AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

# KAPACITETSUNDERSØGELSE AF SIGNALREGULEREDE KRYDS I VISSIM

Andreas Bo Madsen & Michael Bødker Pedersen

Kandidatspeciale inden for Veje og Trafik ved Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet

Juni 2019

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

**Det Teknisk-**
**Naturvidenskabelige Fakultet**
Institut for Byggeri og Anlæg, Veje og Trafik
Aalborg Universitet

**Titel**

Kapacitetsundersøgelse af signalregulerede kryds i Vissim

**Projekttype**

Kandidatspeciale

**Projektperiode**

1. februar - 7. juni 2019

**Forfattere:**

Andreas Bo Madsen
Michael Bødker Pedersen

**Vejleder**
Harry Lahrmann

**Antal sider** 50
**Bilag** 1
**Elektroniske bilag** 3
**Afsluttet** 7. juni 2019

**Synopsis**

Dette projekt omhandler kapaciteten i signalregulerede kryds. Formålet er at klarlægge den kapacitetsmæssige effekt af forskellige signaltekniske og geometriske tiltag. Projektet er udført i mikrosimuleringsprogrammet PTV Vissim 11. Der er opbygget et fiktivt kryds i Vissim, der overholder gældende vejregler for krydsgeometri og signalanlæg. Der er opbygget fem scenarier, hvor der i hvert scenarie ændres én parameter. Hvert scenarie testes ved et stort antal varierende trafikmængder. I Scenarie 1 afvikles trafikken i to hovedfaser uden svingpile. Der er ét ligeudkørende spor, et venstresvingsspor og et højresvingsspor i alle fire retninger. I Scenarie 2 indsættes ubundne svingpile, hvilket giver højere samlet middelforsinkelse, men bedre serviceniveau, da den maksimale forsinkelse bliver mindre. I Scenarie 3 indsættes bundet venstresving, hvilket højner trafiksikkerheden. Dette gav en betydelig reduktion i kapaciteten. I Scenarie 4 blev der indsat et ekstra ligeudkørende spor i alle retninger, så der er taget højde for både trafiksikkerheden og fremkommeligheden. Dette gav en markant forbedring af kapaciteten og fremkommeligheden ift. Scenarie 3. I Scenarie 5 blev der taget hensyn til økonomien i anlæggelsen af krydset, da der kun var to ligeudkørende spor i krydsområdet. Dette gav en lille reduktion af kapaciteten ift. Scenarie 4. Til sidst blev alle scenarier testet med en intelligent adaptiv signalstyring fra virksomheden Advanced Traffic Systems. Dette viste generelt en positiv effekt på fremkommeligheden. Det var særligt i scenarier med bundet venstresving og ved høje trafikmængder, at der blev påvist en øget kapacitet.

# Abstract

This project examines the capacity of signalised intersections. The purpose is to determine the effect of various signal control forms and geometric changes on the capacity of the intersection. The project has been carried out in the micro simulation program PTV Vissim 11. A fictive intersection has been built in Vissim in accordance with Danish norms and practices. Five scenarios have been created, with each scenario featuring a change of one parameter. Each scenario is tested with a large number of different traffic volumes. In Scenario 1, there are only two phases with no turn phases. The model has one through lane, one left turn lane and one right turn lane in each of the four directions. In Scenario 2, there are unprotected left turn arrows for both left and right turning traffic. This increased the overall average delay per vehicle, but decreased the maximum delay in the intersection. In Scenario 3, the protected left turns are introduced. These improve the traffic safety, but drastically reduce the capacity of the intersection. In Scenario 4, an extra through lane is introduced to counter the negative effect of the protected left on the capacity. The capacity in Scenario 4 is vastly improved from Scenario 3. In Scenario 5, the economy of building the intersection is taken into consideration. There are only two through lanes in the area of the intersection, while the roads only have one lane outside the intersection. This meant a small drop in capacity from Scenario 4. Lastly, all five scenarios were tasted with an intelligent adaptive signal controller from the company Advanced Traffic Systems. This showed an overall improvement on the capacity. It was mainly in the scenarios with protected left turns and with high traffic volumes that the ATS controller had a vast positive effect.

# Forord

Dette projekt er udarbejdet af to specialestuderende på det afsluttende semester af kandidatuddannelsen Veje og Trafik på Aalborg Universitet. Projektperioden forløb fra 1. februar til 7. juni 2019. Projektet omhandler kapacitetsvurderinger af signalregulerede kryds. Der benyttes mikrosimuleringsprogrammet Vissim 11 fra PTV Group til at vurdere effekten af forskellige kryds- og signalmæssige udformninger af et signalreguleret kryds.

Projektet er udført i samarbejde med virksomheden Advanced Traffic Systems. ATS har stillet deres signalcontroller til rådighed til brug i projektet, hvilket har muliggjort udførelsen af simuleringer med en adaptiv signalstyring. ATS har herudover bidraget med viden om forskellige styringsalgoritmer og -måder.

Figurer og tabeller er nummereret iht. kapitel, svarende til at den første figur i kapitel 3 har nummer 3.1, den anden figur nummer 3.2 osv. Forklarende tekst til figurer og tabeller findes under de respektive figurer og tabeller. Figurer, der ikke indeholder kildehenvisning i figurteksten, er fremstillet af projektgruppen. Baggrundskort benyttet til illustrationer er fra Kortforsyningen medmindre andet er angivet.

Der sendes en tak til følgende personer for assistance i løbet af projektet:

- Harry Lahrmann, vejleder
- Wouter Moerland, PTV Group
- Line Degn Laden, COWI
- Jakob Haahr Taankvist, ATS

Til supplering af resultater er vedlagt 3 elektroniske bilag med titlerne "Beregningseksempel - Scenarie 1 - Basistrafik", "Figurer"og "Trafiktal". Disse bilag viser metodikken bag udregningen af middelforsinkelser på baggrund af data fra Vissim, det anvendte data til figurer i rapporten samt de anvendte trafikdata på kvartersbasis.

# Indholdsfortegnelse

**Kapitel 1 Baggrund** **1**
1.1 Problemformulering . . . 3

**Kapitel 2 Metode** **4**
2.1 Litteraturstudie . . . 4
2.2 Kalibrering . . . 4
2.3 Udførte simuleringer . . . 5
2.4 Simulering med ATS controller . . . 5
2.5 Databehandling . . . 5

**Kapitel 3 Litteraturstudie** **7**
3.1 Beregningsmetoder . . . 7
3.2 Simuleringsværktøjer . . . 8
3.3 Kalibrering af Vissim-modeller . . . 9
3.4 Signalcontrollere . . . 10

**Kapitel 4 Modelopbygning** **12**
4.1 Scenarier . . . 12
4.2 Trafikale input til modellen . . . 15
4.3 Adfærdsparametre . . . 17
4.4 Sikkerhedstider . . . 17
4.5 Detektorer til trafikstyring . . . 20
4.6 Opbygning af signalprogram . . . 21
4.7 Vigepligter og konfliktområder . . . 23

**Kapitel 5 Udførte simuleringer** **27**
5.1 Kriterier for sammenbrud . . . 27
5.2 Antal repetitioner . . . 27

**Kapitel 6 Resultater** **29**
6.1 Oversigt over sammenbrudspunkter . . . 29
6.2 Analyse af middelforsinkelser . . . 30
6.3 Effekt af ATS controller . . . 35

**Kapitel 7 Konklusion** **42**
7.1 Effekter af tiltag . . . 42
7.2 Effekt af sikkerhedstider . . . 43
7.3 ATS . . . 44

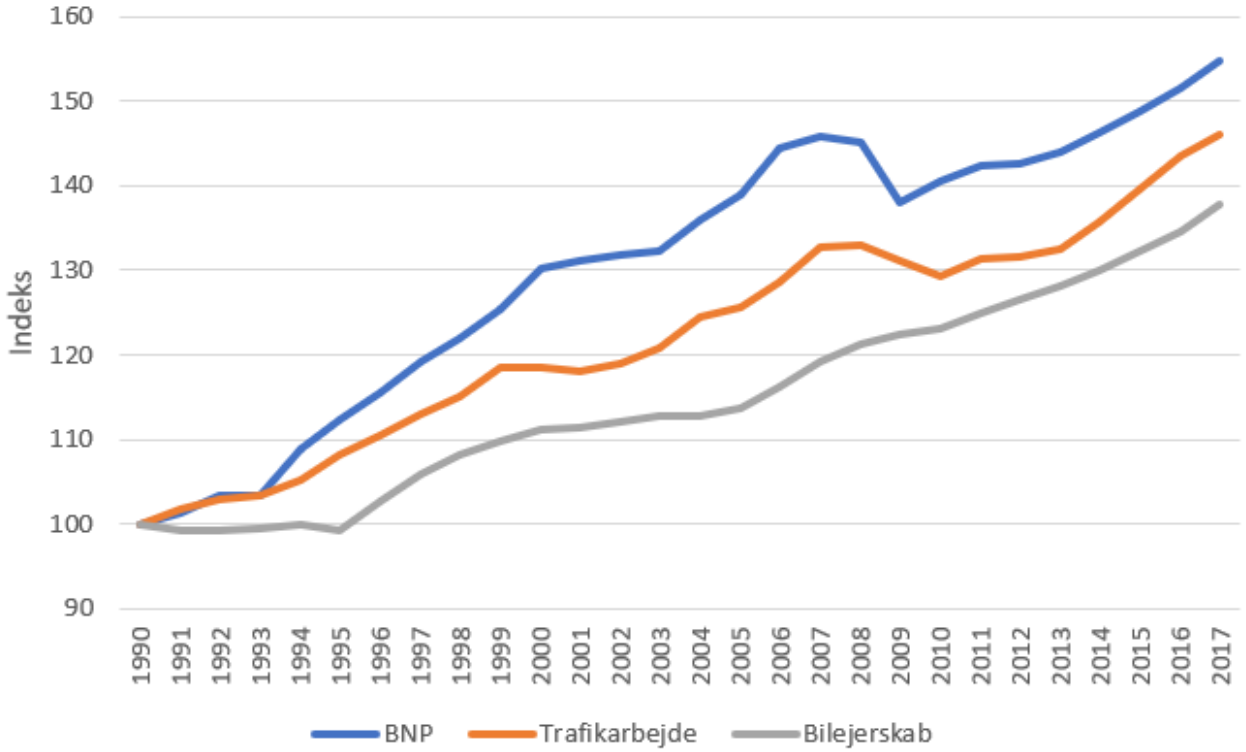
**Kapitel 8 Diskussion** **45**
8.1 Prioritering i signalanlæg . . . 45
8.2 Trafiksikkerhed kontra trafikafvikling . . . 45
8.3 Fleksibilitet i det designede signalanlæg . . . 46
8.4 Fritliggende kontra samordnet signalanlæg . . . 47
8.5 Antal repetitioner . . . 47
8.6 Bindinger ved ATS controller . . . 47
8.7 Vurdering af Vissim som simuleringsværktøj . . . 47
8.8 Fjernelse af biler i Vissim . . . 48

**Litteraturliste** **49**

**Bilag A Trafikinput** **51**
A.1 Biltrafik . . . . . 51
A.2 Bustrafik . . . . . 52
A.3 Lastbiltrafik . . . . . 53
A.4 Cykeltrafik . . . . . 54
A.5 Fodgængeretrafik . . . . . 55

# Baggrund 1

Biltrafikken på vejnettet i Danmark er stødt stigende. Siden 1990 er det samlede trafikarbejde steget med 45 %. Dette er sammenhængende med, at BNP er steget med ca. 55 %, og bilejerskabet er steget med ca. 40 %. Den indekserede udvikling i trafikarbejde, BNP og bilejerskab kan ses på Figur 1.1.



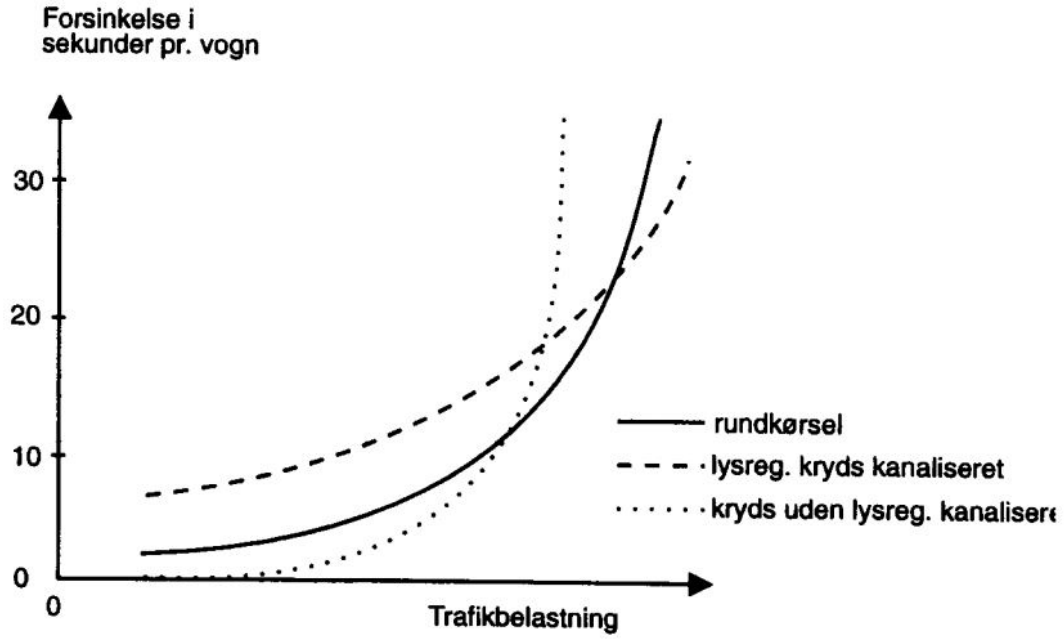

***Figur 1.1.*** Udviklingen i BNP, trafikarbejde og bilejerskab pr indbygger. Tal fra år 1990 er benyttet som indeks 100. Modificeret [Vejdirektoratet, 2018a].

