens de bløde trafikanter ikke har været en indgående del af projektet. Dette til trods for at både cyklister og fodgængere har en betydelig indflydelse på den overordnede trafikafvikling i de signalregulerede kryds. Når disse trafikantgrupper skal medtages ved anvendelse af den intelligente signalstyring, kræver dette en meget præcis detektering. Radardetekteringen giver således helt nye muligheder, da grøntiden for fodgængere og cyklister kan gøres dynamisk. Dette vil betyde, at konservative, dimensionsgivende hastigheder til beregning af minimumgrønt vil være overflødige. Dette forudsætter dog, at radardetektering er pålidelig og præcis,

så eksempelvis fodgængere ikke overses af radaren.

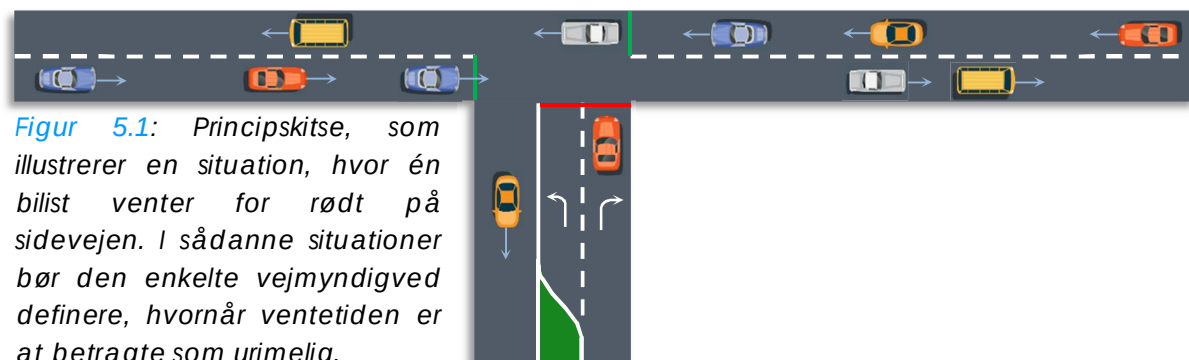
I forhold til det trafikikkerhedsmæssige aspekt, skal der blot tages hensyn til at konfliktende trafikanter ikke kolliderer. Et andet aspekt er i denne sammenhæng den oplevede tryghed for den enkelte trafikant. Det kan således diskuteres, hvor stor afstand der bør være mellem de forskellige trafikanter under hensyntagen til den oplevede tryghed. Set ud fra et kapacitetsmæssigt synspunkt vil det mest optimale være, at konfliktende trafikstrømme kører så tæt som muligt. Dette vil dog køjensynligt resultere i stor utryghed blandt trafikanterne og kan i givet fald skabe usikkerhed i forhold til, hvornår man som trafikant vil foretage en igangsætning ved grønt hvis konfliktende trafikstrømme endnu ikke er afviklet. Der er således tale om en meget fin balancegang, hvor trafikanternes sikkerhed og tryghed naturligvis ikke skal kompromitteres i bestræbelserne på at tilvejebringe en mere effektiv trafikafvikling. I den forbindelse bør det nævnes, at effekten i indeværende projekt er tilvejebragt uden at gå på kompromis med lovkravene i form af tider for gult og rødt/gult.

Et andet anvendt princip, som muligvis vil være genstand for debat, er princippet

om det frie fasevalg. Dette tillader signalanlægget at prioritere én given fase frem for andre, eksempelvis ved at give grønt fra en sidevej efter grønt på den overordnede vej, hvor der ikke indkobles en venstresvingsfase på den overordnede vej. Det frie fasevalg er således medvirkende til at realisere en mere effektiv trafikafvikling, end tilfældet er i dag, hvor fasevalget, forudsat anmeldelse, typisk er prædefineret. Det frie fasevalg gør naturligt faserækkefølgen uforudsigelig for trafikanterne, hvilket i nogle sammenhænge kritiseres. Dette er dog umiddelbart ubegrundet, da størstedelen af alle signalanlæg i Danmark anvender forskellige signalprogrammer i løbet af dagen. Såfremt en trafikant ankommer til et signalreguleret kryds i myldretiden, vil denne typisk opleve, at venstresvingsfaser ofte indkobles, mens dette ikke nødvendigvis vil være tilfældet midt

på dagen. Derved er faserækkefølgen heller ikke i dag kendt for den enkelte trafikant, selvom der typisk vil tegne sig et mønster. Moderne og mere intelligente signalanlæg må derfor forventes i højere grad end tidligere at være dynamiske, så de kan tilpasse sig den aktuelle trafikale situation. Denne udvikling vil naturligt kræve tilvænning hos trafikanterne. Det bør dog ikke udmønte sig i yderligere udfordringer, da det ganske enkelt handler om at agere ud fra signalbilledet og ikke personlige formodninger og analogibetrægtninger.

Et andet aspekt af det frie vasevalg, som med rette bør debatteres, er den tilladelige rødtid. Af lovgivningen fremgår det, at signalanlæg som element bør anvendes for at hindre urimelige ventetider og kødannelser, hvilket i sig selv kan være pa-



Figur 5.1: Principskitse, som illustrerer en situation, hvor én bilist venter for rødt på sidevejen. I sådanne situationer bør den enkelte vejmyndighed definere, hvornår ventetiden er at betragte som urimelig.

radoksalt. I eksemplet, som er illustreret på figur 5.1 på forrige side, hvor der forekommer betydelig trafik i et givent signalreguleret kryds og der kun befinder sig én enkelt bilist på sidevejen, hvad vil så være en tilladelig og rimelig ventetid? Der findes naturligvis ikke noget entydigt svar. Dette må i stedet være op til den enkelte vejmyndighed, hvor kompromisset mellem en effektiv trafikafvikling uden urimelige ventetider skal findes. På baggrund af projektet står det klart, at rødtiden i signalregulerede kryds varierer meget forskellige nationer i mellem. Nationalt er omløbstiden typisk ikke længere end 80 til 110 sekunder, hvilket bevirker at ventetiden maksimalt vil være ét til halvandet minut, forudsat at kødannelsen afvikles i løbet af grøntiden. I eksempelvis Australien er det ikke ualmindeligt, at rødtiden er dobbelt så lang, da omløbstiden flere steder er knap tre minutter.

Med indeværende projekt introduceres flere nye principper og metoder i forbindelse med den intelligente signalstyring, hvilket naturligt kræver en kritisk tilgang. Når dette er sagt bør saglige argumenter vægte tungest i den debat den nye signalstyring afleder. At arbejdet med signalanlæg i årevis har været præget af faste principper og fremgangsmåder er således

ikke et argument for bibeholde disse. I stedet bør der ses med kritiske øjne på traditionelle principper, hvor flere af disse i nær fremtid, hvis ikke allerede, har mistet eksistensberettigelsen i forbindelse med signalarbejdet.

7.1 Fremtidige projektarbejde

På kort sigt bør indflydelsen af cyklister og fodgængere undersøges, hvilket i første omgang bør ske ved at inkludere disse i mikrosimuleringsmodellen. Da disse trafikantgrupper har indflydelse på den øvrige trafikafvikling forventes disse også at have en betydning i forhold til effekten af den intelligente signalstyring. Derudover er det også relevant at undersøge effekten på andre tidspunkter af døgnet. Dette kunne eksempelvis være midt på dagen, om natten eller ved større arrangementer som koncerter eller sportsbegivenheder, hvor trafikken adskiller sig fra normalbilledet. Derudover er det også interessant at undersøge andre vejstrækninger for at undersøge, hvorvidt effekten varierer fra lokalitet til lokalitet.

Et andet fokusområde vil naturligt være den intelligente signalstyring, som skal videreudvikles. Indtil videre fungerer signalstyring decentralt, hvorved der ikke er nogen direkte sammenhæng mellem signal-

styringen i de respektive kryds. Det forventes dog, at en central styring af flere signalanlæg vil øge effekten af den intelligente signalstyring yderligere. Dette skyldes, at en central signalstyring med data fra samtlige kryds som minimum vil realisere en tilsvarende effektiv signalstyring. Dette skal således undersøges og dokumenteres i det fremadrettede arbejde.

På længere sigt er ambitionen, at den intelligente signalstyring skal realiseres ved anvendelse af neurale netværk, en slags kunstig intelligens, i stedet for maskinlæring. Dette forventes at resultere i en endnu mere intelligent signalstyring end den i projektet anvendte.

DiCyPS-projektet bygger på et tæt samarbejde mellem virksomheder og institutioner. Af samarbejdspartnere kan nævnes Rambøll samt Aarhus Kommune og Aalborg Kommune, som, foruden en indgående interesse, også har bidraget til projektet i form af sparing og ekspertise. I projektets næste fase ønskes den intelligente signalstyring afprøvet i et reelt kryds i et bynært område. På baggrund af de møder der har været mellem samarbejdspartnerne, har både Aalborg Kommune og Aarhus Kommune tilkendegivet, at de ønsker at teste den intelligente signalstyring i

praksis. I første omgang forventes ét kryds i hver kommune udvalgt, hvor styringen kan implementeres. Dette vil give mulighed for at dokumentere den konkrete effekt af den intelligente signalstyring.

I forbindelse med implementeringen i reelle kryds er der også mulighed for at undersøge, hvorvidt den intelligente signalstyring har en indflydelse på trafiksikkerheden. Det frie fasevalg og den mere dynamiske signalstyring er, som tidligere nævnt, mulige elementer, der kan have indflydelse på trafiksikkerheden. I den forbindelse forventes unødigt ventetid for rødt reduceres, hvilket muligvis kan mindske antallet af rødkørsler i specielt trafiksvage periode af døgnet. I forhold til trafiksikkerheden kan der også sættes fokus på køretøjer i dilemma-zonen, hvilket forventes at kunne implementeres i den intelligente signalstyring, da køretøjernes ETA kendes.

Et andet aspekt, som ikke har været belyst i projektet, er mulighederne for dynamiske mellemtider. Dette forudsætter først og fremmest at detekteringsteknologien er forholdsvis sikker og derved vil højne den overordnede trafiksikkerhed. Såfremt dette er tilfældet har signalanlægget et fuldt overblik over trafikanterne i både krydsareal og de respektive tilfarter. En sådan

detektering vil give flere nye muligheder for en effektiv signalstyring. Dette forudsætter dog en lovændring, da *Bekendtgørelsen om anvendelse af vejafmærkning* i dag angiver faste tider for gult og rød/gult på henholdsvis 4 og 2 sekunder [Transport- og Bygningsministeriet, 2016]. Disse tider bør ud fra et kapacitetsmæssigt synspunkt gøres dynamiske, såfremt dette er sikkerhedsmæssigt forsvarligt. Dette vil også give mulighed for en dynamisk beregning af mellemtids- og sikkerhedsmatricer, som i dag er faste og konservative. En dynamisk beregning af disse vil bevirke at, mellemtiden tilsvare det aktuelle behov – hverken mere eller mindre.

Litteratur- 8 liste

Abbas et al., 2014

Abbas, M., Higgs, B., Machiani, S. G., 2014. Integrated Real-Time Data Collection and Safety Improvement System at Signalized Intersections. 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 8.-11. oktober, 2014. Qingdao, Kina.

Agerholm, 2013

Agerholm, N., 2013. Adaptiv signalstyring i Aalborg – effekt på trafikafviklingen. Trafik & Veje, april 2013, side 63-65.

Aijazi et al., 2016

Aijazi, A. K., Checchin, P., Malaterre, L., 2016. Automatic detection of vehicles at road intersections using a compact 3D Velodyne sensor mounted on traffic signals. Intelligent

Vehicles Symposium (IV), 2016 IEEE. 19.-22. juni, 2016. Göteborg, Sverige.

Andersen, 2016

Andersen, P., 2016. Integration mellem WiFi og Radar. Webinar, ITSDanmark. http://itsdanmark.dk/_files/2016062315_01integrationmellemwifiogradar.mp4. Tilgået 22. februar 2017.

Barth, 2013

Barth, M. et al., 2013. Platoon-Based Multi-Agent Intersection Management for Connected Vehicle. Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). 6.-9. oktober, 2013. Den Haag, Holland.

Christensen, 2005

Christensen, P., 2005. SPOT – en styringsfilosofi i udvikling. Dansk Vejtidskrift (i dag Trafik & Veje), November 2005, side 68-70.

DiCyPS, 2017

DiCyPS, 2017. Velkommen til DiCyPS. <http://www.dicyps.dk/>. Tilgået 22. maj 2017.

Eriksen et al., 2017

Eriksen, A. et al., 2017. Uppaal Stratego for Intelligent Traffic Lights. 12th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. 19.-20. juni 2017. Strasbourg, Frankrig.

FHWA., 2006

FHWA, 2006. Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I. Federal Highway Administration (FHWA). <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/06108.pdf>. Tilgået 5. maj 2017

FHWA, 2013

FHWA, 2013. Signalized Intersections Informational Guide, 2nd Edition. Federal Highway Administration (FHWA). <https://safety.fhwa.dot.gov/intersection/conventional/signalized/fhwasa13027/fhwasa13027.pdf>. Tilgået 10. maj 2017.

Gautier, 2001

Gautier, E., 2001. Adaptive signalsystemer. Dansk Vejtidskrift (i dag Trafik & Veje), maj 2001, side 36-37.

Ghods & Fu, 2014

Ghods, A. H., Fu, L., 2014. Real-time estimation of turning movement counts at signalized intersections using signal phase information. I; Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, side 128-138. Pergamon Press, Storbritannien.

Günther et al., 2016

Günther, H. et al., 2016. Platooning at Traffic Lights - A microscopic simulation study. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gøteborg, Sverige, 19.-22. juni, 2016.

Ho & Chung, 2016

Ho, T., Chung, M., 2016. An Approach to Traffic Flow Detection Improvements of Non-Contact Microwave Radar Detectors. Applied System Innovation (ICASI), 2016 International Conference on. 26.-30. maj, 2016.

Infrastrukturkommissionen, 2008

Infrastrukturkommissionen, 2008. Danmarks Transportinfrastruktur 2030. Infrastrukturkommissionen. ISBN 978-87-91511-82-0.

Ingeniøren, 2014

Ingeniøren, 2014. Kursen er lagt for de selvkørende biler. <https://ing.dk/artikel/kursen-er-lagt-de-selvkoerende-biler-170919>. Tilgået 3. marts 2017.

ITE, 2008

The Institute of Transportation Engineers (ITE), Dist. 7, 2008. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. ISBN 1-933452-24-2

Jakobsen, 2015

Jakobsen, L., 2015. Intelligent detektering i trafiksignaler. Webinar, ITSDanmark. http://itsdanmark.dk/_files/2015020515_02intelligentdetekteringitrafiksignaler.wmv. Tilgået 2. april 2017

Kastrinaki et al., 2003

Kastrinaki, V., Zervakis, M., Kalaitzakis, K., 2003. A survey of video processing techniques for traffic applications. I; Image and Vision Computing 21, side 359-381.

Kildebogaard, 2015

Kildebogaard, J., 2015. Trafiksignaler - hvordan udnytter vi udviklingspoten-

tialet? Trafik & Veje, september 2015, side 28-30.

Kmastra, 2017

Kmastra, 2017. Trafiktællinger <http://kmastra.dk>. Tilgået 18. maj 2017.

Knudsen & Jakobsen, 2013

Knudsen, K., Jakobsen, L., 2013. Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister. Trafik & Veje, september 2013, side 31-33.

Kong et al., 2011

Kong, X. et al., 2011. Urban Arterial Traffic Two-direction Green Wave Intelligent Coordination Control Technique and Its Application. I; International Journal of Control, Automation, and Systems, side 60-68. ISSN: 2005-4092.

Kronborg & Davidsson, 2004

Kronborg, P., Davidsson, F., 2004. Adaptiv styrning av Stockholms trafiksignaler, Kunskapssammanställning och förslag. Movea Trafikkonsult AB.

Krøyer, 2008

Krøyer, B. 2008. Miljøstyret trafik uden afgifter. Dansk Vejtidskrift (i dag Trafik & Veje) juni/juli, 2008, side 46-47.

Københavns Kommune, 2015

Københavns Kommune, 2015. Compass4D – EU ITS-projekt om kommunikation mellem køretøjer og infrastruktur. Trafikdage, 24.-25. august 2015. Aalborg, Danmark.

Larsen et al., 2017

Larsen, K. G., David, A., Jensen, P. G., Mikučionis, M., Taankvist, J. H., 2017. Uppaal Stratego - strategy synthesis, learning, optimization and evaluation. <http://people.cs.aau.dk/~maris/stratego/>. Tilgået 25. maj 2017.

Lauritzen, 1994

Lauritzen, S. 1994. Signalregulerede kryds. I; Vejtrafik – Trafikteknik & Trafikplanlægning, Lahrmann, H. & Leleur, S., Polyteknisk Forlag. Side 147-180. ISBN 87-502-0772-5.

Lauritzen, 2000

Lauritzen, S., 2000. Optimering af signalanlæg. Dansk Vejtidskrift (i dag Trafik & Veje), februar (2) 2000, side 53-55.

Lauritzen, 2004

Lauritzen, S. M., 2004. Evaluering af DOGS - Signalsystem på Ring 3 gennem Herlev. Vejdirektoratet.

Lin et al., 2016

Lin, Q., et al., 2016. Vehicle-to-Infrastructure communication Based Eco-Driving Operation at Multiple Signalized Intersections. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 17.-20. oktober, 2016. Hangzhou, Kina.

Madsen et al., 2016

Madsen, T. K. O. et al., 2016. RUBA – Videoanalyseprogram til trafikanalyser. Trafik & Veje, marts 2016, side 14-17.

Rambøll, 2016

Rambøll, 2016. Simulering af ETA-radar og signalanlæg uden omløbstid. Vejforum 6.-8. december 2016. Nyborg, Danmark.

Rådet for Sikker Trafik, 2016

Rådet for Sikker Trafik, 2016. Uopmærksomhed i Trafikken. <https://www.sikkertrafik.dk/raad-og-viden/i-bil/uopmaerkksomhed>. Tilgået 20. marts 2017.

Santiago-Chaparro et al., 2012

Santiago-Chaparro, K. R., et al., 2012. Real time performance measures from radar-based vehicle detection systems. 19th ITS World Congress, 22.-26. oktober, 2012. Wien, Østrig

Sarabi & Abbas, 2015

Sarabi, D. Z., Abbas, M., 2015. An Algorithm for Identifying Red Light Runners from Radar Trajectory Data. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 15.-18. September, 2015.

Siemens, 2013

Siemens, 2013. Adaptive network control Sitraffic Motion MX. <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/road-solutions/urban/infrastructure/sitraffic-motion-mx-en.pdf>. Tilgået den 6. april 2017.

Smartmicro, 2016

Smartmicro, 2016. Traffic Rader | Intersection Management. <http://www.smartmicro.de/traffic-radar/intersection-management/>. Tilgået 4. April 2017.

- SRSF-regeringen, 2011
SRSF-regeringen, 2011. Et Danmark, der står sammen – Regeringsgrundlag. Statsministeriet.
http://www.stm.dk/publikationer/Et_Danmark_der_staar_sammen_11/Regeringsgrundlag_okt_2011.pdf. Tilgået 22. februar 2017.
- StratMa, 2017
StratMa, 2017. Will autonomous cars decrease the number of vehicles?
<http://stratma-int.ch/will-autonomous-cars-decrease-the-number-of-vehicles/>. Tilgået den 3. marts 2017.
- SWARCO, 2014
SWARCO, 2014. Innovative C-ITS Services – Traffic Light Assist. Webinar, ITS Danmark.
<http://itsdanmark.d/files/2014121115.00trafficlightassistswarcoogaudi.wmv>. Tilgået 26. marts 2017.
- SWARCO, 2015
SWARCO, 2015. Et skridt nærmere for føreløse biler – I Norden.
<http://www.swarco.dk/Nyheder/Nyheder/Sidste-nyt/Et-skridt-naermere-for-foreloese-biler->
- [%E2%80%93-i-Norden](#). Tilgået 10. marts 2017.
- Tan et al., 2016
Tan, M. K. et al., 2016. Genetic algorithm based signal optimizer for oversaturated urban signalized intersection. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia). 26.28. oktober, 2016. Seoul, Sydkorea.
- Transport- og Bygningsministeriet, 2016
Transport- og Bygningsministeriet, 2016. Bekendtgørelse om anvendelse af vejafmærkning (BEK nr. 1194 af 21/09/2016), 2016.
- Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2017
Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2017. Transportøkonomiske enhedspriser til brug for samfundsøkonomiske enhedspriser.
<http://www.modelcenter.transport.dtu.dk/Noegletal/Transportoekonomiske-Enhedspriser>. Tilgået den 6. juni 2017.
- TRB, 2000
Transportation Research Board of the National Academies (TRB), 2000. Highway Capacity Manual. ISBN 0-309-06681-6.
- TRB, 2010
Transportation Research Board of the National Academies (TRB), 2010. Highway Capacity Manual. ISBN 978-0-309-16077-3.
- TRL, 2014
TRL, 2014. SCOOT, Advise Leaflet 1: The “SCOOT” Urban Traffic Control System.
http://www.scoot-utc.com/documents/1_SCOOT-UTC.pdf. Tilgået den 6. april 2017.
- Trængselskommissionen, 2013
Trængselskommissionen, 2013. Reduktion af trængsel og forurening samt modernisering af infrastrukturen i hovedstadsområdet – Idékatalog. ISBN 978-87-91511-41-7.
- Vejdirektoratet, 2006
Vejdirektoratet, 2006. Trafiktællinger – Planlægning, udførelse og efterbehandling. Vejdirektoratet, Vej- og trafikområdet. ISBN 87-7923-877-7.
- Vejdirektoratet, 2012a
Vejdirektoratet, 2012. Konsekvenser for trafikanter og samfund – Bedre