Det er særligt på statsvejnettet, at trafikken stiger. Dette har formentligt en sammenhæng med, at vi transporterer os længere til og fra arbejde end tidligere [Danmarks Statistik, 2016]. Denne tendens kan også medvirke til at forklare, hvorfor myldretidstrafikken bliver mere intens [Vejdirektoratet, 2018c]. Den øgede trafikbelastning i myldretiden medfører, at behovet for signalanlæg ligeledes bliver større. Fordelene ved signalanlæg stiger ved højere trafikintensiteter, da de kan sikre en acceptabel trafikafvikling af større trafikmængder end rundkørsler og prioriterede krydds kan. Samtidig opretholdes en høj trafiksikkerhed grundet tidsseparering af de trafikstrømme, der er i konflikt med hinanden. [Lahrmann og Leleur, 1994]

Opførelsen af signalanlæg har dog også konsekvenser både for trafikken og for miljøet. Det medfører et større antal stop og accelerationer end prioriterede kryds og rundkørsler, hvilket fører til øget støj i lokalområdet og større miljøbelastning.

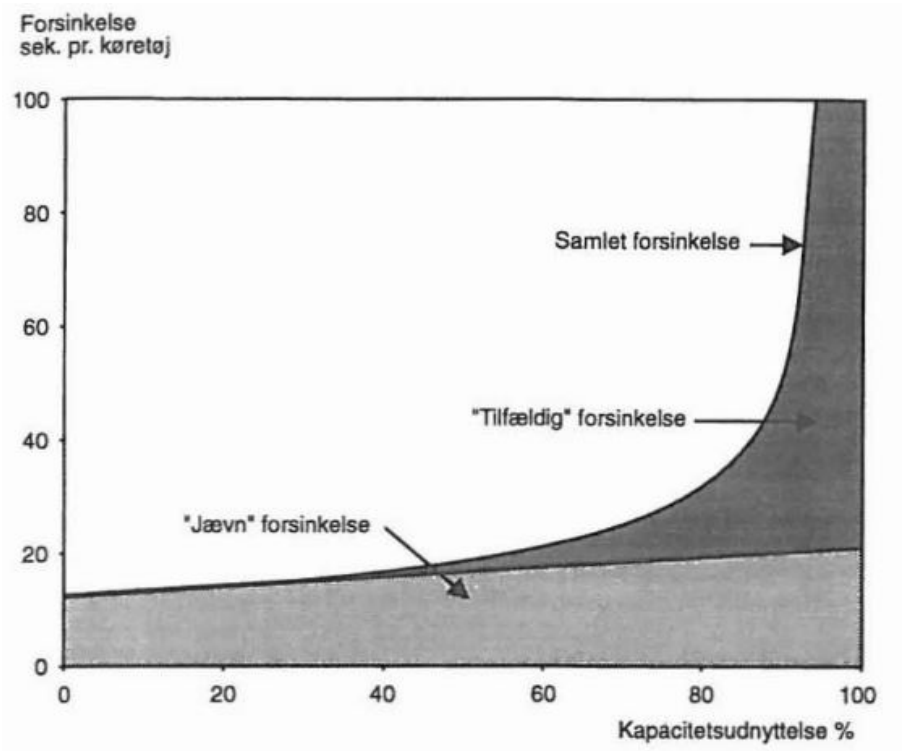
Signalanlæg fører til en mere jævn trafikafvikling, der tilgodeser alle trafikanterne i krydset. For trafikanter på primærvejen vil signalregulerede kryds dog føre til øget forsinkelse ift. i et prioriteret

kryds. Forsinkelsen i rundkørsler, prioririterede kryds og signalregulerede kryds som funktion af trafikbelastningen kan ses på Figur 1.2.




***Figur 1.2.*** Forsinkelse i forskellige krydstyper som følge af belastningen [Lahrmann og Leleur, 1994].

Forsinkelsen i lysreguleringer består af et bidrag kaldet "Jævn forsinkelse", der stiger lineært ved højere kapacitetsudnyttelse, og et ekspotentielt voksende bidrag fra "Tilfældig forsinkelse". Den jævne forsinkelse beskriver den forsinkelse, der naturligt vil opstå grundet ankomst ved rødt lys. Den tilfældige forsinkelse beskriver forsinkelsen ud fra belastningen, da der vil være kø og derfor ekstra forsinkelse. Forsinkelsen for køretøjer i signalanlæg som følge af kapacitetsudnyttelsen kan tilnærmelsesvis udtrykkes som på Figur 1.3.




***Figur 1.3.*** Forsinkelse i signalanlæg som følge af belastningen [Lahrmann og Leleur, 1994].

I Danmark er der i alt 2.800 signalanlæg, hvoraf 1.580 er tidsstyrede og 1.220 er trafikstyrede. Signalanlæg placeres oftest i byerne, hvor trafikbelastningerne er størst. Ud fra Figur 1.1 kan det ses, at trafikarbejdet og dermed også belastningen på signalanlæggene er vokset de seneste år, hvorfor nødvendigheden af at optimere signalanlæggene er steget. Vejdirektoratet har estimeret, at de årlige omkostninger ved øget tidsforbrug og øget brændstofforbrug for alle signalanlæggene i Danmark udgør 11,25 mia. kr. [Vejdirektoratet, 2012].

Udover hensynet til afviklingen af trafik i signalregulerede kryds, skal der også tages hensyn til trafiksikkerheden. Et af de tiltag, der har vist sig at forbedre trafiksikkerheden i signalanlæg, er bundne svingfaser med 3-lys pile. De bundne svingfaser eliminerer de sekundære konflikter for den svingende trafikant og forhindrer dermed mulige uheldssituationer. Det er særligt venstresving, der oftest opføres som bundet af hensyn til trafiksikkerheden, selvom kapaciteten af krydset nedsættes ved bundne svingfaser. Ifølge en dansk undersøgelse, medfører bundne svingfaser en reduktion i antallet af ulykker med venstresvingede trafikanter på 80 %. Samlet i et signalreguleret kryds vil det medføre et fald i antal ulykker på 35 %. [Buch m.fl., 2017]

## 1.1 Problemformulering

I forlængelse af ovenstående afsnit, er det relevant at undersøge effekten af forskellige tiltag i signalanlæg. Dette projekt undersøger den kapacitetsmæssige effekt af forskellige geometriske krydsudformninger, forskellige signaltekniske løsninger samt forskellige styringsformer. Effekten af de forskellige krydsudformninger og -løsninger testes i mikrosimuleringsprogrammet Vissim, hvor der udføres et stort antal simuleringer ved forskellige trafikmængder for at danne et bredt overblik over trafikafviklingen i krydset. Herudfra kan den kapacitetsmæssige effekt af de forskellige tiltag udledes.

# Metode 2

I dette kapitel beskrives de metoder, der er anvendt i dette projekt. Afsnittet skal give indblik i hvordan problemstillingerne er beskrevne og hvordan de løses i dette projekt.

## 2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudiet er udført ved brug af databaser indeholdende videnskabelige artikler. Der er pimært søgt på Scopus, Web of Science, Google Scholar og Trafikdages artikelarkiv. Der er søgt litteratur på både dansk og engelsk.

De primære søgeord har været "Vissim", "microsimulation", "capacity", "signalized", "matlab", "delay", "calibration"og "scenario". Disse er brugt som søgeord i forskellige kombinationer med hinanden. Derudover er der søgt på "microscopic", "mesoscopic", "macroscopic"og "hybrid"i kombination med hinanden. Det engelske ord "signalized"kan også staves "signalised", hvorfor der er udført søgninger på begge stavemåder for at sikre, at stavemåden ikke havde effekt på søgeresultaterne. Desuden er Vejreglerne anvendt til at søge viden og dokumentation både omkring kapacitet, signalanlæg og mikrosimuleringer. Dette er anvendt fordi disse er udarbejdet til og tilpasset de danske forhold. Litteraturstudiet resulterede i 34 kilder.

## 2.2 Kalibrering

Der er udført fejlsikring af modellen ved hjælp af en kvalitativ metode, hvor simuleringer af modellen manuelt er kigget igennem for at korrigere vigepligterne i krydset samt finde evt. fejl og uønskede konflikter i modellen. Dette er gjort, da en traditionel kalibrering af modellen ud fra eksisterende forhold ikke var mulig, da der simuleres på et fiktivt kryds. I Anvendelse af Mikrosimuleringsmodeller anbefales det at bruge en "trial and error"metode på mindre modeller, der består af få eller mindre kryds. Dette indebærer kalibrering af modellen baseret på visuelle observationer som f.eks. køreregistreringer og rejsetider. [Vejdirektoratet, 2019]

Vigepligterne blev kontrolleret ved at modificere trafikinputtet for at frembringe de pågældende konflikter. Dette blev i praksis gjort ved, at der ved undersøgelse af venstresvingendes vigepligt for højresvingede fra modsat retning blev skruet op for antallet af trafikanter i de to trafikstrømme, imens trafikken i de øvrige strømme blev fjernet. Ligeledes ved andre konflikter blev de relevante trafikstrømme øget i mængde, imens de øvrige blev fjernet.

Venstresvingende bilister og lastbiler har vigepligt for fire trafikstrømme: ligeudkørende og højresvingende biler fra modsat retning, ligeudkørende cyklister fra modsat retning og fodgængere i det fodgængerfelt, der bliver krydset. Disse fire potentielle konflikter blev undersøgt enkeltvis, hvorefter relevante parametre blev bestemt. Samme kontrol er lavet med højresvingende biler og lastbiler, der har vigepligt for to trafikstrømme: ligeudkørende cyklister fra samme retning og fodgængere i det fodgængerfelt, der bliver krydset.

## 2.3 Udførte simuleringer

Der simuleres 25 repetitioner ad gangen, da dette i henhold til vejreglen Anvendelse af Mikrosimuleringsmodeller ud fra en iterativ proces er bestemt til at være det antal repetitioner, der giver statistiske signifikante resultater. Denne iterative proces indledes med at simulere et vilkårligt antal repetitioner. Herefter udvælges en kritisk variabel, og der udregnes standardafvigelse for variablen. Herudfra beregnes det nødvendige antal repetitioner, hvorefter der laves en ny simulering med dette antal repetitioner. Processen gentages, indtil der er konvergens mellem antal udførte repetitioner og det udregnede behov. [Vejdirektoratet, 2019]

Da der er fem scenarier, simuleres der først på Scenarie 1. Indledningsvis benyttes trafikmængder fra et repræsentativt kryds. Efter simuleringen øges trafikmængderne med 5 %, hvorefter der foretages en ny simulering af 25 repetitioner. Trafikmængderne øges ad flere omgange med 5 % af de oprindelige tal, indtil trafikmængderne er dobbelt størrelse af de oprindelige trafikmængder. Dette gøres med alle fem scenarier, hvorefter det vurderes, hvornår der opstår sammenbrud i hvert af scenarierne.

Der benyttes to definitioner for sammenbrud. Det ene er kølængderne i svingbanerne, der ikke må overstige svingbanens længde i mere end 5 % af simuleringsperioden. Når dette kriterie bliver opfyldt i minimum halvdelen af svingbanerne, defineres dette som et sammenbrud i trafikafviklingen. Det andet kriterie er den gennemsnitlige forsinkelse pr. køretøj, der ikke må overstige 35,9 sek. Dette kriterie benyttes for at sikre et tilfredsstillende serviceniveau.

## 2.4 Simulering med ATS controller

Modellen testes med en signalcontroller fra Advanced Traffic Systems, hvorefter resultaterne sammenlignes med de øvrige simuleringer. Dette indbærer, at ATS skal have informationer om modellen, så controlleren kan tilpasses krydset. Herudover er der udleveret fasediagrammer, sikkerhedsmatricer og minimumsgrøntider.

Det er forsøgt at sikre, at ATS controlleren har de samme bindinger som den traditionelle trafikstyring, så resultaterne fra simuleringerne er sammenlignelige. Minimumsgrøntider og sikkerhedstider har samme værdier som ved den traditionelle. Faserne er opsat til, at der kan foretages de samme fasevalg ved begge styreformer.

Efter fuldført opsætning af ATS controller til modelkrydset, er der foretaget to simuleringer pr. scenarie. For hvert scenarie er der med ATS controller simuleret ved basistrafikmængden og ved sammenbrudstrafikmængden fra den normale trafikstyring. Dermed er der grundlag for at sammenligne effekten ved høj og lav trafikintensitet.

## 2.5 Databehandling

Der udtrækkes resultater for rejsetider, forsinkelse, kølængder, afviklede trafikmængder og brændstofforbrug. Rejsetider, forsinkelser og kølængder fås i Vissim som minimumsværdier, maksimumsværdier, gennemsnitsværdier og fraktiler. Fraktilerne kan selv defineres i Vissim, og i dette projekt er det valgt at trække data ud for 5 %, 50 % og 95 % fraktilerne, da dette er de oftest anvendte.

Når en simulering er færdig, trækkes alt data over i Excel. Der udtrækkes data for hvert enkelt kvarter i hver gentagelse af simuleringen og for fraktiler samt minimums- og maksimumsværdier. Dataen behandles og sorteres i pivottabeller i Excel, så de rigtige gennemsnits- og fraktilværdier kan aflæses. Middelforsinkelsen findes for hvert kørespor, hvorefter der udregnes et vægtet gennemsnit af de fundne værdier. Det vægtede gennemsnit benyttes for at finde middelforsinkelsen pr. køretøj, da

der er varierende trafikmængder i hvert kørespor. Derefter vurderes det, om værdierne er kritiske i forhold til de opstillede kriterier for sammenbrud.

# Litteraturstudie 3

Der er i dette projekt udført litteraturstudie for at undersøge eksisterende forskning inden for relevante emner samt for at danne baggrundsviden i projektet. Indledningsvis er der søgt viden omkring beregningsmetoder til kapacaitetsvurdering i lysreguleringer. Dernæst omkring de forskellige simuleringsværktøjer på markedet. Afslutningsvis er der søgt information omkring kalibreringen af Vissim-modeller, betydende parametre i Vissim samt forskellige metoder til at udføre kalibreringen.

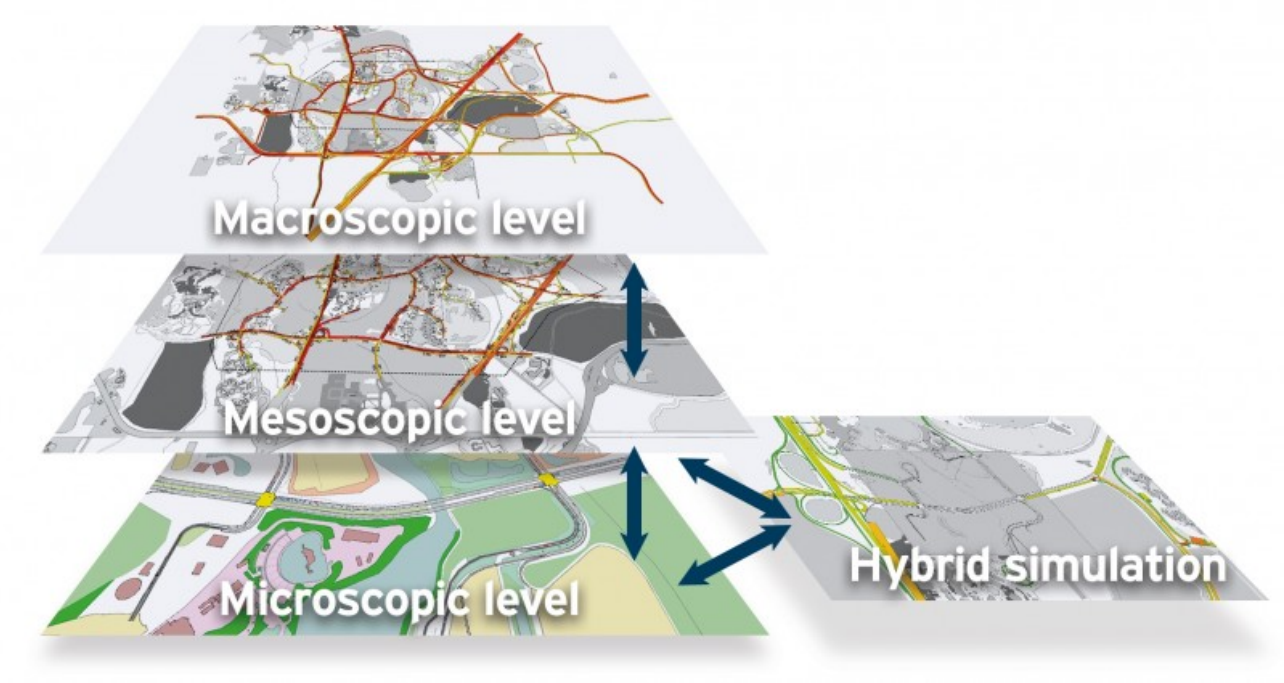
## 3.1 Beregningsmetoder

Trafikafviklingen i et signalreguleret kryds vurderes ud fra kapacitetsberegninger, der kan inkludere estimationer af bl.a. forsinkelser og kølængder. Beregningerne på signalanlæg kan foretages enten analytisk eller som simulering. Valget af metode afhænger af kompleksiteten af det pågældende kryds samt den ønskede detaljeringsgrad af de fundne resultater.
Den analytiske model er deterministisk, hvilket betyder den ikke indeholder variationer i trafikken. Resultatoutputs fra en analytisk model vil grundlæggende være i form af middelværdier og af begrænset detaljeringsgrad. Analytiske modeller betragter trafikstrømme som helhed og ser ikke på den enkelte trafikants placering. Adfærden i en analytisk model bestemmes ud fra tidsgabteorien [Vejdirektoratet, 2015].
Ved mere komplekse projekter som f.eks. flere sammenhængende kryds eller trafikstyrede kryds, kan den simple analytiske metode ikke længere anvendes, hvorfor simuleringer benyttes [Vejdirektoratet, 2015]. Simuleringsmodeller indeholder den enkelte trafikants placering, adfærd og egenskaber og kan simulere på trafikken i hvert enkelt kørespor. Adfærden bygger på modeller til eksempelvis car-following og vognbaneskift. Disse modeller er stokastiske, hvorfor simuleringerne gentages for at pålideligheden af simuleringen øges, men samtidig giver variationerne også indblik i spredningen af dataoutputtet [Vejdirektoratet, 2019].

Trafikmodeller kan opdeles i tre typer: makro-, meso- og mikroskopiske modeller. Den makroskopiske model svarer til en analytisk model og mikroskopiske til simuleringen. En mesoskopisk model er mellemleddet mellem makro og mikro, hvor det forsøges at udnytte styrkerne ved de respektive modeller.
Den makroskopiske model er simpel at anvende, kalibrerer og levere hurtige resultater, men har lav detaljeringsgrad. En mesoskopisk model har højere detaljeringsgrad end en makroskopisk, men regner ligesom makroskopiske modeller i gennemsnitsværdier, der beregnes for hele trafikstrømmen. En mikroskopisk model leverer detaljerede resultater, men er mere krævende på tid og økonomi, da der skal arbejdes med input og kalibrering af modellen. [Ehlert, Schneck og Chanchareon, 2016]
Der findes også hybridmodeller, som er en sammenblanding mellem mikro- og mesoskopiske modeller, der forsøger at udnytte styrkerne fra hver type model. I disse modeller opdeles vejnettet, så dele af vejnettet simuleres mesoskopisk, men de vigtigste knudepunkter simuleres mikroskopisk. I disse modeller er det vigtigt at sikre overensstemmelse mellem modellerne på de overgange, hvor trafikanterne bliver overført fra den mesoskopiske til den mikroskopiske del og omvendt. Der er flere forskellige områder der skal sikres overensstemmelse mellem bl.a. netværk, rutevalg, trafikafvikling og

dataoverførsel mellem modellerne. [Burghout, 2006]

De forskellige modeltyper kan ses på Figur 3.1. Her illustreres de forskellige detaljeniveauer, de respektive modeltyper arbejder på.



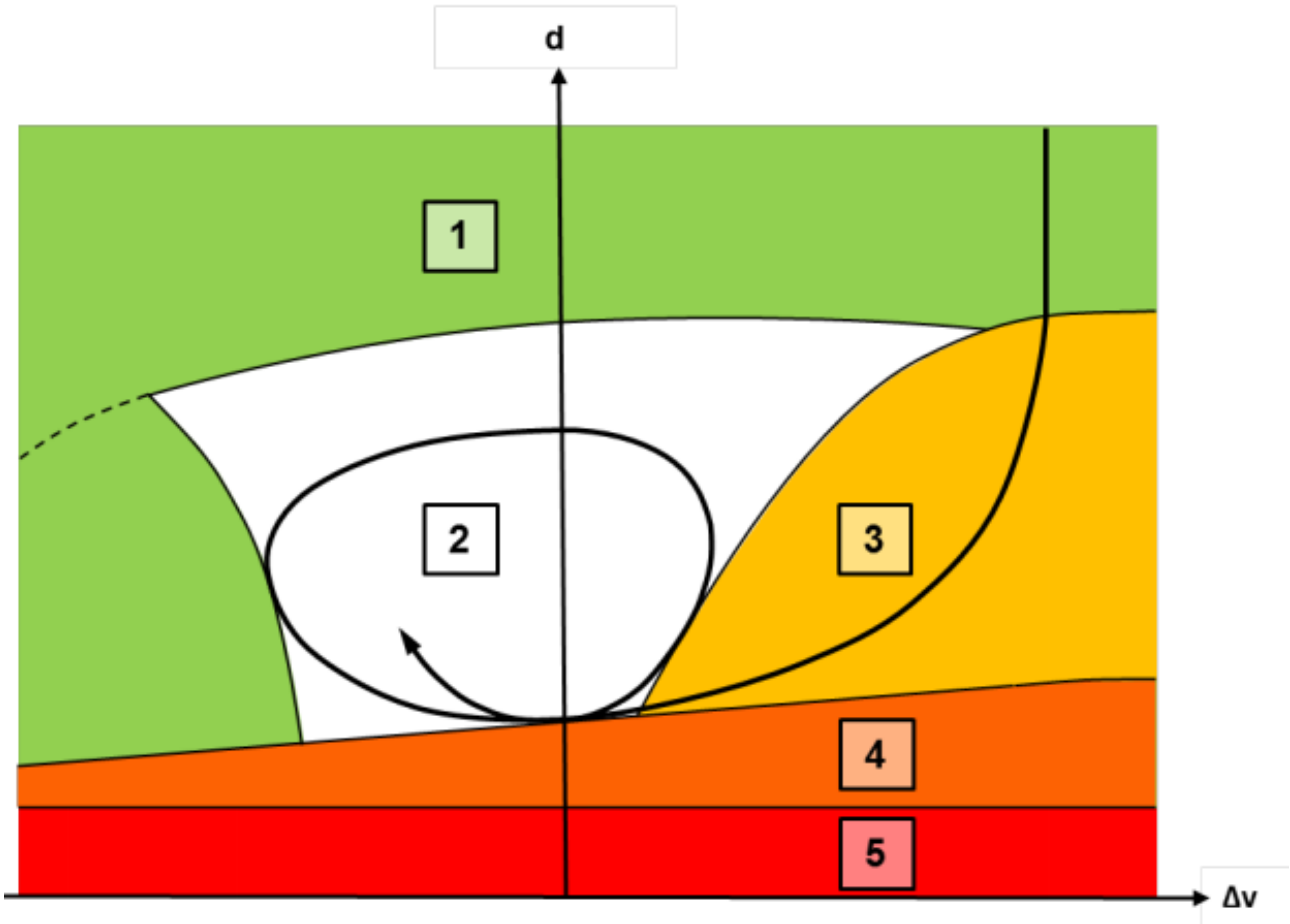

***Figur 3.1.*** De forskellige typer af trafikmodeller [Aimsun, 2016].

## 3.2 Simuleringsværktøjer

Der findes et stort udbud af mikrosimuleringsværktøjer, og der vil naturligt være en variation i resultaterne mellem programmerne. Tre af de mest benyttede værktøjer til mikrosumlering er CORSIM, Vissim og SimTrafic. Et studie har sammenlignet simuleringer af signalanlæg i to scenarier i disse tre programmer med henblik på at finde forskelle i resultater. Det ene scenarie blev opbygget med 100 % ligeudkørende trafik og det andet med ligeudkørende og højresvingende. Generelt set har Vissim højere kapacitet og mindre kø end de øvrige værktøjer, mens CORSIM har de laveste variationer og SimTrafic de højeste. [Tian m.fl., 2002]

I Danmark er Vissim det mest anvendte simuleringsværktøj, hvorfor dette program også anvendes i dette projekt [Vejdirektoratet, 2019]. Vissim anvendes ofte, da der er et stort antal parametre og input, der kan indstilles med høj detaljeringsgrad. Dette er effektivt til at vurdere forskellige situationer som trafikplanlægger. Desuden har Vissim et indbygget COM-modul, som effektivt kan programmere ændringer til scenarieopbygninger samt automatisere dataudtræk og databehandling fra simuleringerne [Ma m.fl., 2011].

Vissim benytter Wiedemanns adfærdsmodel for car-following, der beskriver trafikanters forfølgelsesadfærd. Wiedemann har udviklet to modeller til brug i forskellige typer trafik. Wiedemann74 benyttes til byområder og sammenletninger, og Wiedemann99 benyttes til motorveje. Wiedemanns model beskriver trafikanters adfærd ved møde med et forankørende køretøj, der kører med langsommere hastighed. I Wiedemanns model vil trafikanten decelerere til en lavere hastighed end den forankørende, da hastigheden af den forankørende ikke kan bedømmes nøjagtigt af trafikanten. Herefter vil trafikanten opfatte, at hastigheden er langsommere end den forankørende, hvorefter trafikanten vil accelerere. Herefter følger en periode med en række decelerationer og accelerationer. En illustration af Wiedemanns model kan ses på Figur 3.2. [PTV Group, 2018]




***Figur 3.2.*** Illustration af Wiedemanns car following model. Y-aksen viser distancen d mellem de to køretøjer. X-aksen viser hastighedsforskellen $\Delta$v. [PTV Group, 2018]

## 3.3 Kalibrering af Vissim-modeller

Ved kalibrering af Vissim er der flere parametre, der kan indstilles. De oftest anvendte parametre bruges til at styre trafikanternes adfærd i henhold til Wiedemanns adfærdsmodeller. I vejreglen om mikrosimulering er det oftest parametre for afstand, den ønskede hastighed, acceleration og deacceleration, der korrigeres. Ved signalanlæg kan opsætningen af signalstyringen samt intervallerne ved vigepligt også kalibreres [Vejdirektoratet, 2019]. Et studie foretaget i Pakistan har forsøgt at kalibrere en model til den forskelligartede trafik ved at lave følsomhedsanalyse og justering af parametre til følgeafstand. Studiet viser, at ved Wiedemann74 er det parametrene average standstill distance og additive part of the safety distance, der var de mest følsomme, mens det for Wiedemann99 var standstill distance, headway time og following variation. Herudover var minimum lateral distance standing ved hhv. 0 og 60 km/t også væsentlige parametre [Hussain, Bilal Nawaz og Ali, 2017].
Det er grundlæggende de samme parametre, der er fundet relevante i den danske vejregel og studiet fra Pakistan [Vejdirektoratet, 2019] [Hussain, Bilal Nawaz og Ali, 2017]. De specifikke parametreværdier vil være forskellige, da trafikken i Pakistan ikke er sammenlignlig med trafikken i Danmark.

Kapaciteten af svingbaner afhænger i høj grad af længden af svingbanen, andelen af trafik i svingbevægelsen samt grøntidsfordelingen i krydset. Ud fra variation i disse parametre kan en forøgelse på op til 30 % i kapaciteten opnås [Wu, 2007]. I forhold til cykler og fodgængeres påvirkning på kapaciteten for højresvingende er det følgende parametre der er relevante: forskellen mellem grøntiderne, cyklernes ankomst fordeling og hvor mange cykler der kommer i rød fasen. Forskellen mellem grøntider afvikler de blødetrafikanter der ankommer i rød fasen mens ankomstfordelingerne siger noget om mellemrummet mellem de bløde trafikanter og dermed noget om sandsynligheden

for et accepteret gap. Desuden var der lidt forskel på den analytiske model og resultaterne fra smuleringen. Dette kan skyldes at både bilister og cykelister kører mere aggressivt jo nærmere krydset er på kapacitetsgrænsen [Aagaard m.fl., 1998].