- trafiksignaler. Vejdirektoratet. ISBN: 9788770606721.
- Vejdirektoratet, 2012b
Vejdirektoratet, 2012. Håndbog – Signalregulerede vejkryds i åbent land.
<http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=signalregulerede+kryds+i+%C3%A5bent+land&docId=vd-anlaeg-kryds-signal-full>. Tilgået 3. maj 2017.
- Vejdirektoratet, 2013a
Vejdirektoratet, 2013. Håndbog – Vejsignaler.
<http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=vejsignaler&docId=vd-anlaeg-signal-vej2013-full>. Tilgået 8. maj 2017.
- Vejdirektoratet, 2013b
Vejdirektoratet, 2013. Håndbog – Vejsignaler (bilag).
<http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=vejsignaler+bilag&docId=vd-anlaeg-signal-vejbilag2013-full>. Tilgået 17. april 2017.
- Vejdirektoratet, 2017
Vejdirektoratet, 2017. Nøgletal om vejtransport.
- http://vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/statistik/trafikken%20i%20tal/Noegletal_om_vejtransport/Sider/default.aspx. Tilgået 10. marts 2017.
- Vejregelrådet, 2010
Vejregelrådet, 2010. Anvendelse af mikrosimuleringsmodeller.
<http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=vissim&docId=vd-20101203132000185-full>. Tilgået 9. maj 2017.
- VK-regeringen, 2008
VK-regeringen, 2008. Bæredygtig transport – bedre infrastruktur. Statsministeriet.
http://www.stm.dk/multimedia/B_redygtig_transport_-_bedre_infrastruktur.pdf. Tilgået 2. maj 2017.
- Vägverket, 2004
Vägverket, 2004. Vägar och gators utformning - trafiksignaler.
http://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga_och_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument_vag_och_gatuutformning/Vagar_och_gators_utformning/Trafiksignaler/01_trafiksignaler_lasanvisning.pdf. Tilgået 23. februar 2017.
- Wang et al., 2013
Wang, S., Huang, A., Zhang, T., 2013. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for V2V Communication in VANET. International Conference on Computational and Information Sciences, 21.-23. juni 2013. Shiyang, Kina.
- Westhausen, 2017
Westhausen, B., 2017. Forbedret trafikstyring i trafiksignalanlæg. Webinar, ITS Danmark.
<http://itsdanmark.dk/files/webinar/2017050415.01forbedrettrafikstyringitrafiksignalanlg.mp4>. Tilgået 18. maj 2017.
- Xu et al., 2009
Xu, Z., Zhao, X., Li, N., 2009. Novel Vehicle Detection System Based on Line Scan Camera. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 16.18. august, 2009. Beijing, Kina.
- Yang et al., 2016
Yang, H., Rakha, H., Ala, M., V., 2016. Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control at Signalized Intersections Considering Queue Effects. IEEE Transactions on Intelligent

Transportation Systems. 13. Oktober, 2016. ISSN: 1558-0016.

Yun et al., 2007

Yun, I., Best, M., Park, B., 2007. Evaluation of Adaptive Maximum Feature in Actuated Traffic Controller: Hardware-in-the-Loop Simulation. I; Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, side 134-140.

Zengzeng et al., 2016

Zengzeng, G. et al, 2016. Research on the health index of the inductive loop wire in a freeway lane. Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 11.-12. marts 2016. Macau, Kina.

Zhou et al., 2016

Zhou, M., Qi, L., Luan, W., 2016. Impact of Driving Behavior on Traffic Delay at a Congested Signalized Intersection. I; IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, side 1-12.

Aalborg Kommune, 2017

Aalborg Kommune, 2017. Signalarkivet – Aalborg Kommune.

Aalborg Universitets hospital, 2017

Aalborg Universitetshospital, 2017. Nøgletal.

[http://www.aalborguh.rm.dk/Genveje/Om-Aalborg-](http://www.aalborguh.rm.dk/Genveje/Om-Aalborg-Universitetshospital/noegletal)

[Universitetshospital/noegletal](http://www.aalborguh.rm.dk/Genveje/Om-Aalborg-Universitetshospital/noegletal). Tilgået 18. maj 2017.

A Litteratur- studie

På baggrund af den systematiske litteratursøgning er der lavet en overordnet sammenfatning, som fremgår af tabel A.1, som udgør de følgende sider. Det indgående materiale dækker over artikler, webinarer samt produktbrochure, som har været indgående. Internetsider, håndbøger og deslignende er ikke inkluderet i in-

deværende appendiks, da disse ikke kræver yderligere forklaring og blot indgår som reference i rapporten, samt i litteraturlisten.

Titel	Resumé
Adaptiv signalstyring i Aalborg – effekt på trafikafviklingen [Agerholm, 2013]	Artikel beskriver anvendelsen af den adaptive signalstyring SPOT på Østre Allé i Aalborg samt resultaterne af denne styreform. Overordnet set viser resultaterne at SPOT generelt forbedre rejsetiden. Dog viser resultaterne at rejsetiden om morgenen og til middag forværres i vestlig retning.
Adaptive Network Control Sitraffic Motion MX [Siemens, 2013]	Produktbrochuren redegør overordnet formålet for den adaptive signalstyring, MOTION, og hvordan systemet realiserer denne signalstyring. Derudover fremlægges flere resultater, som viser en effekt.
An Algorithm for Identifying Red Light Runners from Radar Trajectory Data [Sarabi & Abbas, 2015]	Artiklen sætter fokus på dilemmazoneproblematikken, hvor antallet af trafikanterne som fanges i denne zone ønskes minimeret ved at forlænge grøntiden. Der arbejdes med en algoritme, som kan adskille ligeudkørende fra højresvingende bilister. Til detektering anvendes radarer mens video detektering anvendes belyse antallet er rødkørsler.
An Approach to Traffic Flow Detection Improvements of Non-Contact Microwave Radar Detectors [Ho & Chung, 2016]	Studiet omhandler forbedringer af traditionel radardetektering på flersporede veje, hvor der tidligere har været problemer med overestimering af antallet af køretøjer. Således præsenteres en metode, som afhjælper problemerne og derfor betegnes som en betydelig forbedring sammenholdt med traditionel radardetektering.
Automatic detection of vehicles at road intersections using a compact 3D Velodyne sensor mounted on traffic signals [Aijazi et al., 2016]	I artiklen fokuseres der detektering af køretøjer i realtid, da sådanne informationer er vigtige såfremt trafikafviklingen skal forbedres. Derfor testes en 3D Velodyne sensor, som anvender LIDAR-teknologi. Resultaterne af sensoren viser ikke kun præcision men også at denne er anvendelig til detektering af trafik i realtid.
Compass 4D - EU ITS-projekt om kommunikation mellem køretøjer og infrastruktur [Københavns Kommune, 2015]	Artiklen redegør for det fælleseuropæiske C-ITS projekt Compass4D og hvilke erfaringer, der er gjort efter implementeringen af enheder i blandt andet busser. Via enheden modtager chaufføren relevante informationer om eksempelvis tid til grønt, den tilladte hastighed, eller hvorvidt der er krydsende fodgængere ved kommende fodgængerfelt.

Titel	Resumé
Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control at Signalized Intersections Considering Queue Effects [Yang et al., 2016]	I artiklen belyses en adaptive signalstyring på en strækning mere flere signalregulerede kryds. Formålet er at realisere end mere brændstoføkonomisk kørsel. Der er udviklet en algoritme til estimering af optimal kørsel i henhold til brændstofforbrug. Resultaterne viser, at der kan realiseres brændstofbesparelser på op til 40 %.
Genetic algorithm based signal optimizer for oversaturated urban signalized intersection [Tan et al., 2016]	Artiklen omhandler adaptiv signalstyring, hvor der anvendes en algoritme, som tilstræber at afvikle trafikken mere effektivt og derved reducere middelforsinkelsen i kryds hvor den trafikale efterspørgsel overstiger krydsets kapacitet. Selvom adaptiv signalstyring tidligere er beskrevet i litteraturen, er styreformen i mange tilfælde testet i signalregulerede kryds, hvor kapacitetsgrænsen endnu ikke er nået. Resultaterne viser, at algoritmen er i stand til at optimere trafikafviklingen og minimere middelforsinkelsen.
Impact of Driving Behavior on Traffic Delay at a Congested Signalized Intersection [Zhou et al., 2016]	Artiklen foreslår en metode til at kategorisere trafikanters adfærd i signalregulerede kryds med kapacitetsproblemer. Der arbejdes således med to typer trafikantadfærd, hvor den ene " køskabende-adfærd", som resultere i yderligere kødannelse. Den anden er "Ikke-køskabende-adfærd", hvor trafikanter ikke kører ud i et kryds, såfremt dette ikke kan rømmes.
Integrated Real-Time Data Collection and Safety Improvement System at Signalized Intersections [Abbas et al., 2014]	Artiklen sætter fokus på integrerede realtidsdata, som kan anvendes til at forbedre trafiksikkerheden i signalregulerede kryds. Dette gøres ved at indsamle data i realtid ved anvendelse af video og radar, som kan anvendes til at beregne ETA og reducerer antallet af bilister som havner i dilemmazonen.
Integration mellem WiFi og radar [Andersen, 2016]	På webinaret præsenteres en form for detektering, som kombinere flere forskellige teknologier på strækninger. Tidligere har Bluetooth og WiFi været anvendt. Dog er ulempen, at der ved denne teknologi detekteres omkring 20-30 % af trafikanterne. Dertil kan der ikke skelnes mellem de enkelte kørespor, og teknologien kan heller ikke klassificere trafikken. Derfor kombineres bluetooth og WiFi med radardetektering, hvilket betyder at produktet kan anvendes til køvarsling, beregning af rejsetider i de enkelte kørespor, variabel hastighed mm.
Intelligent detektering i trafiksignaler [Jakobsen, 2015]	Webinaret sætter fokus på radardetektering som alternativ til videodetektering og traditionelle induktionsspoler. Dette gøres, da induktionsspoler kan påvirkes af sporkøring og gravearbejder, mens video er følsom overfor lys- og vejforhold. Radaren har ikke disse u hensigtsmæssigheder og er derved mere pålidelig. Derudover introduceres også en ETA-funktion, som estimere et køretøjs tid til ankomst, hvilket har en sikkerhedsmæssig effekt. Dertil giver den mere korrekte forlængelser, hvilket forbedre fremkommeligheden.

Titel	Resumé
Maximum Green Time Settings for Traffic-Actuated Signal Control at Isolated Intersections Using Fuzzy Logic [Shiri & Maleki, 2016]	Artiklen omhandler trafikstyrede signalanlæg uden samordning, hvor grøntiden typisk er bestemt af den detekterede trafik. Der er dog oftest en fast maksimal grøntid, som bevirker, at der ikke kan ske yderligere grøntidsforlængelser. Da dette vurderes at forringe trafikafviklingen introduceres en dynamisk maksimal grøntid, hvorved den maksimale grøntid kan variere mellem de respektive omløb. Resultaterne viser, at trafikafviklingen forbedres ved at gøre op med et traditionelt princip om en fast maksimal grøntid.
Miljøstyret trafik uden afgifter [Krøyer, 2008]	I stedet for at pålægge trængselsafgifter belyser artiklen alternativer. Dette er blandt andet adaptiv signalstyring, som er testet flere steder i Danmark. Resultaterne heraf viser at denne styringsform på udvalgte lokaliteter har reduceret antallet af stop og mindsket forsinkelsen mens rejsehastigheden er øget.
Novel Vehicle Detection System Based on Line Scan Camera [Xu et al., 2009]	Artiklen sætter fokus på videodetektering og redegør for nogle af de problemstillinger der relaterer sig til anvendelsen af video, herunder ugunstige lys- og vejforhold. Derfor er der udviklet en ny metode, hvor der foretages vertikale optagelser, hvilket forbedrer præcisionen og afhjælper problemerne med lys- og vejforhold.
Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister [Knudsen & Jakobsen, 2013]	Artiklen omhandler detektering med radar, som har en lang række fordele, herunder detektering i op til 240 m fra krydset, ikke lys- og vejafhængig samt introduktionen af ETA-funktionen. Radaren er testet i forhold til detektering med induktionsspoler og resultaterne viser, at der er god overensstemmelse mellem de to detekteringsteknologier. Radaren forventes således at kunne erstatte induktionsspolen, da denne detekteringsteknologi giver hidtil usete muligheder.
Platoon-Based Multi-Agent Intersection Management for Connected Vehicle [Barth et al., 2013]	Artiklen beskriver hvordan trafikafviklingen kan forbedres i signalregulerede kryds via platooning, som tillader køretøjer at indgå i en kolonne som realiseres via V2V kommunikation. Sammenholdt med et traditionelt signalanlæg kan rejsetiden reduceres med op til 30 % ved at realisere platooning.
Platooning at Traffic Lights A microscopic simulation study [Günther, 2016]	I artiklen præsenteres en regelbaseret algoritme, som realiserer platooning via V2V kommunikation. Dette gør at accelerationen sker simultant, hvorved kapaciteten i krydset forbedres. Det påpeges dog, at en betydelig del af køretøjerne skal besidde V2V teknologien for at øge kapaciteten.
Real time performance measures from radar-based vehicle detection systems [Santiago-Chaparro et al., 2012]	Artiklen omhandler trafikale registreringer i signalregulerede kryds i realtid. Disse registreringer giver værdifuld data, som benyttes af eksempelvis vejmyndigheder, der administrerer det signalregulerede kryds. Registreringer af forsinkelse og kølængde betragtes som målbare parametre og kan således medvirke til at realisere en bedre trafikafvikling i krydset. I artiklen præsenteres monitoreringen af køretøjer via radar, hvor forsinkelsen bestemmes og fortæller om signalanlæggets serviceniveau i realtid. Data uploades til internettet og kan ses af eksempelvis vejmyndighed.

Titel	Resumé
Real-time estimation of turning movement counts at signalized intersections using signal phase information [Ghods & Fu, 2014]	Artiklen påpeger at forskellige detekteringsteknologier i dag primært anvendes i tilfartssporene i de signalregulerede kryds, hvor de færreste er i stand til at detektere retningsfordelingen inde i selve krydset. Det konstateres endvidere, at præcise realtidsdata er en nødvendighed for eksempelvis signalregulerede kryds med en adaptiv signalstyring. Der introduceres således en metode, som med høj præcision kan estimere retningsfordelingen i et signalreguleret kryds og derved kan implementeres i virkeligheden.
Research on the health index of the inductive loop wire in a free-way lane [Zengzeng et al., 2016]	Artiklen belyser uhensigtsmæssighederne ved induktionsspolen, som siden starten af 1960'erne har været den mest anvendte detektor til registrering af trafik. Der introduceres således et tilstandsindex, som beskriver induktionsspolen tilstand, så eksempelvis deformationers påvirkning på induktionsspolen funktion opdages i et tidligt stadie.
RUBA – Videoanalyseprogram til trafikanalyser [Madsen et al., 2016]	Artiklen beskriver hvordan RUBA som videoanalyseværktøj kan anvendes til at analysere trafik på baggrund af videooptagelser. Programmet tillader således at der oprettes forskellige detekteringszoner i videoen som derved automatisk registrere trafikanterne ud fra opstillede kriterier.
SCOOT – Advice Leaflet 1 [TRL, 2014]	Produktbrochuren redegør overordnet formålet for den adaptive signalstyring, SCOOT, og hvordan systemet realiserer denne signalstyring. Derudover fremlægges flere resultater, som viser en effekt.
Traffic Light Assist [SWARCO, 2015]	Webinaret sætter fokus på at forbedre fremkommeligheden via V2I kommunikation, hvor køretøjer og infrastruktur kan kommunikere. Med denne kommunikation er det muligt at få oplysninger om resterende grøntid, hvorefter der beregnes en vejledende hastighed frem mod krydset. Derved forventes trafikafviklingen at foregå mere glidende og derved reduceres antallet af stop, reduceres brændstofforbrug og forbedre fremkommeligheden.
Urban Arterial Traffic Two-direction Green Wave Intelligent Coordination Control Technique and Its Application [Kong et al., 2011]	Artiklen omhandler adaptiv signalstyring, som anvendes i forbindelse med en strækning, hvor der tilstræbes dobbeltrettet grøn bølge. Der anvendes historisk data og realtidsdata til beregning af blandt andet offset-tid mellem strækningens respektive kryds. Resultaterne viser, at rejsetiden og antallet af stop kan reduceres.
Uppaal Stratego for Intelligent Traffic Lights [Eriksen et al., 2017]	Artiklen omhandler en mere moderne form for adaptiv signalstyring, som anvender radarer i kombination med maskinlæring via Uppaal Stratego, som er en matematisk optimeringsmodel.
Vehicle-to-Infrastructure Communication Based Eco-Driving Operation at Multiple Signalized Intersections [Lin et al., 2016]	Artiklen belyser hvordan V2I kommunikation kan medvirke til at reducere brændstofforbrug og derved også miljøskadelige udledningssgasser. Infrastrukturen skal være online således at eksempelvis den skilte hastighed og signalanlægets omløbs-, grøn- og mellemtider kan kommunikeres ud til køretøjerne, som derved kan foretage en brændstoføkonomisk kørsel.

Tabel A.1: Sammenfatning af materiale, som har været indgående i den systematiske litteraturgennemgang.

B Trafik- tællinger

Indeværende appendiks indeholder de detaljerede krydstællinger. Tabeloversigt fremgår af tabel B.1.

Kryds	Tabeller
Hobrovej / Østre Allé	B2, B3, B4, B5
Hobrovej / Søndre Skovvej	B6, B7, B8
Hobrovej / Mølleparkvej	B9, B10, B11
Hobrovej / Ny Kærvej	B12, , B13, B14, B15
Hobrovej / Provstejorden	B16, B17, B18
Hobrovej / Over Kæret	B19, B20, B21, B22

Tabel B.1: Tabeloversigt.

Hobrovej, Syd	Fra	Til	Person- /varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/ KN45			Total
			V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
	07:00	07:15	22	72	39	1	0	5	1	0	1	0	0	1	142
	07:15	07:30	32	113	61	0	2	9	0	0	0	1	2	0	220
	07:30	07:45	79	136	79	0	3	10	0	0	1	0	1	0	309
	07:45	08:00	78	150	83	0	3	10	0	1	0	0	0	1	326
	08:00	08:15	66	136	75	1	0	8	0	1	1	0	0	0	288
	08:15	08:30	55	116	49	1	1	7	0	0	1	1	0	0	231
	08:30	08:45	38	94	38	2	0	5	0	1	1	0	0	0	179
	08:45	09:00	51	109	47	1	2	8	0	1	1	1	0	0	221

Figur B.2: Data fra Hobrovej (syd) i krydset Hobrovej / Østre Allé.

Østre Allé	Fra	Til	Person- /varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/ KN45			Total
			V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
	07:00	07:15	98	55	46	10	4	1	1	0	0	0	0	0	215
	07:15	07:30	110	58	50	6	2	4	0	0	0	1	0	0	231
	07:30	07:45	101	101	75	9	2	1	0	0	0	0	0	1	290
	07:45	08:00	89	104	83	10	2	1	0	0	0	0	1	0	290
	08:00	08:15	87	125	62	9	4	2	0	0	0	0	0	0	289
	08:15	08:30	106	87	63	10	4	2	0	0	0	0	0	0	272
	08:30	08:45	76	84	57	8	1	1	1	0	1	0	0	0	229
	08:45	09:00	53	78	44	6	2	0	0	0	0	0	1	0	184

Figur B.3: Data fra Østre Allé i krydset Hobrovej / Østre Allé.

Vesterbro	Fra	Til	Person- /varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/ KN45			Total
			V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
	07:00	07:15	25	105	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	134
	07:15	07:30	35	140	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	181
	07:30	07:45	75	125	5	3	0	0	0	1	0	1	1	0	211
	07:45	08:00	74	157	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	237
	08:00	08:15	66	155	10	0	1	0	0	0	0	0	1	0	233
	08:15	08:30	46	130	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	180
	08:30	08:45	38	101	1	3	2	0	0	0	0	0	0	0	145
	08:45	09:00	35	117	2	1	6	0	0	1	0	0	0	0	162

Figur B.4: Data fra Vesterbro i krydset Hobrovej / Østre Allé.

Kong Chr. Allé		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	1	50	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
07:15	07:30	6	87	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157
07:30	07:45	12	115	56	0	0	1	0	0	0	0	0	1	185
07:45	08:00	7	120	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	210
08:00	08:15	10	128	56	0	1	0	0	1	0	0	0	0	196
08:15	08:30	6	79	39	0	3	0	0	0	0	0	1	0	128
08:30	08:45	1	71	35	0	0	0	0	1	0	0	0	0	108
08:45	09:00	4	56	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88

Figur B.5: Data fra Kong Chr. Allé i krydset Hobrovej / Østre Allé.

Hobrovej, Nord		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	0	183	55	0	12	1	0	2	0	0	0	0	253
07:15	07:30	0	225	69	0	7	0	0	0	0	0	0	0	301
07:30	07:45	0	251	54	0	14	0	0	0	0	0	0	0	319
07:45	08:00	0	259	61	0	9	1	0	0	0	0	1	0	331
08:00	08:15	0	219	48	0	10	0	0	0	0	0	0	0	277
08:15	08:30	0	205	55	0	11	0	0	0	0	0	0	1	272
08:30	08:45	0	198	57	0	8	0	0	0	0	0	0	0	263
08:45	09:00	0	192	49	0	10	0	0	0	0	0	0	0	251

Figur B.7: Data fra Hobrovej (nord) i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

Søndre Skovvej		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	19	0	8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	28
07:15	07:30	35	0	5	1	0	1	0	0	0	0	0	0	42
07:30	07:45	46	0	15	2	0	1	0	0	0	0	0	0	64
07:45	08:00	25	0	16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	43
08:00	08:15	28	0	8	0	0	2	0	0	0	0	0	0	38
08:15	08:30	16	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
08:30	08:45	20	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
08:45	09:00	14	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24

Figur B.6: Data fra Søndre Skovvej i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

Hobrovej, Syd		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	15	131	0	0	8	0	0	1	0	0	0	0	155
07:15	07:30	24	215	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	251
07:30	07:45	22	288	0	0	13	0	0	2	0	0	0	0	325
07:45	08:00	24	307	0	0	10	0	0	2	0	0	0	0	343
08:00	08:15	31	185	0	0	13	0	0	1	0	0	1	0	231
08:15	08:30	22	237	0	0	12	0	0	2	0	0	0	0	273
08:30	08:45	20	220	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	252
08:45	09:00	20	226	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	259

Figur B.8: Data fra Hobrovej (syd) i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

Mølleparkvej		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	16	0	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	40
07:15	07:30	25	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68
07:30	07:45	30	0	32	1	0	0	0	0	0	0	0	0	63
07:45	08:00	52	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77
08:00	08:15	21	0	24	1	0	0	0	0	0	1	0	0	47
08:15	08:30	19	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41
08:30	08:45	21	0	23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	45
08:45	09:00	23	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46