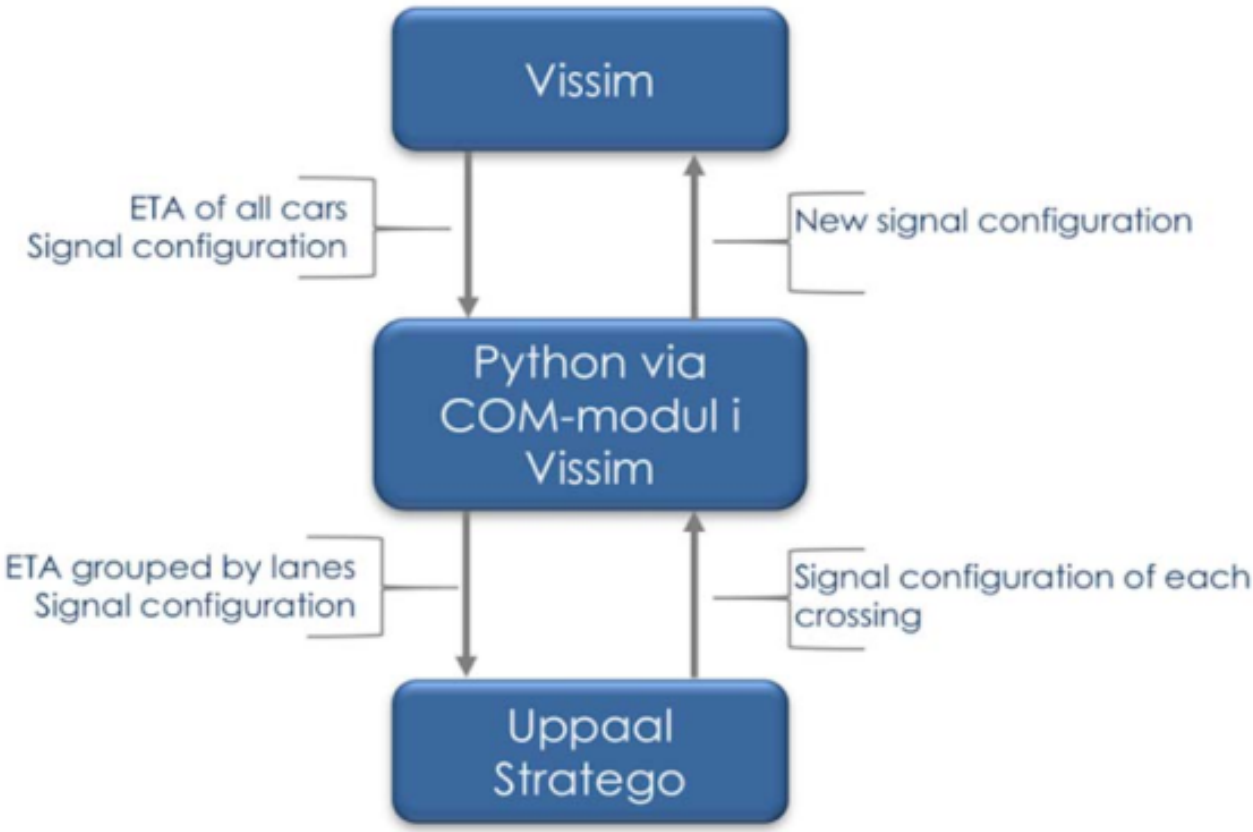
Forsinkelsen i et signalreguleret kryds kan deles op i geometrisk forsinkelse og signalforsinkelse. Den geometriske forsinkelse er forårsaget af, at køretøjer kører gennem krydset med nedsat hastighed ift. hastighedsgrænsen på vejene. Dette kalibreres i Vissim gennem reduced speed areas. Signalforsinkelsen er forårsaget af signalreguleringen i krydset. [Buck, Mallig og Vortisch, 2017]
Et studie fra Karlsruhe Institute of Technology har undersøgt de forskellige dele af forsinkelsen i Vissim. De undersøgte 3 områder, der var relevante for at modellere adfærd gennem krydset: Kørselstiden gennem krydset, headways og ankomstfordeling. Headways i Vissim består af hastigheden og parametre i car-following modellen. Kørselstiden gennem krydset svarer til den geometriske forsinkelse. [Buck, Mallig og Vortisch, 2017]
Studiet blev udført ved at observere et kryds gennem videooptagelser og derudfra kalibrere en model i Vissim. Det blev konkluderet, at kalibreringen af den geometriske forsinkelse havde en mindre effekt på den samlede forsinkelse, da signalforsinkelsen udgør størstedelen af forsinkelsen. Der blev i studiet konstateret store afvigelser mellem ankomstfordelingen i Vissim og på videooptagelserne. Den største effekt på forsinkelsen blev i studiet fundet ved at kalibrere ankomstfordelingen i Vissim, så den svarer til ankomstfordelingen i virkeligheden. [Buck, Mallig og Vortisch, 2017]

## 3.4 Signalcontrollere

Der findes forskellige styreformer til at regulere signalprogrammet i et signalreguleret kryds. Traditionelt set har signalanlæg været tidsstyrede, men i de senere år er der sket en overgang til, at alle nyopførte signalanlæg skal være trafikstyrede, medmindre der er tale om samordnede kryds. I dag har den teknologiske udvikling medført, at en ny tilgang til signalregulering er kommet på markedet i form af adaptiv signalstyring.

Den traditionelle trafikstyring forgår oftest med induktionsspoler i forskellige afstande fra stopstregen. Disse spoler giver anmeldelse, forlænger grønt samt sikrer korrekt nedlukning af fasen. Dette medfører, at signalet anvender information om trafikken i de punkter, hvor spolerne er placerede. I den traditionelle styring er der et fast tidspunkt, hvor valget om næste fase træffes. Desuden er der ofte fast faserækkefølge i anlæggene, der beskrives i fastlagte signalgruppeplaner. For at sikre, at alle trafikanter kommer ind, defineres maksimumsgrøntider samt visse kriterier, som sikrer at alle faser bliver aktiveret med jævne mellemrum. [Vejdirektoratet, 2018b]

Adaptiv signalstyring er en intelligent form for signalstyring, der tilpasser signalgruppeplanen til den aktuelle trafik i realtid. En af mulighederne for adaptiv signalstyring udvikles af Advanced Traffic Systems. ATS har udviklet en controller, der benytter machine learning til at styre signalanlæg i realtid. Controlleren benytter radardata til kontinuerligt at træffe beslutninger om, hvor der skal gives grønt. Der er ingen fast faserækkefølge og ingen maksimumsgrøntider. I stedet defineres kun minimumsgrøntider, og der benyttes maksimale ventetider til at sikre, at alle trafikanter kommer ind i krydset. [Eriksen m.fl., 2019]
Beslutningerne om fasevalg træffes i et program kaldet Uppaal Stratego. Dette program kommunikerer med Vissim igennem et Python-script, der benytter Vissims COM-modul. Herigennem sendes informationer om trafikken og signalkonfigurationen i modellen til Uppaal Stratego, der udregner den optimale signalkonfiguration og sender signalkonfigurationen igennem COM-modullet til Vissim. En illustration af ATS controllerens virkemåde kan ses på Figur 3.3.




***Figur 3.3.*** Illustration af ATS controllers samarbejde med Vissim. [Eriksen m.fl., 2019]

# Modelopbygning 4

Der opbygges en model af et firebenet signalreguleret kryds. Der laves en standardmodel, som arbejdet tager udgangspunkt i, hvorefter der laves variationer af modellen med forskellige geometriske og signaltekniske løsninger. Der beskrives, hvilke variationer der laves i signalanlægget, hvordan trafikken varieres, trafikinputtet til modellen og de forskellige trafikanttyper. Derudover beskrives nogle adfærdsparametre, der ikke er nævnt i vejreglen. Yderligere findes de nødvendige sikkerheds- og mellemtider, og der fastsættes detektorplaceringer til signalstyringen.

## 4.1 Scenarier

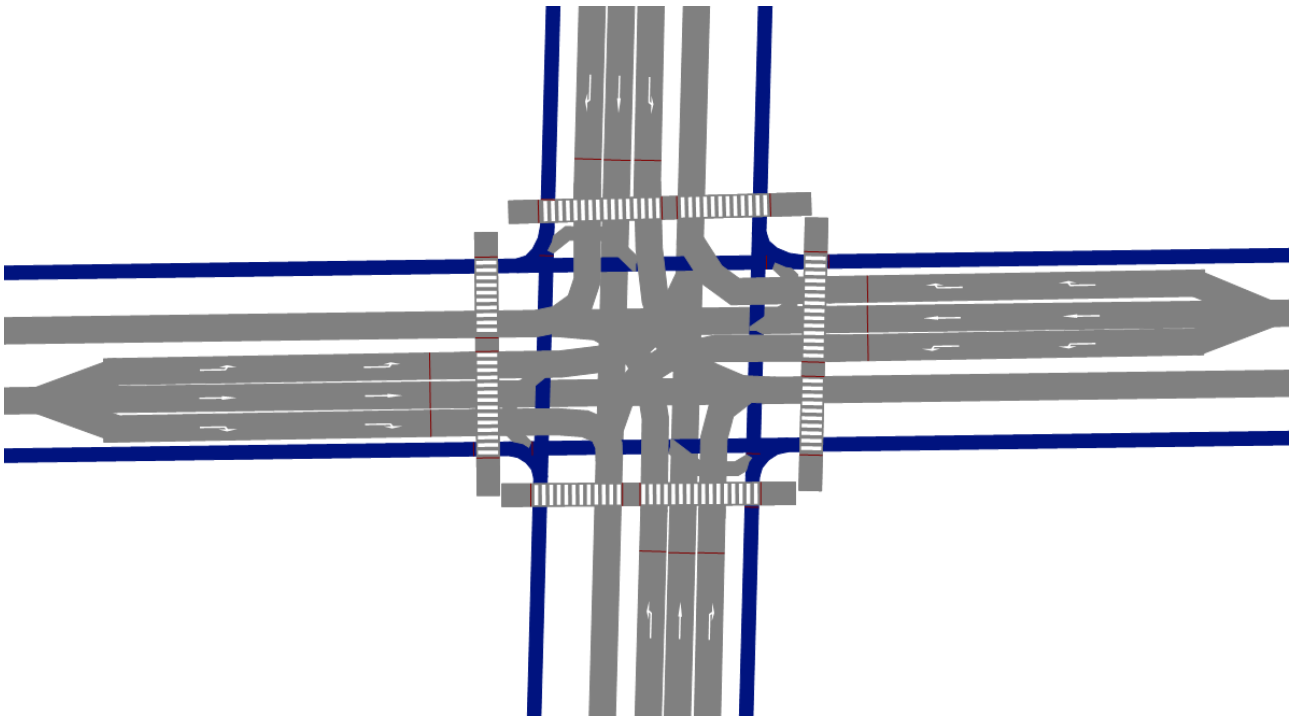
Der laves fem scenarier. Først præsenteres basisopbygningen af krydset, herefter de forskellige modifikationer, der laves i krydset.

De forskellige geometriske og signaltekniske variationer i krydset laves for at vurdere trafikafviklingen ved forskellige krydsopbygnigner. I basiskrydset afvikles trafikken i to faser, da hver retning kun har én fase. Hver enkelt krydsopbygning testes med stigende trafikmængder, indtil der opstår sammenbrud i trafikafviklingen, hvorefter der laves geometriske eller signaltekniske ændringer, og simuleringen gentages. Følgende scenarier vil blive undersøgt:

1. Basisscenarie
2. Svingpil med ét lys for både højre- og venstresvingende
3. Venstresvingspil med tre lys og højresvingspil med ét lys
4. To ligeudkørende spor gennem krydset, venstresvingspil med tre lys og højresvingspil med ét lys
5. To ligeudkørende spor op til og lige efter krydset med sammenfletning, venstresvingspil med tre lys og højresvingspil med ét lys

### 4.1.1 Scenarie 1: Basiskrydset

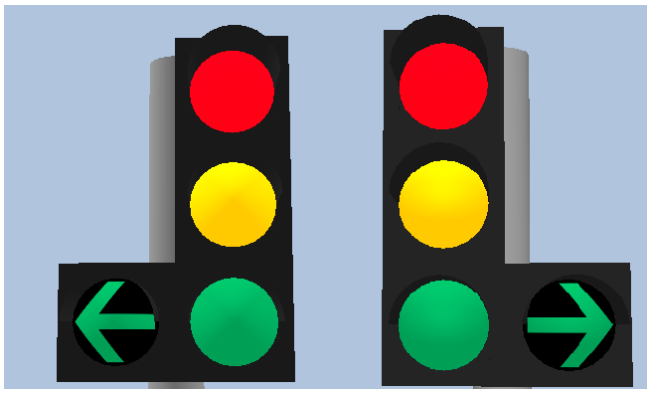
Krydset opbygges som et F-kryds med separat højre og venstre svingsbane på 50 m. Der er cykelsti og fodgængere i alle tilfarter til krydset. Signalstyringen er i første omgang simpel med kun hovedsignal og minimal trafikstyring, der udelukkende giver forlængelser. Der indsættes midterhelle for fodgængere på alle vejgrene i henhold til vejreglen Vejkryds i Byer, der anbefaler at etablere midterhelle i alle fodgængerfelter, der krydser mere end tre vognbaner [Vejdirektoratet, 2018d]. Krydset kan ses på Figur 4.1.



***Figur 4.1.*** Oversigtsbillede over basiskrydset i Vissim.

### 4.1.2 Scenarie 2: Svingpil med ét lys for både højre- og venstresvingende

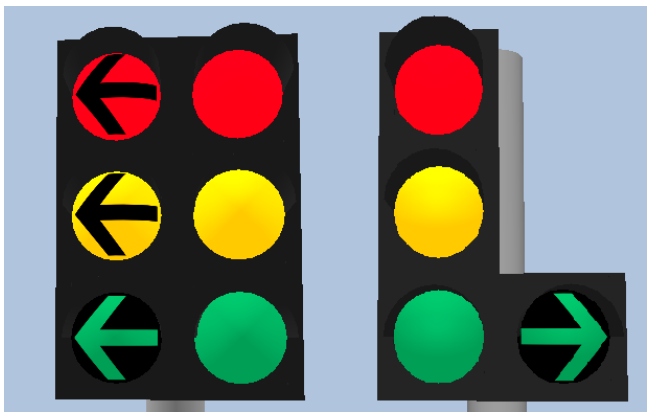
Scenarie 2 opbygges med svingpile for både højre- og venstresvingende trafikanter. Dette gør det muligt at give højresvingende fra nord og syd grøn svingpil samtidig med, at venstresvingende fra øst og vest har grøn svingpil. Disse fire svingpile aktiveres altid samtidig, når der er behov for øget venstresvingskapacitet. Ligeledes vil højresvingende fra øst og vest få grøn pil samtidig med venstresvingede fra nord og syd. Signalet fra scenarie 4 kan ses på Figur 4.2.