Figur B.10: Data fra Mølleparkvej i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

Hobrovej, nord		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	0	126	53	0	11	1	0	0	0	0	0	0	191
07:15	07:30	0	156	80	0	8	1	0	0	0	0	1	0	246
07:30	07:45	0	209	61	0	10	2	0	0	0	0	0	0	282
07:45	08:00	0	200	56	0	8	1	0	0	0	0	0	0	265
08:00	08:15	0	198	48	0	9	0	0	0	0	0	1	0	256
08:15	08:30	0	167	34	0	10	2	0	0	0	0	2	0	215
08:30	08:45	0	143	25	0	9	1	0	0	0	0	1	0	179
08:45	09:00	0	154	22	0	9	0	0	0	0	0	1	0	186

Figur B.9: Data fra Hobrovej (nord) i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

Hobrovej, Syd		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	70	135	0	0	4	0	0	1	0	0	0	0	210
07:15	07:30	87	230	0	0	8	0	0	1	0	0	0	0	326
07:30	07:45	67	278	0	1	13	0	0	2	0	0	0	0	361
07:45	08:00	68	267	0	0	8	0	0	2	0	0	0	0	345
08:00	08:15	49	222	0	0	13	0	0	1	0	0	0	0	285
08:15	08:30	67	215	0	0	11	0	0	2	0	0	0	0	295
08:30	08:45	39	198	0	0	6	0	0	1	0	0	0	0	244
08:45	09:00	33	174	0	0	10	0	0	1	0	0	0	0	218

Figur B.11: Data fra Hobrovej (syd) i krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

Ny Kærvej		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	25	30	43	0	1	1	0	0	0	0	0	0	100
07:15	07:30	12	38	48	1	4	0	0	0	0	0	0	0	103
07:30	07:45	37	48	49	0	0	0	1	0	0	1	0	0	136
07:45	08:00	34	69	56	0	0	2	0	0	0	0	1	0	162
08:00	08:15	26	54	65	0	2	0	0	0	0	0	0	1	148
08:15	08:30	20	36	27	1	1	1	0	0	0	0	0	1	87
08:30	08:45	7	29	23	1	0	0	0	0	0	2	0	1	63
08:45	09:00	13	29	28	0	2	1	0	0	0	0	1	1	75

Figur B.12: Data fra Ny Kærvej i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Hobrovej, Syd		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	9	180	28	0	4	1	0	1	0	0	0	0	223
07:15	07:30	12	230	34	0	8	0	0	1	0	0	1	0	286
07:30	07:45	28	291	47	0	11	0	0	1	1	0	0	0	379
07:45	08:00	30	299	63	0	8	0	0	0	0	0	0	0	400
08:00	08:15	25	212	34	0	10	0	0	0	0	0	0	0	281
08:15	08:30	11	189	28	0	5	0	0	0	0	0	0	0	233
08:30	08:45	22	199	25	0	6	0	0	0	0	0	0	0	252
08:45	09:00	8	163	24	0	7	0	0	0	0	0	0	0	202

Figur B.14: Data fra Hobrovej (syd) i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Vestre Allé		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	13	31	17	3	0	1	1	1	0	0	0	0	67
07:15	07:30	19	49	28	1	1	0	0	0	0	0	0	0	98
07:30	07:45	28	85	21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	136
07:45	08:00	37	88	24	2	2	0	0	0	0	0	0	0	153
08:00	08:15	21	66	24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	112
08:15	08:30	13	38	13	2	1	1	0	0	0	0	0	0	68
08:30	08:45	20	35	12	2	0	1	0	0	0	0	0	0	70
08:45	09:00	13	29	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	52

Figur B.13: Data fra Vestre Allé i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Hobrovej, Nord		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	17	116	5	1	7	1	0	4	0	0	0	0	151
07:15	07:30	25	139	8	1	5	2	0	1	0	0	0	0	181
07:30	07:45	32	165	14	2	9	2	0	2	0	1	3	0	230
07:45	08:00	38	189	12	2	7	3	0	1	0	0	1	0	253
08:00	08:15	34	151	7	1	8	4	0	0	0	0	2	0	207
08:15	08:30	35	163	10	1	10	2	0	1	0	0	1	0	223
08:30	08:45	19	117	15	1	4	3	0	0	0	0	0	1	160
08:45	09:00	13	107	11	0	6	1	0	0	2	0	0	0	140

Figur B.15: Data fra Hobrovej (nord) i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Hobrovej, Nord		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	3	141	0	1	7	0	0	1	0	0	0	0	153
07:15	07:30	12	167	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	183
07:30	07:45	7	233	0	0	8	0	0	1	0	0	1	0	250
07:45	08:00	7	223	0	0	4	0	0	2	0	0	0	0	236
08:00	08:15	6	201	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	212
08:15	08:30	5	169	2	0	6	0	0	1	0	0	0	0	183
08:30	08:45	4	157	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	166
08:45	09:00	5	152	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	163

Figur B.16: Data fra Hobrovej (nord) i krydset Hobrovej / Provstejorden.

Provstejorden		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	7	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
07:15	07:30	11	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
07:30	07:45	16	0	15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	32
07:45	08:00	12	0	8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	21
08:00	08:15	5	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
08:15	08:30	8	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	13
08:30	08:45	5	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
08:45	09:00	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7

Figur B.18: Data fra Provstejorden i krydset Hobrovej / Provstejorden.

Hobrovej, Syd		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	1	214	5	0	4	0	0	5	0	0	1	0	230
07:15	07:30	0	301	9	0	8	1	0	2	1	0	3	0	325
07:30	07:45	0	376	3	0	11	0	0	2	0	0	0	0	392
07:45	08:00	0	344	4	0	7	0	0	1	0	0	0	0	356
08:00	08:15	1	268	0	0	7	2	0	2	0	0	1	0	281
08:15	08:30	1	209	2	0	6	0	0	3	0	0	1	0	222
08:30	08:45	0	205	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	209
08:45	09:00	0	195	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	198

Figur B.17: Data fra Hobrovej (Syd) i krydset Hobrovej / Provstejorden.

Hobrovej, Nord		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	20	108	16	0	8	0	0	0	0	0	0	0	152
07:15	07:30	20	110	24	0	2	0	0	0	0	0	0	0	156
07:30	07:45	23	166	43	0	3	1	0	1	0	0	0	0	237
07:45	08:00	23	186	45	0	5	2	0	3	0	0	0	0	264
08:00	08:15	24	178	56	0	5	0	0	2	0	0	0	0	265
08:15	08:30	22	112	46	0	5	0	0	1	0	0	0	0	186
08:30	08:45	18	125	31	0	5	0	0	1	0	0	1	0	181
08:45	09:00	22	114	21	0	4	0	0	0	0	0	0	0	161

Figur B.19: Data fra Hobrovej (nord) i krydset Hobrovej / Skelagervej.

Over Kæret		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	48	46	18	1	2	0	1	0	0	0	0	0	116
07:15	07:30	57	80	27	0	3	0	1	0	0	0	0	0	168
07:30	07:45	70	89	38	2	3	1	1	0	0	0	0	0	204
07:45	08:00	72	81	26	0	1	0	0	0	0	0	0	0	180
08:00	08:15	69	80	23	1	2	0	1	0	0	0	0	0	176
08:15	08:30	79	108	25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	213
08:30	08:45	40	54	26	1	3	0	0	0	0	0	0	0	124
08:45	09:00	45	64	23	0	2	0	0	0	0	0	0	0	134

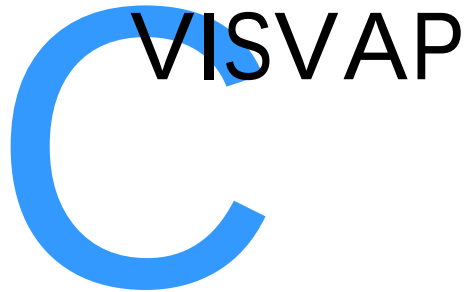
Figur B.21: Data fra Over Kæret i krydset Hobrovej / Skelagervej.

Hobrovej, syd		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	67	175	51	1	8	0	2	2	2	0	0	0	308
07:15	07:30	105	266	84	0	13	2	0	2	1	0	0	1	474
07:30	07:45	105	319	107	1	11	1	0	1	1	0	0	0	546
07:45	08:00	117	293	118	0	3	0	0	1	0	0	0	0	532
08:00	08:15	126	260	91	1	4	0	3	1	0	1	1	0	488
08:15	08:30	99	186	55	1	3	1	2	2	0	0	0	0	349
08:30	08:45	40	174	44	0	6	1	2	1	1	0	0	1	270
08:45	09:00	56	166	46	1	3	0	1	0	0	0	0	0	273

Figur B.20: Data fra Hobrovej (syd) i krydset Hobrovej / Skelagervej.

Skelagervej		Person-/varebil			Lastbil/bus			Lastbil m. påh./sætte.			Motorcykel/KN45			Total
Fra	Til	V	L	H	V	L	H	V	L	H	V	L	H	
07:00	07:15	17	31	45	0	3	1	0	1	2	0	0	0	100
07:15	07:30	25	65	70	0	3	0	0	0	1	0	0	0	164
07:30	07:45	21	70	81	0	3	0	0	0	0	0	0	0	175
07:45	08:00	14	82	66	1	2	1	0	1	1	0	0	0	168
08:00	08:15	21	64	59	2	3	0	0	0	1	0	0	0	150
08:15	08:30	14	53	45	0	4	1	0	0	0	0	0	0	117
08:30	08:45	20	58	26	0	1	1	0	1	0	0	0	0	107
08:45	09:00	16	42	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88

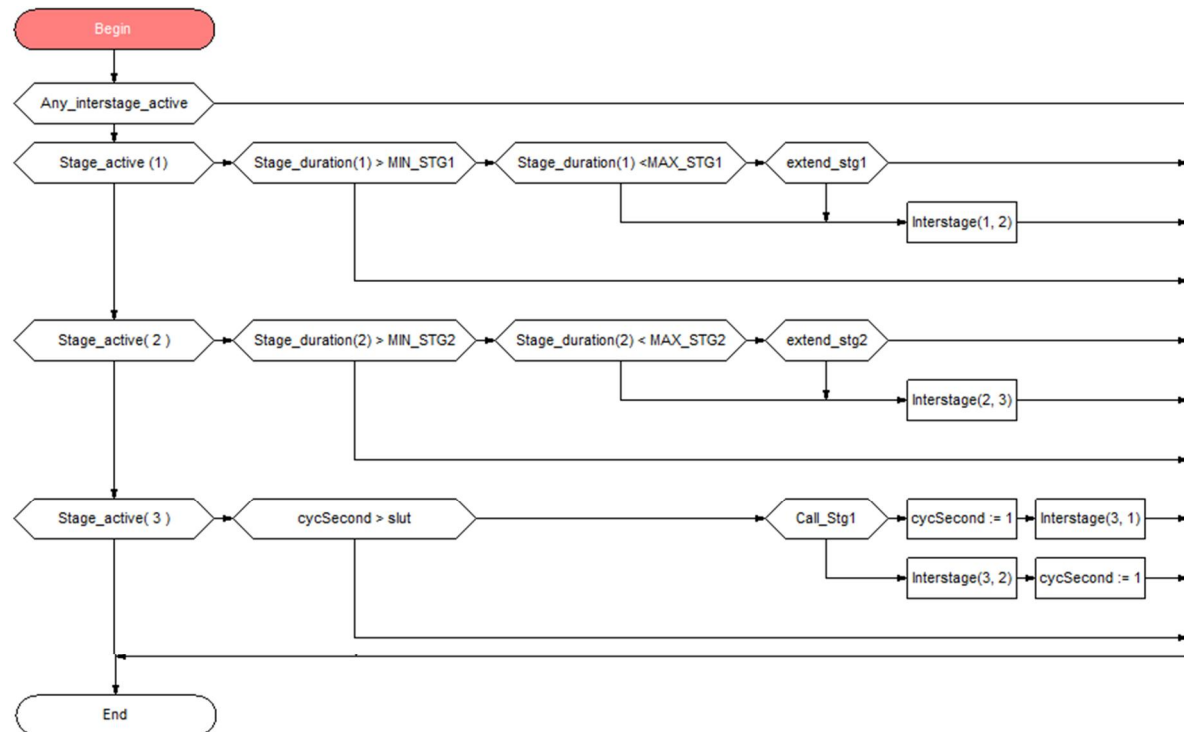
Figur B.22: Data fra Skelagervej i krydset Hobrovej / Skelagervej.



I VISSIM anvendes VISVAP i forbindelse med trafikstyring. Da de fire indgående kryds på strækning helt eller delvist er trafikstyret anvendes VISVAP til at modellere dette. Selve modelleringen sker efter signalprogrammerne, som fremgår af kapitel 3 på side startende på side 35. Modelleringen i VISVAP er forholdsvis kompliceret, hvorfor det kommende umiddelbart forudsætter en vis form for indsigt i programmet.

Helt lavpraktisk er den enkelte trafikstyring opbygget er en serie af hvis-sætninger og handlinger. Såfremt svaret på et givent spørgsmål er nej, tages et skridt ned. Er svaret på spørgsmålet ja tages et skridt til højre.

På figur C.1 er trafikstyring i krydset Hobrovej / Mølleparkvej vist i VISVAP. Det første spørgsmål er, hvorvidt der er et igangværende faseskift. Såfremt svaret er nej, tages et skridt ned. Her er spørgsmålet om fase 1



Figur C.1: Trafikstyringen af det signalregulerede kryds Hobrovej / Mølleparkvej i VISSIM.

er aktiv. Såfremt dette er tilfældet tages et skridt til højre. Herefter et spørgsmål om tiden fase 1 har været aktiv er større end minimum grøntiden. Såfremt dette er tilfældet spørges, hvorvidt tiden fase 1 har været aktiv er mindre end maksimum grøntiden. Såfremt dette er tilfældet tages et skridt til højre. Efterfølgende er spørgsmålet, om der er anmeldelser på de ind-

lagte spoler. Såfremt svaret er nej tages et skridt ned, hvor et faseskift fra fase 1 til fase 2 effektueres. Diagrammet gennemgås 1 gang pr sekund under simuleringerne.

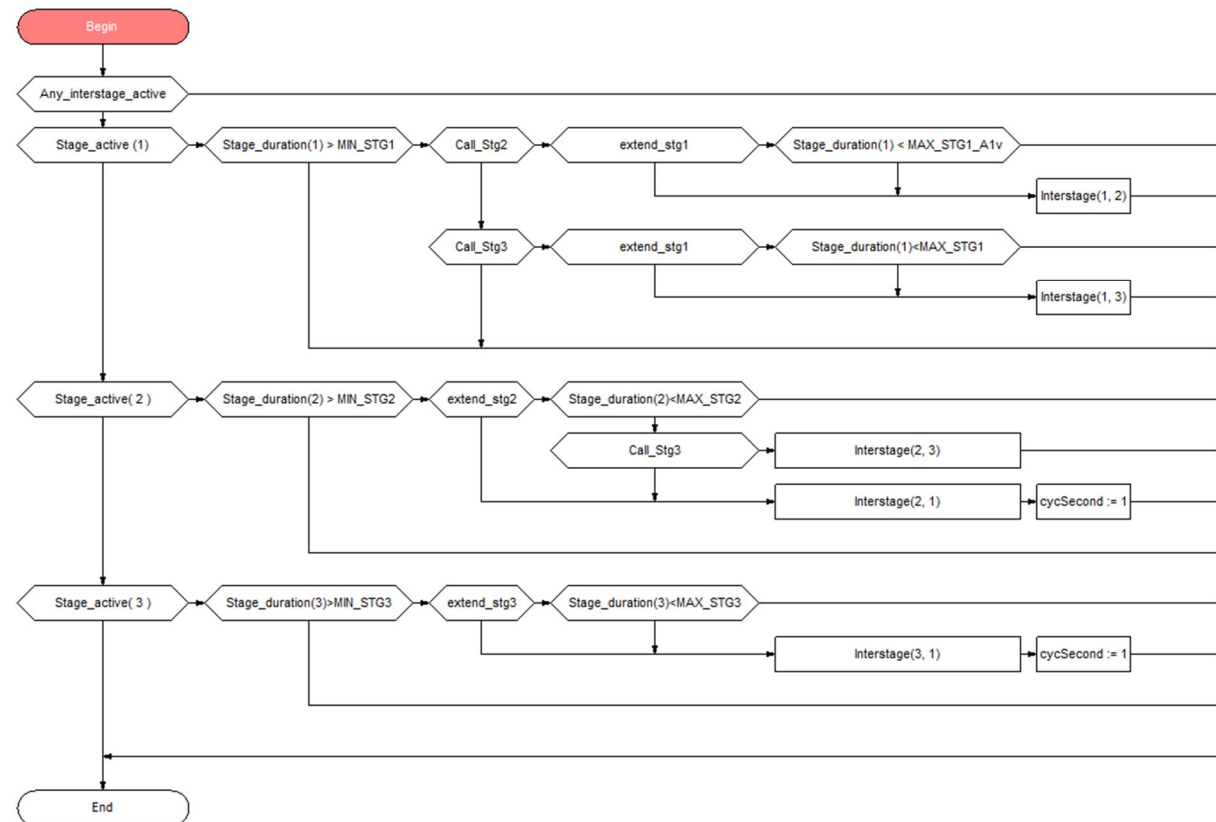
Fase 1 er venstresvingsfasen på Hobrovej, hvor der også er grønt for den nordgående trafik. Fase 2 er grønt fra Mølleparkvej, mens fase 3 er grønt på Hobrovej.

På figur C.2 fremgår den modellerede trafikstyring af det signalregulerede kryds ved Hobrovej / Søndre Skovvej. Fremgangsmåde er den samme, mens der er flere muligheder for forlængelser, da der både er placeret spoler på Hobrovej og Søndre Skovvej.

Fase 1 er grønt på Hobrovej

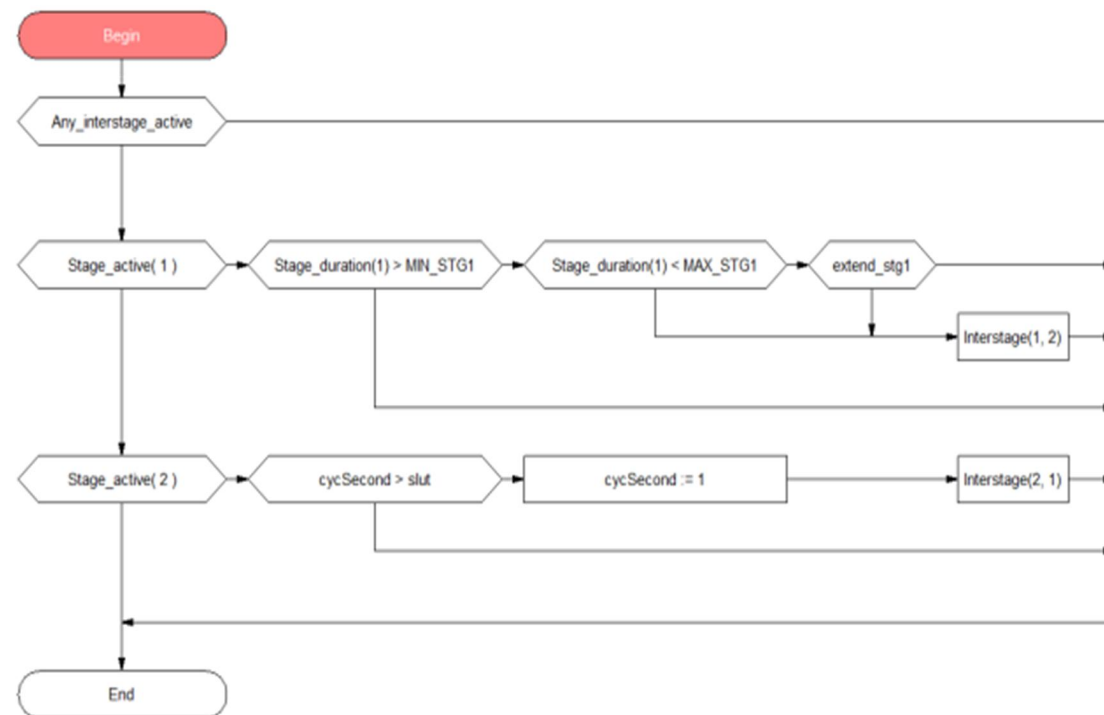
Fase 2 er venstresvingsfasen på Hobrovej, hvor der også er grønt for den nordgående trafik på Hobrovej.

Fase 3 er grønt fra Søndre Skovvej.



Figur C.2: Trafikstyringen af det signalregulerede kryds Hobrovej / Søndre Skovvej i VISSIM.

På figur C.3 fremgår den modellerede trafikstyring af det signalregulerede kryds ved Hobrovej / Provstejorden. Der er kun 2 mulige faser i krydset: grønt fra Provstejorden eller grønt på Hobrovej, henholdsvis gase 1 og 2.



Figur C.3: Trafikstyringen af det signalregulerede kryds Hobrovej / Provstejorden i VIS-SIM.