***Figur 4.2.*** Kombination med 1-lys højre- og venstresvingspil.

### 4.1.3 Scenarie 3: Venstresvingspil med tre lys og højresvingspil med ét lys

I scenarie 3 indsættes bundet venstresving. Dette gøres for at undersøge bundet venstresvings indflydelse på kapaciteten og trafikafviklingen i krydset. Bundet venstresving har en trafiksikkerhedsmæssig fordel, da venstresvingende altid bliver afviklet konfliktfrit. Dette er grundet at venstresvingende ikke må køre ved grønt lys på hovedsignalet, men kun ved grøn svingpil. Lyssignalet ved bundet venstresving kan ses på Figur 4.3.



***Figur 4.3.*** Løsning med 3-lys venstresvingspil og 1-lys højresvingspil.

### 4.1.4 Scenarie 4: To ligeudkørende spor gennem krydset, venstresvingspil med tre lys og højresvingspil med ét lys

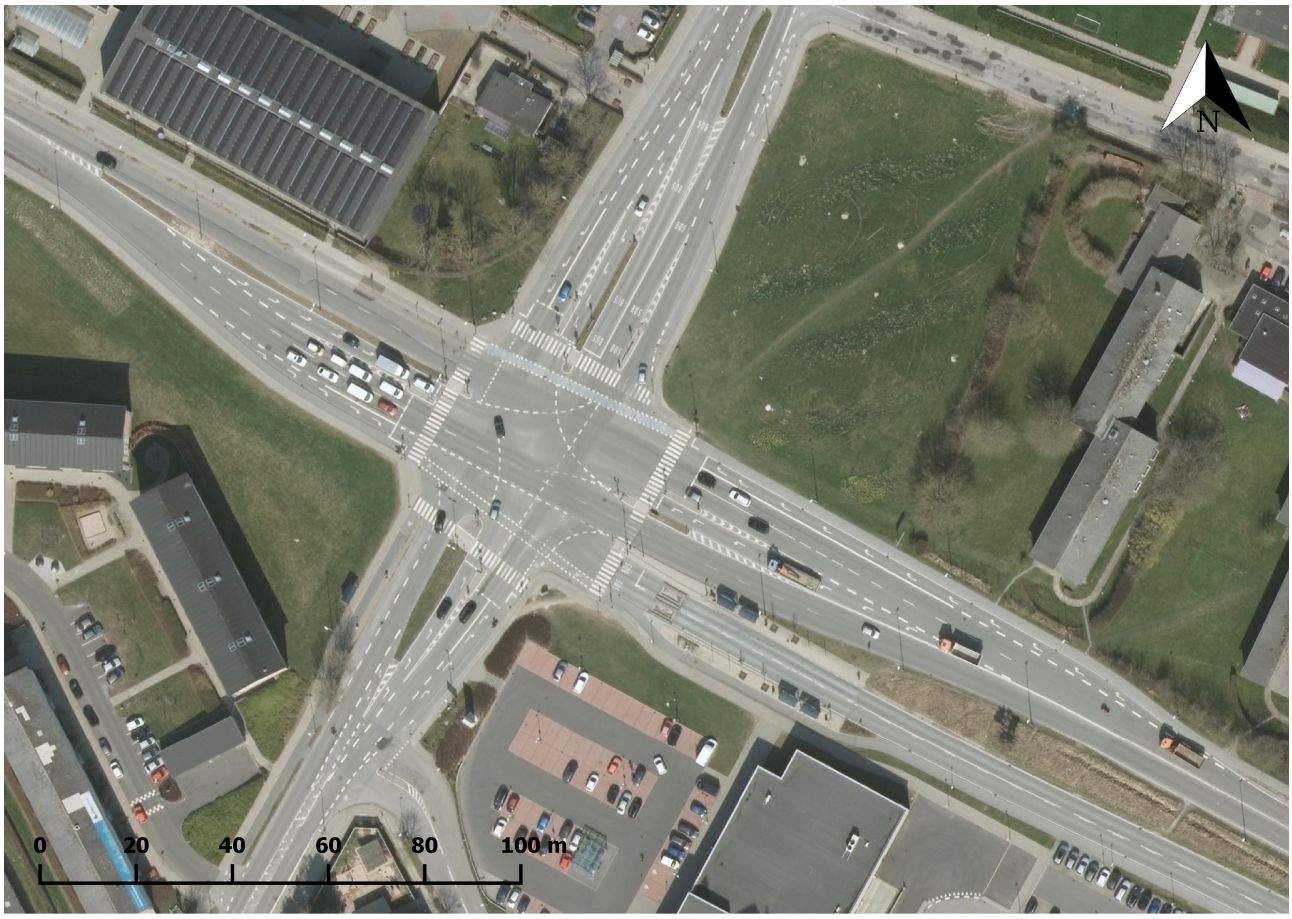
I scenarie 4 ændres den geomteriske opbygning af krydset, så der er to gennemgående ligeudkørende spor på alle vejgrene. Et eksempel på to ligeudkørende spor igennem et kryds kan ses på Figur 4.4.

***Figur 4.4.*** Billede af signalreguleret kryds med to gennemkørende ligeudkørende spor.

### 4.1.5 Scenarie 5: To ligeudkørende spor op til og lige efter krydset med sammenfletning, venstresvingspil med tre lys og højresvingspil med ét lys

I scenarie 5 opbygges geometrien i krydset, så der i områder umiddelbart før og efter krydset er to ligeudkørende spor, hvorefter vejen sammenflettes til ét kørespor. Denne løsning undersøges, da det økonomisk er en bedre løsning end scenarie 4, da asfalt- og arealforbruget mindskes ved, at det kun

er i krydsområdet, at vejen udvides til to ligeudkørende spor. Et eksempel på dette kan ses på Figur 4.5.

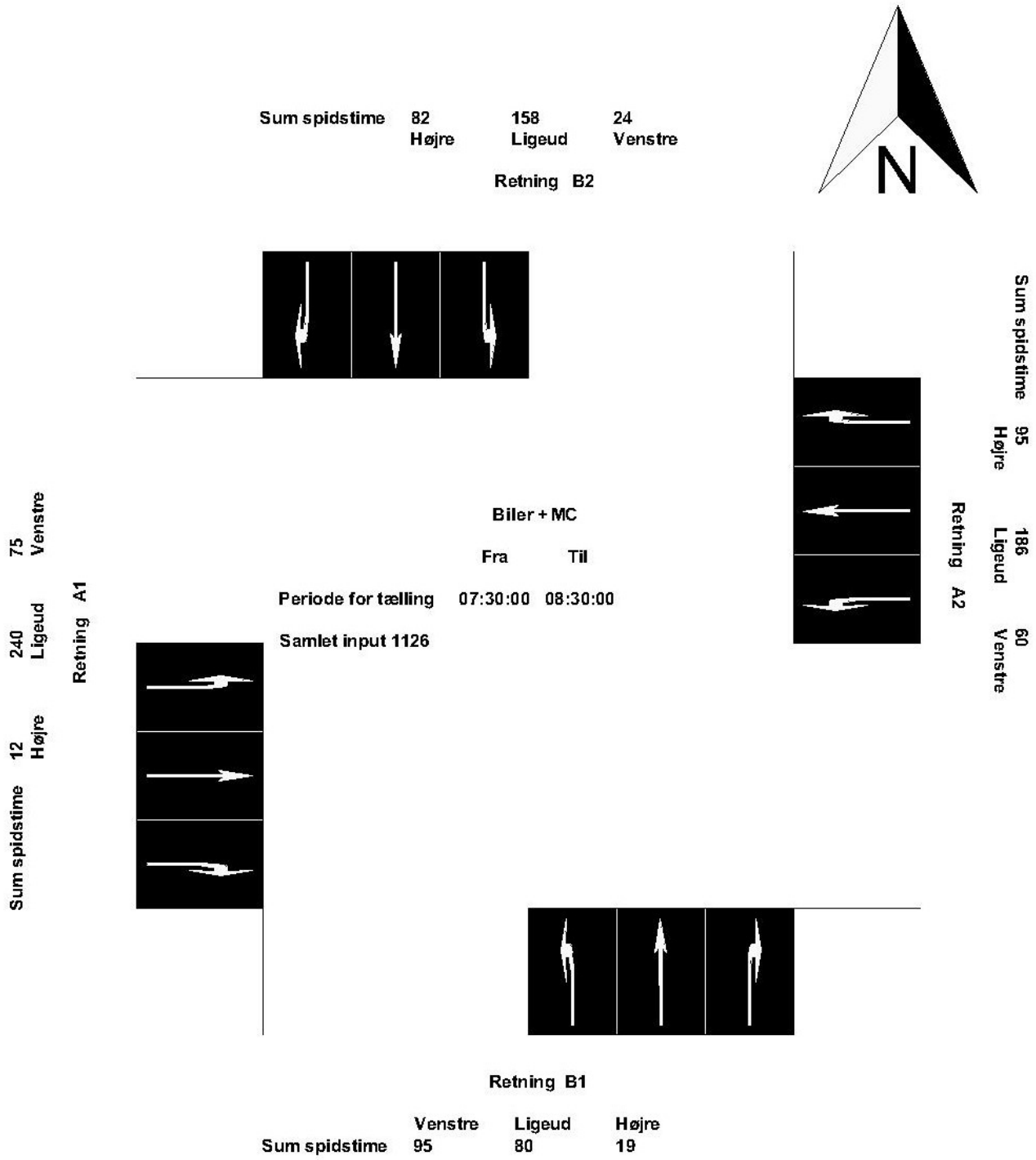



***Figur 4.5.*** Billede af signalreguleret kryds, hvor der i krydsområdet er udvidet til to ligeudkørende spor. Der skal ses bort fra busbanen i sydøstlige del af krydset.

## 4.2 Trafikale input til modellen

Trafikinputtet samt fordelingerne i hver gren er fastsat ud fra trafikfordelinger fra et repræsentativt kryds i Aalborg. I dette tilfælde er krydset mellem Dannebrogsgade og Kastetvej valgt, da geometrien er tilsvarende, og trafikmængderne er vurderet passende. Til estimering af fodgængere og cyklister er en krydstælling fra Aarhus Kommune anvendt til at finde forholdet mellem bilister og cykler samt forholdet mellem bilister og fodgængere. Dette er gjort, da cykler og fodgængere ikke er medtaget i Aalborg Kommunes krydstællinger. Forholdene mellem antal biler og antal bløde trafikanter fra tællingen i Aarhus er anvendt på trafikmængderne i modelkrydset, hvorudfra input for cykler og fodgængere er dannet. Antallet af cykler udgjorde 28 % af den samlede biltrafik, hvor tallet for fodgængere var 9 %. Det antages, at cyklisternes svingbevægelser er identiske med bilernes. For fodgængere defineres inputtet som 9 % af biltrafikken i samme køreretning.

Biltrafikken fra krydstællingen ved Dannebrogsgade og Kastetvej ses på Figur 4.6. Motorcykler er inkluderet i disse tal.




***Figur 4.6.*** Trafiktal for biltrafikken i krydset ved Dannebrogsgade og Kastetvej.

Alle input kan ses i Bilag A Trafikinput.

I tællingen er lastbiler og busser angivet som én kategori. Det er antaget, at 50 % af dette tal er lastbiler, og 50 % er busser. Denne fordeling er valgt ud fra, at krydset gennemkøres af en højfrekvent busrute. Dette medfører, at der i gennemsnit kommer 6 busser i timen fra hver af de fire vejgrene i krydset. Det maksimale antal busser på et kvarter er 5, hvilket forekommer i ét kvarter på to af vejgrenene.

Af lastbilerne er det antaget, at 15 % er sættevognstog, 15 % er forvogn-hænger og de resterende 70 % er sololastbiler. Dette er gjort på baggrund af, at krydset fra tællingen er placeret i bymæssig bebyggelse, hvorfor de større lastbiler ikke ses så ofte som sololastbiler.

## 4.3 Adfærdsparametre

Modellen opbygges som udgangspunkt i henhold til vejreglen "Anvendelse af mikrosimuleringsmodeller". Denne vejregel indeholder anbefalede empiriske værdier, der er tilpasset den danske trafik [Vejdirektoratet, 2019]. Cykeladfærd er ikke beskrevet i vejreglen for mikrosimulering, hvorfor cykeladfærden er opbygget efter en rapport lavet af COWI og Københavns Kommune, der handler om at simulere cykeltrafikken bedst muligt. Rapporten bygger på flere lokaliteter og simulerer trafikken i den københavnske myldretid [COWI og Københavns Kommune, 2012].

Busser og fodgængere mangler der data for i vejreglen og øvrige studier, hvorfor en del af deres adfærdsparametre er sat til Vissims standardværdier. Bussernes hastighed antages tilsvarende lastbilers, og fodgængeres hastighed er bestemt ud fra litteratur på området samt danskernes aldersfordeling.

For at danne et realistisk billede af fodgængernes afvikling benyttes standardværdier for fodgængeres hastighed, som ifølge et studie fra DTU varierer fra 0,7 m/s til 1,8 m/s for hhv. kvinder med småbørn og unge mennesker. Dette studie benyttes, da det indeholder detaljeret inddeling af fodgængerhastigheder på forskellige aldersgrupper og køn. [Herrstedt, 1981] Vejreglen for signalanlæg regner sikkerhedstider ud fra ganghastigheder på mellem 0,7 og 1,5 m/s, hvor normal gang er defineret til mellem 1,2 og 1,5 m/s, hvilket er i overensstemmelse med førnævnte studie fra DTU [Vejdirektoratet, 2018b]. Aldersfordelingen for den danske befolkning findes på Danmarks Statistik, hvorefter ganghastigherne for mænd og kvinder i forskellige aldersgrupperne kan fordeles [Herrstedt, 1981] [Danmarks Statistik, 2019]. Fordelingen af ganghastigheder kan ses i Tabel 4.1.

| Ganghastighed [m/s] | 0,7 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Akkumuleret % | 6,26 | 11,83 | 31,54 | 47,18 | 61,65 | 72,60 | 81,32 | 100 |

***Tabel 4.1.*** Fordeling af ganghastigheder [Herrstedt, 1981] [Danmarks Statistik, 2019].

## 4.4 Sikkerhedstider

Sikkerhedstiderne i krydset fastsættes i henhold til vejreglen Projektering af Trafiksignaler. Sikkerhedstiden er defineret som den mindste tid, der af trafiksikkerhedsmæssige årsager er nødvendig fra det grønne lys slukkes i den ene trafikstrøm, til det grønne lys tændes i en konflikterende trafikstrøm. [Vejdirektoratet, 2018b]

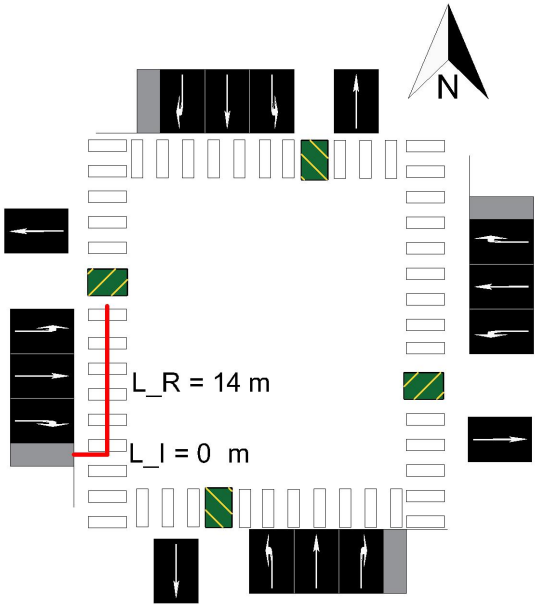
Følgende formel anvendes til at udtrykke sikkerhedstiden:

$$T_{sik} = (L_R + K_L)/V_R - L_I/V_I + T_E$$

Hvor:
$T_{sik}$ = Sikkerhedstiden
$L_R$ = Den rømmende trafikants afstand fra stopstregen til den fjerneste side af konfliktområdet
$K_L$ = Køretøjers længde
$V_R$ = Den rømmende trafikants hastighed
$L_I$ = Den indkørende trafikants afstand fra stopstregen til begyndelsen af konfliktområdet
$V_I$ = Den indkørende trafikants hastighed
$T_E$ = Tiden efter ophør af grønt, hvor den sidste rømmende trafikant krydser stopstregen

Der udregnes sikkerhedstider for alle potentielle konflikter i krydset. En af de dimensionsgivende konflikter opstår, når en fodgænger træder ud fra stopstregen ved midterhellen i sidste øjeblik.