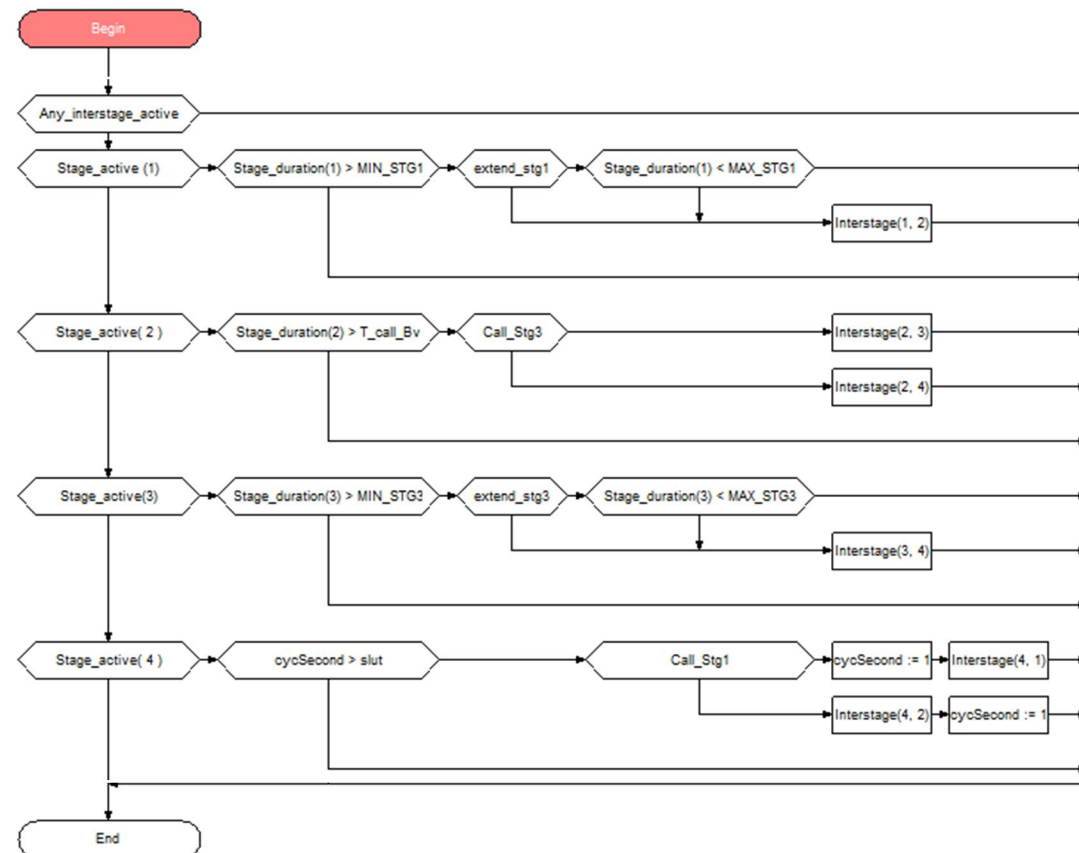
På figur C.4 fremgår den modellerede trafikstyring af det signalregulerede kryds Hobrovej / Ny Kærvej.

Fase 1 er grønt for den venstresvingende trafik på Hobrovej.

Fase 2 er grønt på Ny Kærvej og Vestre Allé.

Fase 3 er grønt for den venstresvingende trafik på Ny Kærvej og Vestre Allé

Fase 4 er grønt på Hobrovej.

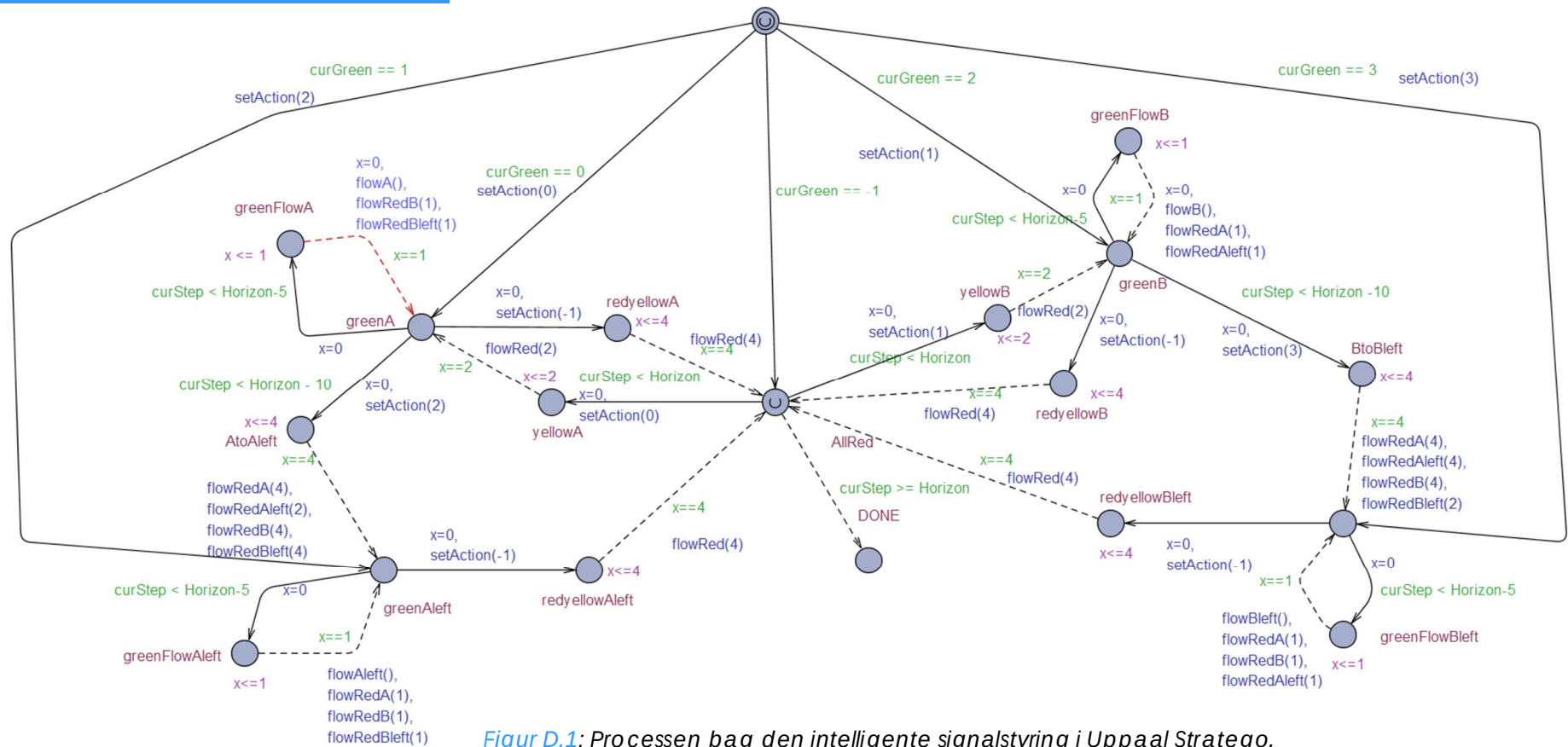


Figur C.4: Trafikstyringen af det signalregulerede kryds Hobrovej / Ny Kærvej i VISSIM.

D Uppaal Stratego

På figur D.1 fremgår den forholdsvis komplicerede model i Uppaal Stratego. Det er i denne model, at den optimale signal-sætning for de næste 20 sekunder bestemmes, hvilket gøres hvert sekund med henblik på hele tiden at effektuere en optimal signalstyring.

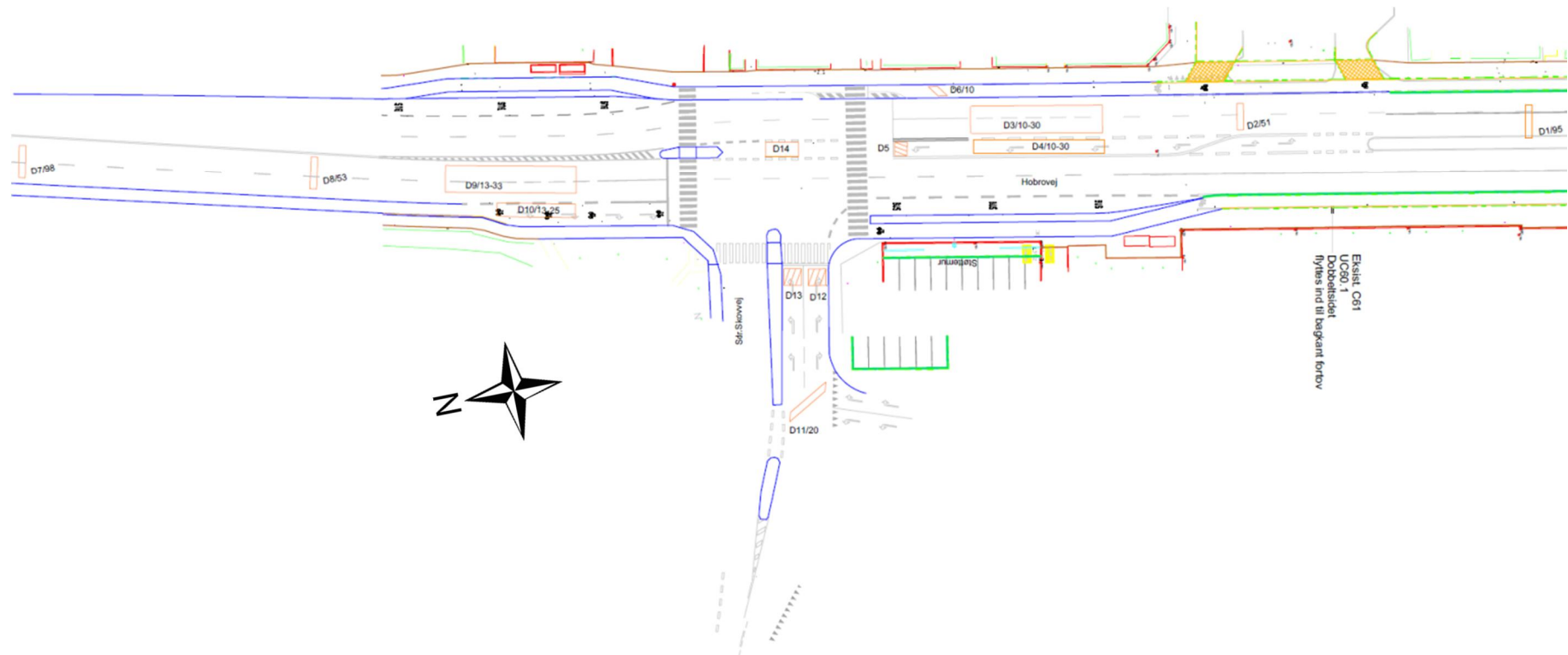
Den viste model er udarbejdet for den intelligente signalstyring i krydset Hobrovej / Ny Kærvej. Modellen er tilsvarende for de øvrige kryds, hvor der dog er mindre korrektioner, da der eksempelvis ikke er venstresvingsfaser i krydset Hobrovej / Provstegården.



Figur D.1: Processen bag den intelligente signalstyring i Uppaal Stratego.