Fodgængerens mest kritiske konflikt vil være med ligeudkørende cyklister, der har fremtrukket stopstreg og dermed vil køre ind i konfliktområdet med det samme, når de får grønt lys. Denne konflikt kan ses på Figur 4.7, hvor afstandene $L_R$ og $L_I$ også er illustreret.




***Figur 4.7.*** Illustration af konflikt, hvor en fodgænger er den rømmende trafikant, og en cyklist er den første indkørende trafikant. Konflikten ses indtegnet med rød streg.

Hastigheder, køretøjslængder og passagetid efter grønt fastsættes i henhold håndbogen om Projektering af Trafiksignaler. Hastigheden $V_R$ for den rømmende fodgænger kan ifølge håndbogen sættes til 0,7-1,5 m/s. For en rømmende fodgænger er køretøjslængden $K_L$ 0 m, og passagen efter grønt $T_E$ 0 sek. Hastigheden $V_I$ for den indkørende cyklist sættes til 10 m/s. [Vejdirektoratet, 2018b]

Hastigheden $V_R$ har betydning for udregningen af sikkerhedstider for fodgængere i krydset. Som tidligere nævnt anbefales der i vejreglerne at sætte hastigheden i intervallet 0,7-1,5 m/s. Herunder er vist tre eksempler på udregningen. Det første er udregnet med 0,7 m/s for at få den største sikkerhed, det sidste er regnet med 1,5 m/s for at få den bedste trafikafvikling og det midterste er regnet med 1,1 m/s for at få en mellemting mellem de to.

$$T_{sik} = (14\ m + 0\ m)/0,7\ m/s - 0\ m/10\ m/s + 0\ s = 20\ s$$

$$T_{sik} = (14\ m + 0\ m)/1,1\ m/s - 0\ m/10\ m/s + 0\ s = 12,7\ s$$

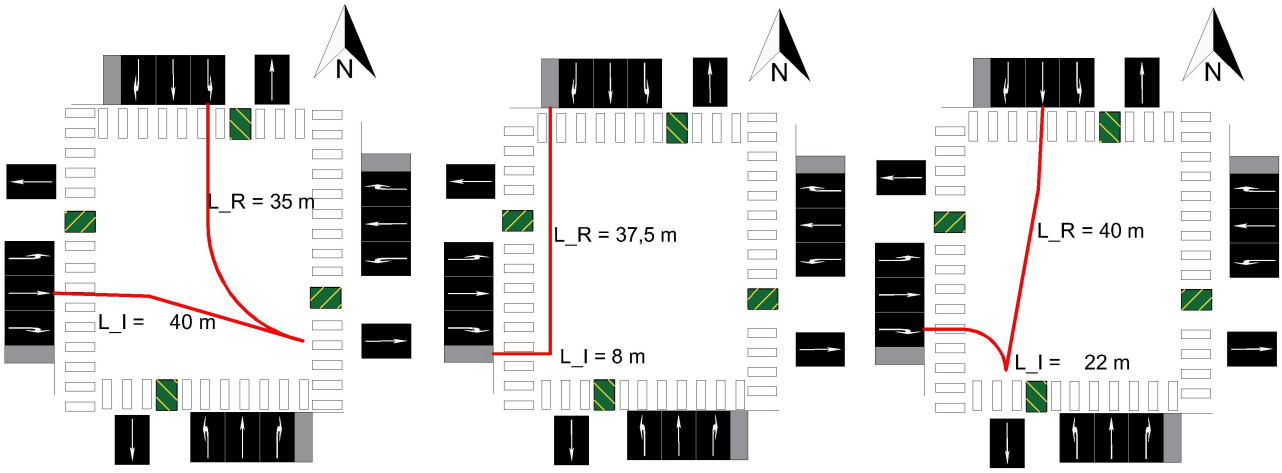
$$T_{sik} = (14\ m + 0\ m)/1,5\ m/s - 0\ m/10\ m/s + 0\ s = 9,3\ s$$

Som det ses af ovenstående resultater, varierer de udregnede sikkerhedstider fra 10 til 20 sek. alt efter, om der regnes med fodgængerhastigheder på 0,7 eller 1,5 sek.

Ønskes det at have fokus på trafiksikkerheden, fås en sikkerhedstid på 20 sek, hvis alle fodgængere skal have tilstrækkelig tid til at rømme krydset. De 20 sek. er den sikkerhedsmæssigt mindste acceptable tid fra grønt for fodgængere ophører til den konfliktende trafikstrøm får grønt. Dette vil begrænse fleksibiliteten i signalprogrammet, da den lange sikkerhedstid vil medføre lange minimmumsgrøntider. Dette skyldes, at fodgængeres grønne lys skal lukke ned et stykke tid før hovedsignalet for at undgå lange perioder med alt rødt, hvis de 20 sek. sikkerhedstid skal overholdes.

Baseret på udleveret signaldokumentation fra Aarhus Kommune og Aalborg Kommune, vurderes den midterste udregning med en sikkerhedstid på 13 sek. at være mest tilsvarende, hvad der i praksis anvendes. Det vælges i dette projekt at udføre simuleringerne både ud fra, at sikkerhedstiden er 20 sek. og at sikkerhedstiden er 13 sek. Herefter vil resultaterne blive sammenlignet.

Da krydset er symmetrisk opbygget, antages sikkerhedstiderne at være identiske for alle fire vejgrene. De udregnede sikkerhedstider antages dermed at være gældende i alle fire retninger. De resterende dimensionsgivende konflikter ses på Figur 4.8.




***Figur 4.8.*** Illustration af dimensionsgivende konflikter i krydset.

Sikkerhedstiderne kan ses i Tabel 4.2.

| Konflikt | Sikkerhedstid [s] |
|---|---|
| Venstresvingende bil overfor ligeudkørende bil | 4 |
| Ligeudkørende bil overfor højresvingende bil | 5 |
| Fodgænger overfor ligeudkørende cyklist ($V_R = 0,7\ m/s$) | 20 |
| Fodgænger overfor ligeudkørende cyklist ($V_R = 1,1\ m/s$) | 13 |
| Ligeudkørende cyklist overfor ligeudkørende cyklist | 8 |

***Tabel 4.2.*** De dimensionsgivende sikkerhedstider.

### 4.4.1 Mellemtider

Efter de nødvendige sikkerhedstider er fastlagt, kan mellemtiderne bestemmes. Mellemtiderne er tiden fra grønt ophører i én retning, til grønt starter i en anden retning. Mellemtiden regnes som sikkerhedstiden plus evt. tillæg. Den må dermed ikke være kortere end sikkerhedstiden.

Mellemtiden består af gult efter ophør af grønt, rødt i alle retninger og rød-gult signal før skift til grønt. Jævnfør paragraf 226 i Bekendtgørelse om Anvendelse af Vejafmærkning, skal gul signaltid være 4 sek. og rød-gult skal være 2 sek. [Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019]. Dette medfører, at der skal indsættes 2 sekunder med rødt lys i alle retninger, hvis de 8 sekunders sikkerhedstid for ligeudkørende cyklister i Tabel 4.2 skal overholdes.

En samlet mellemtid for hovedsignalerne på 8 sek. medfører, at grønt signal for fodgængere skal ophøre 12 sek. før grønt ophører på hovedsignalet, hvis fodgængere skal have 20 sek. mellemtid. Hvis fodgængere skal have 13 sek. mellemtid, skal fodgængeres grønt ophøre 5 sek. før hovedsignalets grønt ophører. Dette er baseret på sikkerhedstiderne beregnet i Tabel 4.2.

## 4.5 Detektorer til trafikstyring

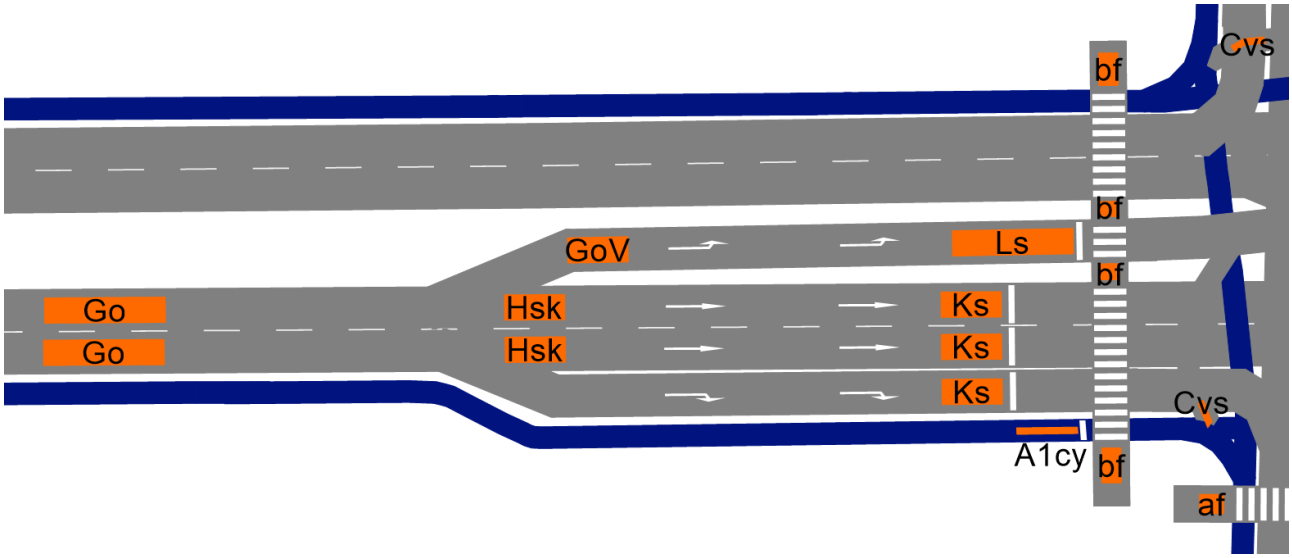
Der indsættes detektorer i krydset i henhold til vejreglen om Projektering af Trafiksignaler [Vejdirektoratet, 2018b]. Spolerne indsættes ved alle stopstreger for både bilister, cyklister og fodgængere. Derudover indsættes detektorer i større afstande til stopstregerne.

Detektorerne af typerne Ks, bf, A1cy og Cvs bruges udelukkende til anmeldelse af stillestående trafik, der kan aktivere faseskift for de pågældende trafikanter. Disse er placeret ved stopstregerne for ligeudkørende og højresvinge bilister, ligeudkørende og venstresvingende cyklister samt fodgængere.

Ved stopstregen i venstresvingsbanen indsættes en detektor af typen Ls, der bruges både til anmeldelse og forlængelse. I venstresvingssporet placeres også en detektor af typen GoV, der placeres for at kunne detektere venstresvingende trafikanter tidligere samt forbedre forlængelsen af fasen. GoV-detektoren er kun til stede i scenarie 3, 4 og 5, hvor der er bundet venstresving. I scenarie 1 og 2 afvikles venstresvingende trafikanter også på hovedsignalet, hvorfor det ikke er nødvendigt at detektere dem tidligt i forløbet.

Yderligere placeres Go og Hsk-detektorer, der anvendes til grøntidsforlængelse. Derudover sikrer disse detektorer, at der ved ophør af grønt ikke befinder sig trafikanter i dilemma- og valgzonen.

Ved hjælp af ovenstående detektorer, kan alle trafikanter i krydset detekteres af mindst én detektor. Placeringen af detektorer i krydset kan ses på Figur 4.9.




***Figur 4.9.*** Placering af detektorer i modelkrydset. Billedet er taget i Scenarie 4 med to ligeudspor og 3-lys venstresvingspil.

Detektorernes funktion og placering fastsættes i henhold til vejreglen om Projektering af Trafiksignaler. Ved en hastighedsgrænse på 50 km/t skal Go-detektorer placeres 80 m før stopstregen, og Hsk skal placeres 47 m før stopstregen. For de detektorer, der anvendes til forlængelser, skal der defineres en intervaltid. Intervaltiden er den den tid, der maksimalt kan gå mellem spolen bliver aktiveret af ét køretøj og det næstfølgende køretøj. Går der længere tid end intervaltiden mellem de to køretøjer, startes nedlukningen af det grønne signal, og overgangen til næste fase påbegyndes. Der anvendes kun én intervaltid i hele forlængelsesperioden. En samlet oversigt over detektorerne og deres funktioner kan ses i Tabel 4.3. [Vejdirektoratet, 2018b]

| Detektornavn | Afstand fra stopstreg [m] | Anmeldelse | Forlængelse | Intervaltid [s] |
|---|---|---|---|---|
| Go | 80 | x | x | 2,7 |
| GoV | 40 | x | x | 2,2 |
| Hsk | 47 | x | x | 0,9 |
| Ls | 0 | x | x | 1,0 |
| Ks | 0 | x | - | - |
| bf | 0 | x | - | - |
| A1cy | 0 | x | - | - |
| Cvs | 0 | x | - | - |

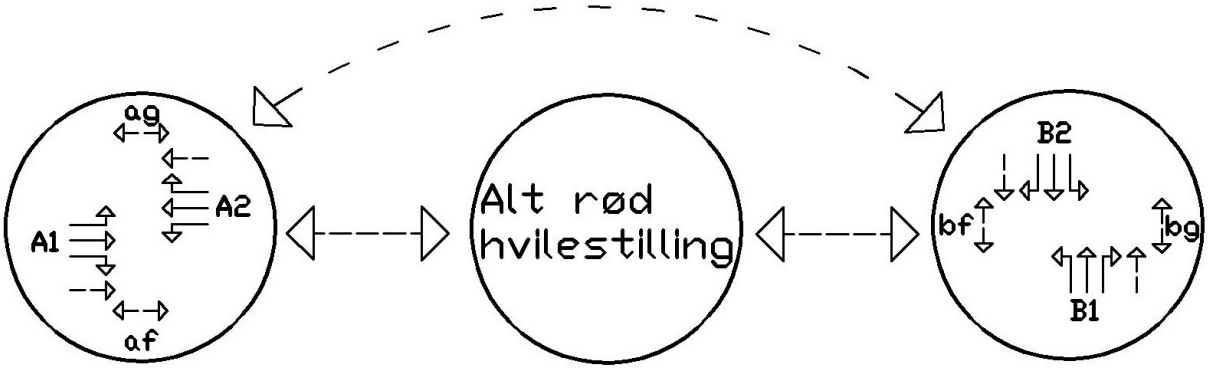
***Tabel 4.3.*** Skema over anvendte detektorer i signalanlægget samt deres funktioner og afstand fra stopstregen. [Vejdirektoratet, 2018b]

## 4.6 Opbygning af signalprogram

Der anvendes tre forskellige signalprogrammer i de forskellige modeller, der simuleres på. Det første signalprogram bruges i scenarie 1, hvor der ikke er svingpile. Det andet signalprogram bruges i scenarie 2, hvor der er ubundne svingpile for både højre- og venstresvingende. Det tredje signalprogram bruges i scenarie 3, 4 og 5, hvor der er bundet venstresving og og ubundet højresving.

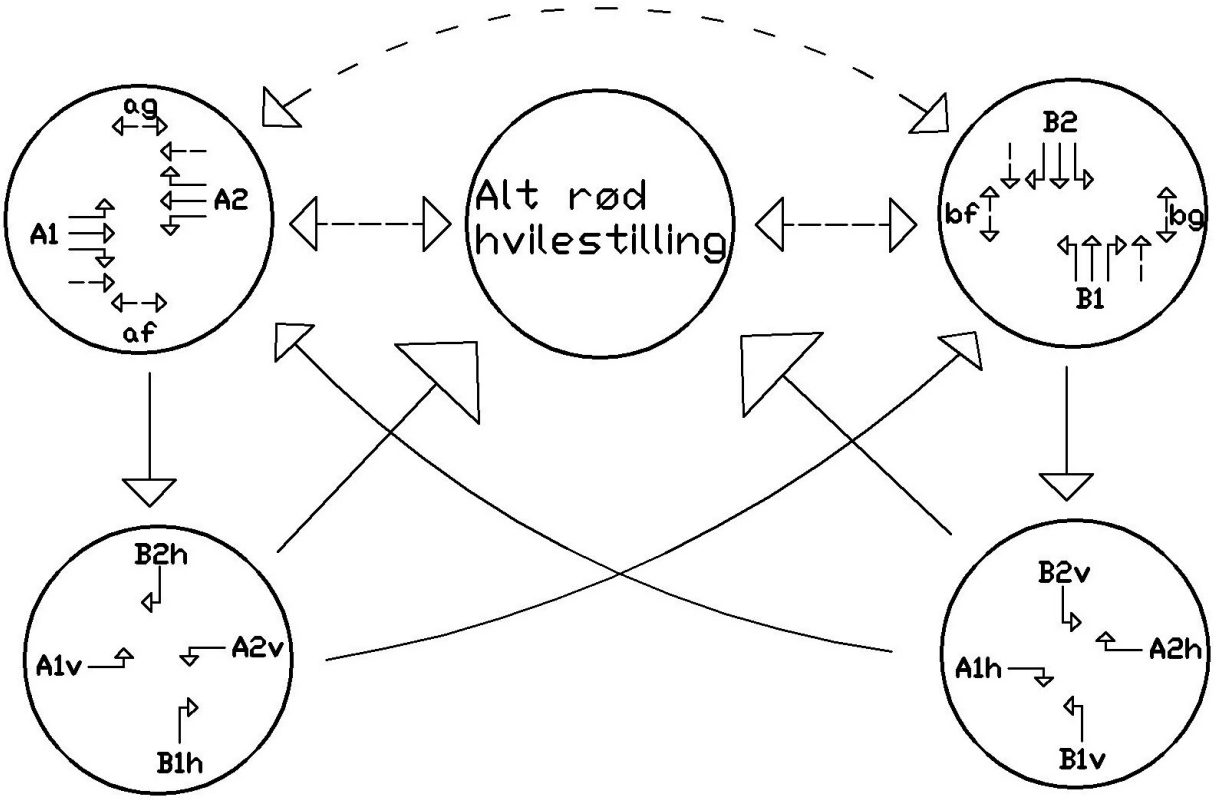
Der anvendes alt rødt hvilestilling i signalanlægget i alle scenarier. Dette vil sige, at alle signaler i krydset vil have rødt, når der ikke er behov for grønt i nogen retninger. Fordelen ved denne hvilestilling er, at ankommende trafik i trafiksvage perioder kan betjenes mere effektivt, da mellemtiden undgås. Dermed kan der åbnes hurtigere op for grønt lys, når en indkommende trafikant detekteres. Alt rødt hvilestilling kræver, at der er detektorer i alle tilfarter, så alle trafikanter kan anmelde sin ankomst. [Vejdirektoratet, 2018b]

Fasediagrammet for signalprogrammet i Scenarie 1 kan ses på Figur 4.10. Der er i Scenarie 1 kun to faser samt den røde hvilestilling.



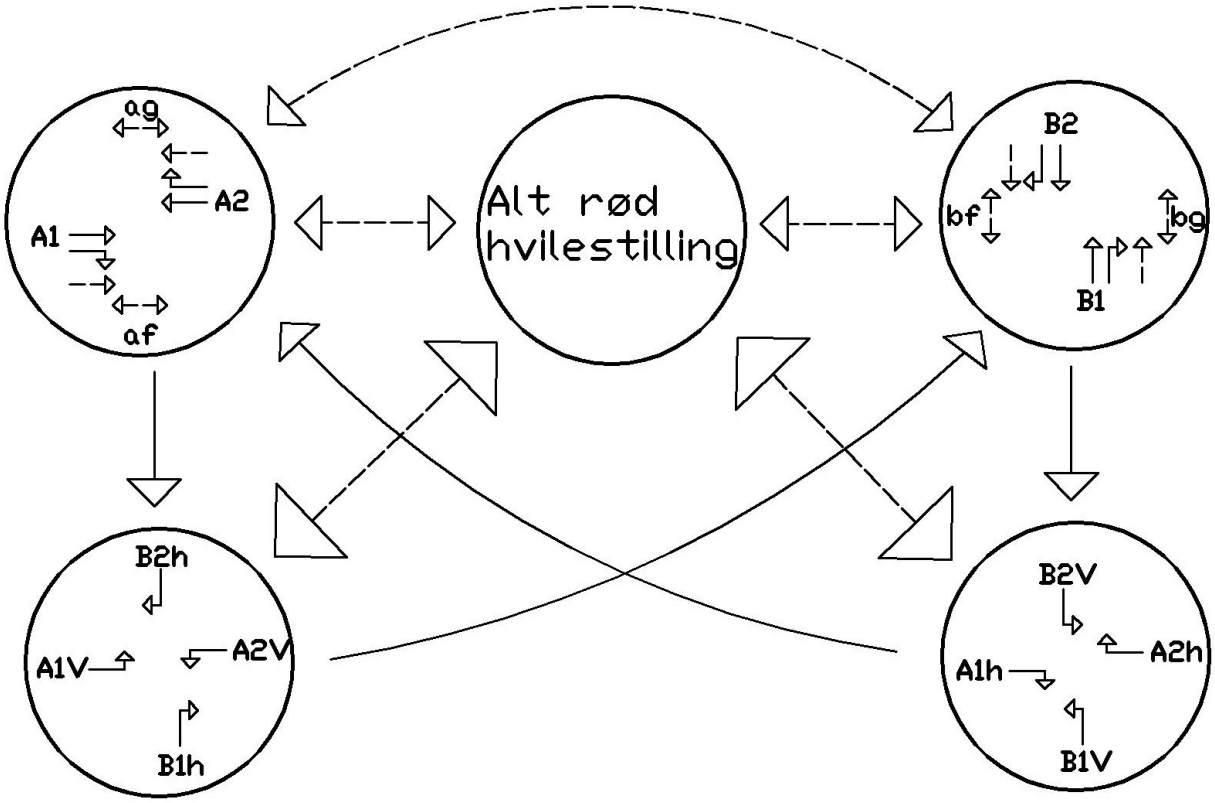

***Figur 4.10.*** Fasediagram for Scenarie 1.

Fasediagrammet for Scenarie 2 kan ses på Figur 4.11. Der er indsat en svingfase med samtidigt grønt for venstresvingende fra A1 og A2 samt højresvingende fra B1 og B2 og en modsat svingfase med højresvingende fra A1 og A2 samt venstresvingende fra B1 og B2. Da der ikke er bundet sving, må både højre- og venstresvingende trafikaner stadig køre ved grønt hovedsignal. Fra rød hvilestilling kan kun hovedfaserne aktiveres, og svingfaserne kan dermed kun aktiveres efter hovedfasen.




***Figur 4.11.*** Fasediagram for Scenarie 2.

Fasediagrammet for Scenarie 3, 4 og 5 kan ses på Figur 4.12. I disse scenarier er der bundet venstresving. Forskellen fra fasediagrammet for Scenarie 2 ses i, at de venstresvingende ikke må køre ved grønt hovedsignal, da der er 3-lys venstresvingspil. Dette medfører også, at svingfaserne godt kan aktiveres direkte fra rød hvilestilling.




***Figur 4.12.*** Fasediagram for Scenarie 3, 4 og 5.

### 4.6.1 Minimum og maksimum grøntider

De minimale og maksimale grøntider for signalgrupperne i krydset fastsættes ud fra trafikfordelingerne. Da hovedretninger har 33 % højere trafikmængder end sekundærretning, laves den maksimale grøntid også 33 % længere. Den maksimale grøntid er 40 sek. for hovedretningen og 30 sek. for sekundærretningen. Svingfaserne har minimumsgrøntid på 4 sek. som defineret for trafikstyrede svingpile i Bekendtgørelse om Anvendelse af Vejafmærkning [Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019]. Svingfasernes maksimumsgrøntid er fastsat på baggrund af signaldokumentation fra eksisterende kryds. Fodgængere har en minimumsgrøntid på 8 sek. Da fodgængeres sikkerhedstid er udregnet i to tilfælde i dette projekt, vil der være to forskellige minimums- og maksimumsgrøntider for signalgrupperne. Fodgængeres grønt skal ophøre enten 5 eller 12 sek. før hovedsignalerne for at overholde sikkerhedstiderne, hvilket medfører minimumsgrøntider for hovedsignalerne på hhv. 13 og 20 sek. ved de to forskelliges sikkerhedstider for fodgængere. Alle minimale og maksimale grøntider kan ses i Tabel 4.4.

| Signalgruppe | Min. grøntid 1 [s] | Maks. grøntid 1 [s] | Min. grøntid 2 [s] | Maks. grøntid 2 [s] |
|---|---|---|---|---|
| A1 | 20 | 40 | 13 | 40 |
| A1cy | 20 | 40 | 13 | 40 |
| A1h | 4 | 10 | 4 | 10 |
| A1v/A1V | 4 | 11 | 4 | 11 |
| A2 | 20 | 40 | 13 | 40 |
| A2cy | 20 | 40 | 13 | 40 |
| A2h | 4 | 10 | 4 | 10 |
| A2v/A2V | 4 | 11 | 4 | 11 |
| B1 | 20 | 30 | 13 | 30 |
| B1cy | 20 | 30 | 13 | 30 |
| B1h | 4 | 10 | 4 | 10 |
| B1v/B1V | 4 | 11 | 4 | 11 |
| B2 | 20 | 30 | 13 | 30 |
| B2cy | 20 | 30 | 13 | 30 |
| B2h | 4 | 10 | 4 | 10 |
| B2v/B2V | 4 | 11 | 4 | 11 |
| af | 8 | 28 | 8 | 35 |
| ag | 8 | 28 | 8 | 35 |
| bf | 8 | 18 | 8 | 25 |
| bg | 8 | 18 | 8 | 25 |