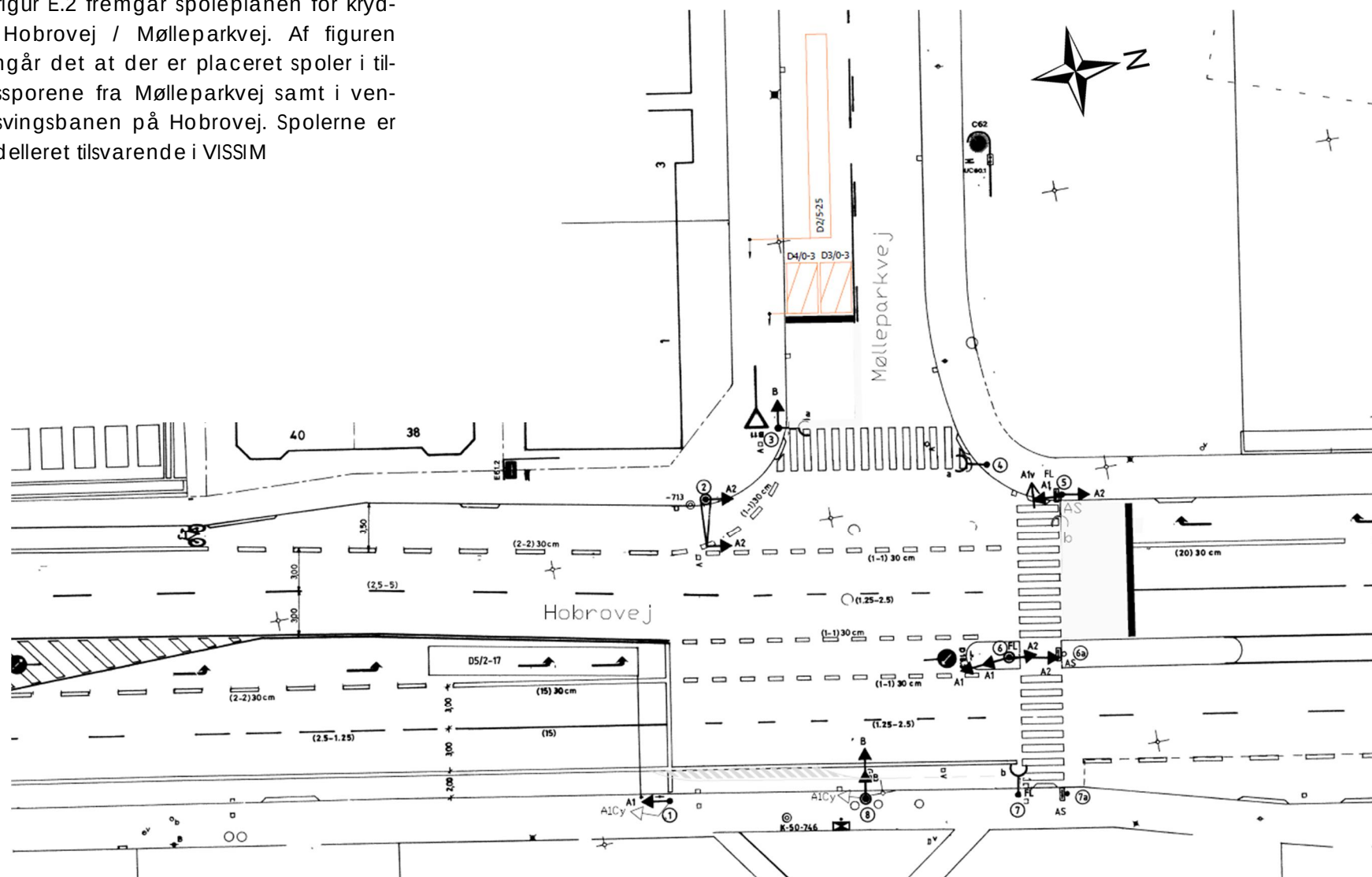
Spoleplaner

På figur 4.1 fremgår spoleplanen af krydset Hobrovej Søndre Skovvej, som er modelleret tilsvarende i VISSIM. Som det ses er der placeret spoler i samtlige tilfarter i forbindelse med den uafhængige trafikstyring.



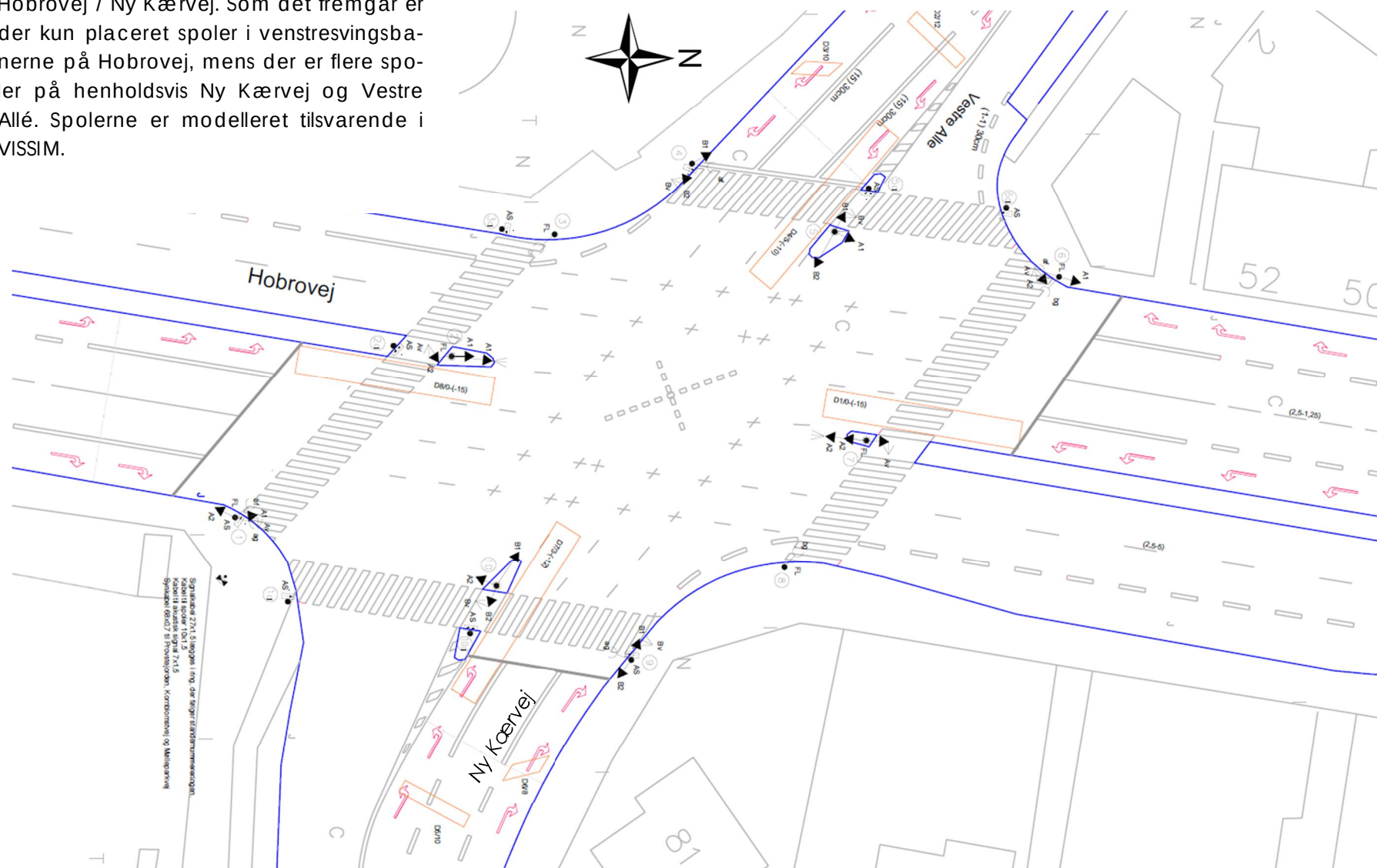
Figur E.1: Spoleplan af krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

På figur E.2 fremgår spoleplanen for krydset Hobrovej / Mølleparkvej. Af figuren fremgår det at der er placeret spoler i tilfartssporene fra Mølleparkvej samt i venterstevingsbanen på Hobrovej. Spolerne er modelleret tilsvarende i VISSIM



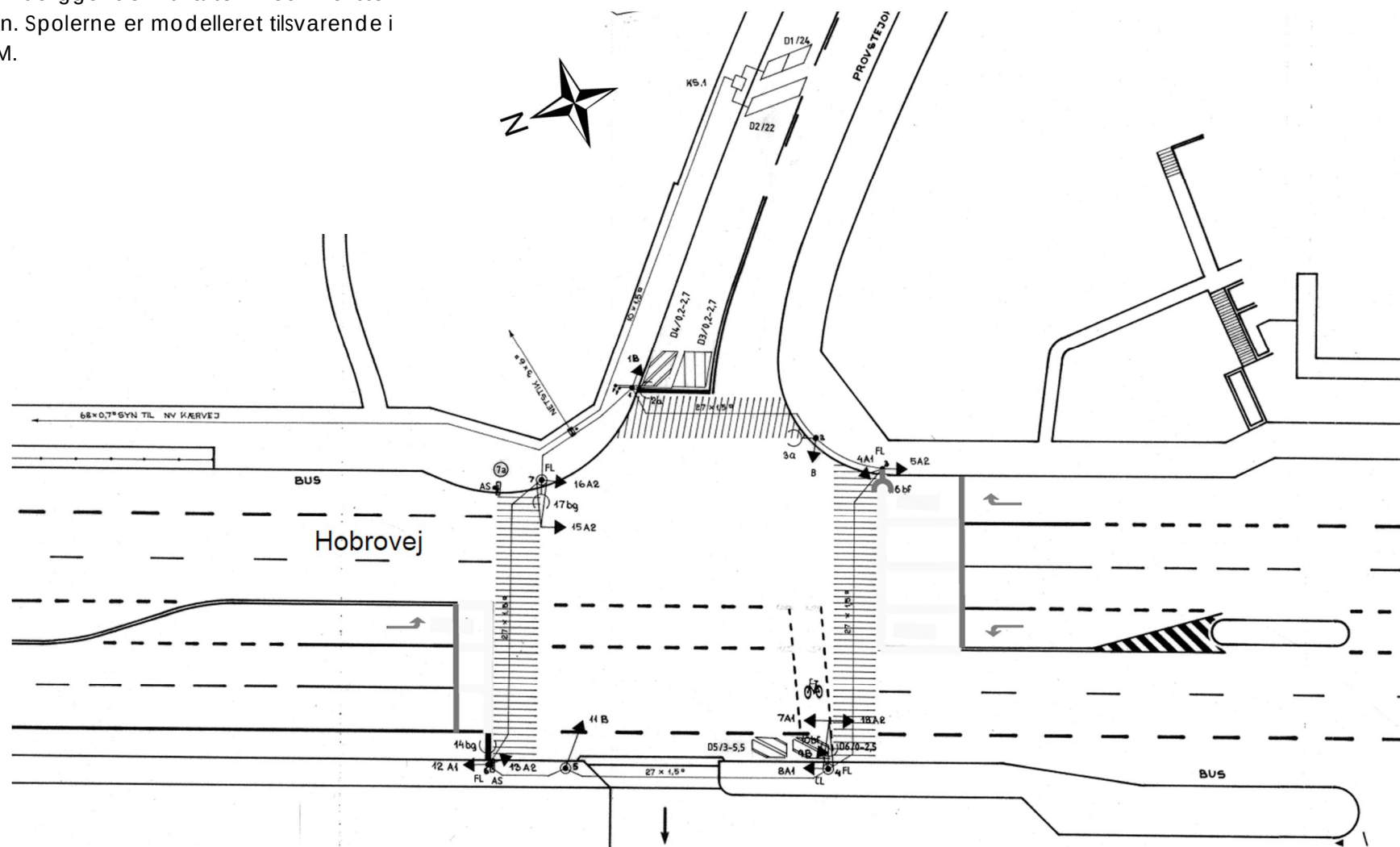
Figur E.2: Spoleplan af krydset Hobrovej / Mølleparkvej.

På figur E.3 ses spoleplanen af krydset Hobrovej / Ny Kærvej. Som det fremgår er der kun placeret spoler i venstresvingsbanerne på Hobrovej, mens der er flere spoler på henholdsvis Ny Kærvej og Vestre Allé. Spolerne er modelleret tilsvarende i VISSIM.



Figur E.3: Spoleplan af krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Af figur E.4 fremgår spoleplanen i Krydset Hobrovej / Provstejorden, hvor der kun er spoler beliggende i tilfarten ved Provstejorden. Spolerne er modelleret tilsvarende i VISSIM.



Figur E.4: Spoleplan af krydset Hobrovej / Provstejorden.