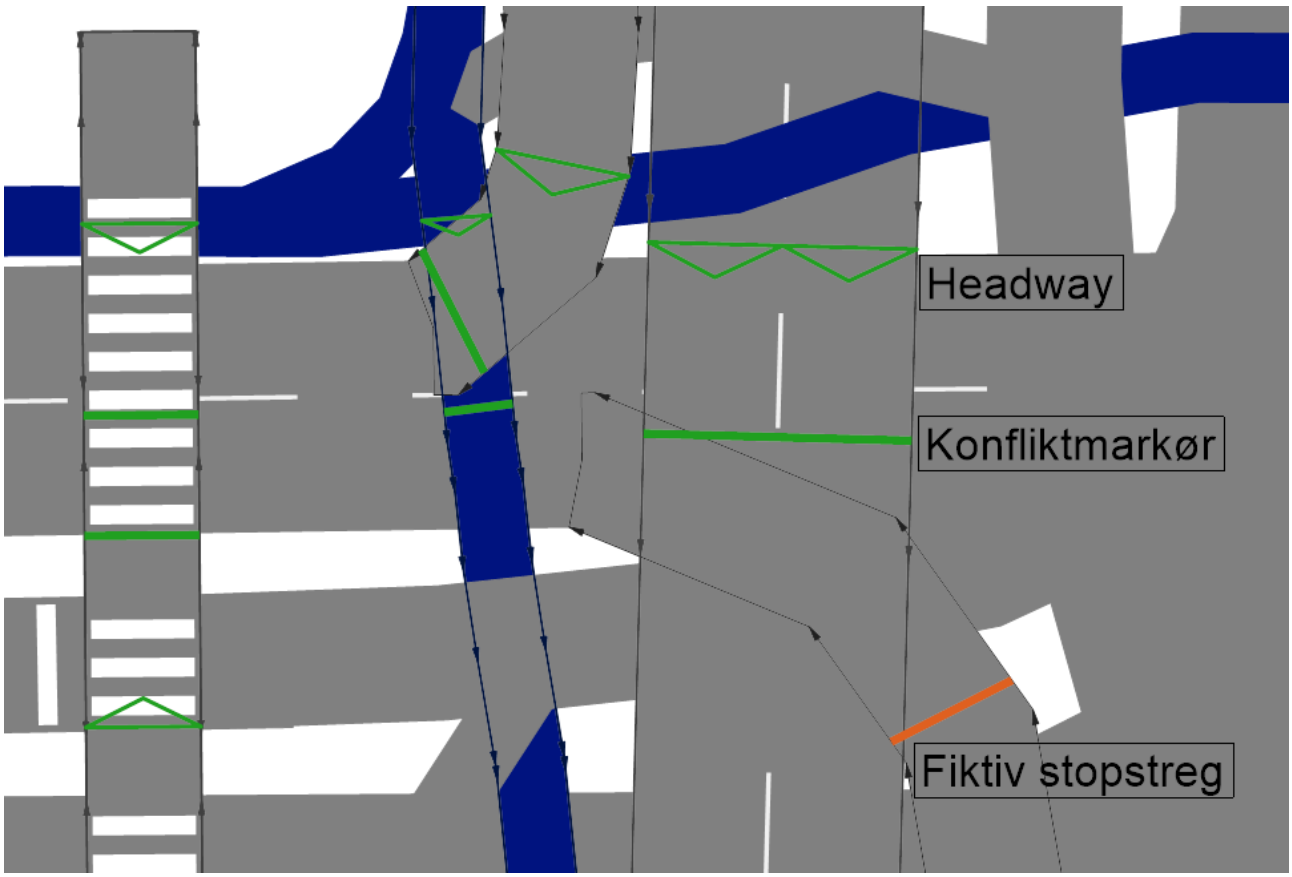
***Tabel 4.4.*** Minimums- og maksimumsgrøntider for de forskellige signalgrupper. Grøntid 1 er ud fra en sikkerhedstid på 20 sek. forgængere. Grøntid 2 er ud fra en sikkerhedstid på 13 sek. for fodgængere.

## 4.7 Vigepligter og konfliktområder

I modellen skal der defineres vigepligter for sekundære konflikter, der kan opstå i signalanlægget. Det vil primært være svingende trafik, der skal holde tilbage for flere trafikstrømme. I scenarie 1 og 2 skal både højre- og venstresvingende trafikanter vigepligtsreguleres, hvor det i scenarie 3, 4 og 5 kun er højresvingende, da det bundne venstresving afvikles konfliktfrit.

I Vissim kan vigepligter enten opbygges som vigepligter med konfliktmarkører eller som konfliktområder. Ved en opbygning af vigepligter for en venstresvingende trafikant, vil der opstå potentielle konflikter med fire andre trafikstrømme: ligeudkørende bilister, højresvingende bilister, ligeudkørende cyklister og fodgængere.

Et eksempel på en modellering af disse vigepligter med konfliktmarkører kan ses på Figur 4.13.




***Figur 4.13.*** Placering af fiktiv stopstreg, konfliktmarkør og headwaymarkør for en venstresvingende trafikant.

På Figur 4.13 ses de tre elementer i opbygningen af vigepligter med konfliktmarkører:

- Fiktiv stopstreg - Stopstregen hvor den venstresvingende trafikant holder stille og venter, til svingbevægelsen kan gennemføres.
- Konfliktmarkør - Den grønne streg definerer starten på konfliktzonen.
- Headway - Den grønne trekant definerer starten på headwayområdet. Headways fungerer ved, at området mellem headwaymarkøren og konfliktmarkøren skal være tomt for trafikanter, før den venstresvingende trafikant vil passere den fiktive stopstreg.

Udover headway, skal der også defineres en gap time til at definere kriteriet for passage. Gap time definerer tiden til den næste trafikant ankommer til konfliktmarkøren. Hvis der eksempelvis er en gap time på 5 sek. vil trafikanten ved den fiktive stopstreg holde stille, så længe der er under 5 sek. til næste trafikant ankommer til konfliktmarkøren. Normalvis benyttes gap time som det primære kriterie, hvor headway benyttes til at sikre mod situationer, hvor der er opstået kø.

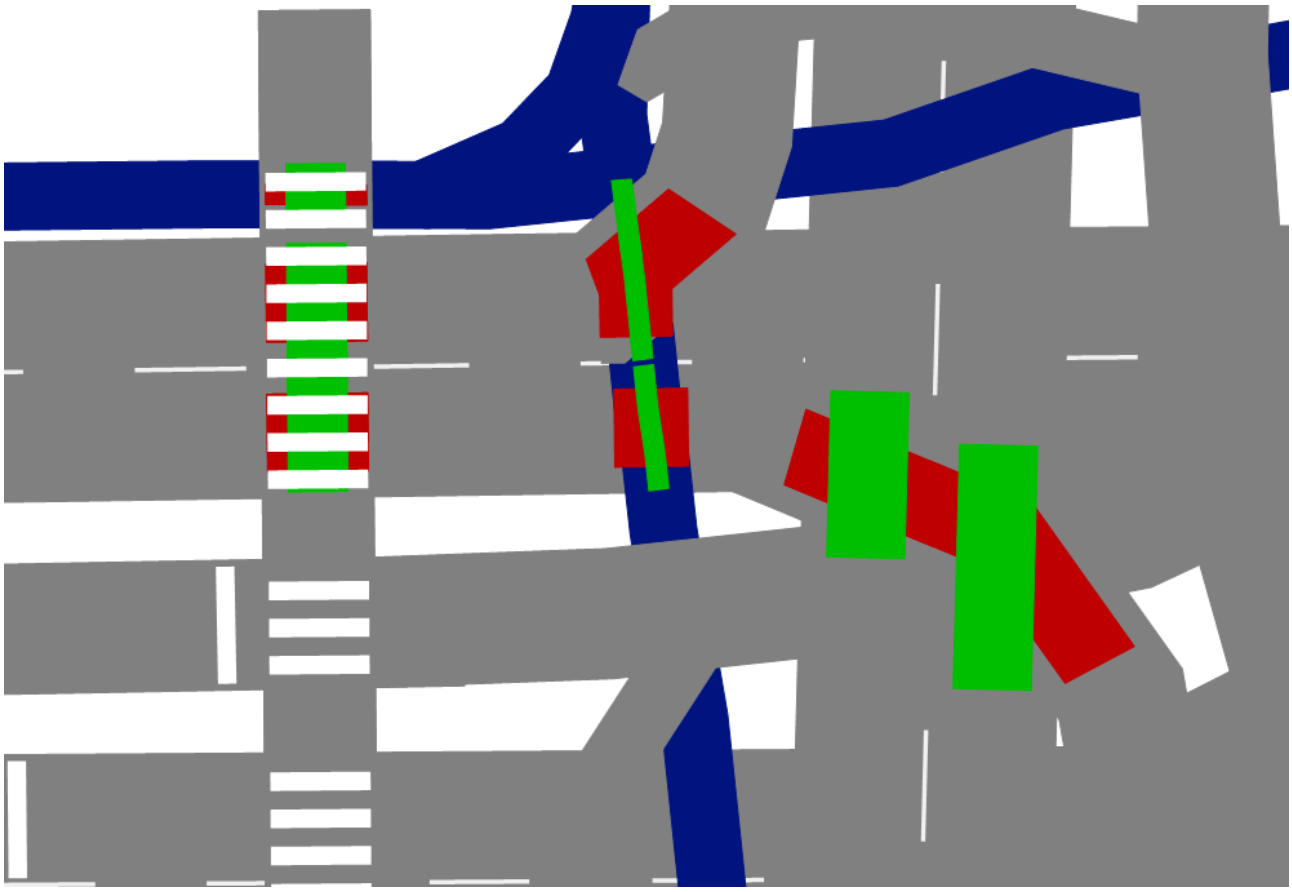
Der laves en konfliktmarkører for hver konfliktende trafikstrøm, hvilket betyder der kan defineres en individuel headway og gap time for hver konflikt. Trafikanten vil først passere den fiktive stopstreg, når kriterierne for alle konfliktmarkører er opfyldt.

En af udfordringerne ved at benytte metoden med vigepligter og konfliktmarkører er at opsætte vigepligten til at fungere overfor bløde trafikanter. Som det ses på Figur 4.13, vil den fiktive stopstreg være placeret et langt stykke fra både fodgængere og cyklisters ruter. Dette kan give problemer, da der dermed ikke kan benyttes samme gap time for alle konflikter, da den venstresvingende trafikant holder stille et langt stykke før konflikten med særligt de bløde trafikanter. Derudover vil bilister, cyklister og fodgængere bevæge sig med forskellige hastigheder, hvorfor gap time yderligere skal differentieres.

I vejreglen om Anvendelse af Mikrosimulering findes en anbefalet værdi for gap time til

venstresvingende personbiler på 4 sek, og en anbefalet værdi til venstresvingende lastbiler på 4,5 sek. [Vejdirektoratet, 2019]. Vejreglen har også et interval, som gap time oftest befinder sig i, på [3,0-4,5] for personbiler og [3,5-5,0] for lastbiler. Dette vil imidlertid ikke sikre en retvisende trafikafvikling, da gap times som tidligere nævnt skal være forskellige i de forskellige konflikter. Ved indsættelse af disse gap time værdier, blev det observeret, at fodgængere blev påkørt af venstresvingende bilister, da bilisternes gap time på 4 sek. for personbiler og 4,5 sek. for lastbiler ikke var tilstrækkeligt, da de brugte denne tid på bare at køre fra den fiktive stopstreg til konfliktzonen. Et andet problem opstår ved, at fodgængere, der står i midterhellen ved rødt lys, vil være i området mellem konfliktmarkøren og headwaymarkøren. Dette medfører, at den venstresvingede trafikant vil forblive holdende ved den fiktive stopstreg, selvom fodgængeren står ved rødt lys i midterhellen.

Den anden metode til opbygningen af vigepligter er med conflict areas, på dansk kaldet konfliktområder. Et eksempel på et venstresving opbygget med konfliktområder kan ses på Figur 4.14.



***Figur 4.14.*** Opbygning af vigepligt for venstresvingende med konfliktområder.

Konfliktområderne defineres som områder, hvor to trafikstrømme har en potentiel konflikt, og den ene retning har forkørselsret. Ved konfliktområder kan det indstilles, hvor aggressivt trafikanterne skal køre. Herunder hvor lang tid, der skal gå, fra trafikanten i primærretningen har forladt konfliktområdet, til trafikanten i sekundærretningen vil køre ind i konfliktområdet. Desuden defineres tiden fra trafikanten i sekundærretningen har forladt området, til trafikanter fra primærretningen igen vil køre ind i området.

Når der er flere efter hinanden følgende konflikter for det samme svingende køretøj, vil køretøjet ikke foretage venstresvinget før det er sikret, at alle områder kan passeres. Dette vil i praksis betyde, at selvom der er frit for ligeudkørende biler, vil svinget ikke påbegyndes, hvis ikke de øvrige områder også er frie. Derudover kan det defineres, hvorvidt trafikanter fra både primær- og sækundærretningen er

villige til at forårsage en krydsblokade. Yderligere er der mulighed for at indstille, hvor mange af de svingende bilister, der på forhånd har kendskab til de primære trafikanters rutevalg.

En af fordelene ved at benytte konfliktområder er, at trafikanter i den primære strøm også vil reagere på konfliktområdet. Dette i modsætning til opbygning med vigepligter, hvor det kun er sekundærretningen, der reagere på primærretningen. Hvis en svingende trafikant foretager et for aggressivt venstresving, vil bilister i primærretningen med konfliktområder reagere ved at sætte hastigheden ned for at undgå sammenstød. Derudover vil trafikanterne som udgangspunkt være opmærksomme på ikke at blokere trafikken i konfliktområdet, medmindre parametrene indstilles til, at trafikanterne godt kan foretage krydsblokade. [Vejdirektoratet, 2019]

Det vælges i dette projekt at benytte konfliktområder til opbygning af vigepligterne på baggrund af de førnævnte fordele og ulemper ved hver metode.

# Udførte simuleringer 5

Der simuleres en periode på en time i hver repetition af simuleringen. Hertil tillægges et kvarters indkøringsperiode i starten af simuleringen, der bruges til at få trafikken kørt ind i modellen. Dermed bliver simuleringstiden 75 minutter, hvor der kun måles på de sidste 60 minutter.

Trafikken øges som udgangspunkt med 5 % ad gangen, indtil trafikmængderne er det dobbelte af de oprindelige trafikmængder. Der ændres kun i trafikmængderne, hvorimod de procentuelle fordelinger mellem trafikstrømmene og trafikantsammensætningerne vil være de samme i alle tilfælde.

Ved simuleringer med ATS controller udføres der kun to simuleringer i hvert scenarie. Dette skyldes, at controlleren kun kan simulere i realtid, hvilket gør simuleringerne tidskrævende. Derfor er det valgt at begrænse simuleringerne med ATS controllerne til at se på basistrafikmængden og sammenbrudstrafikmængden i hvert scenarie. Dermed bliver det muligt at se controllerens effekt ved høj og lav trafikmængde.

## 5.1 Kriterier for sammenbrud

Sammenbrud i trafikafviklingen defineres i dette projekt ud fra to kriterier. Det ene er, at kølængden i svingbanerne ikke må overstige svingbanens længde i mere end 5 % af simuleringstiden. Det defineres, at der er sammenbrud, når kriteriet er opfyldt i minimum halvdelen af svingbanerne i krydset. Dette gøres for at sikre, at de svingende trafikanter ikke blokerer den ligeudkørende trafikstrøm. Det andet kriterie er serviceniveauet, der defineres ud fra middelforsinkelsen pr. køretøj. Der anvendes serviceniveauer defineret i Vejtrafik, hvor der i dette projekt vælges at acceptere til og med serviceniveau D [Lahrmann og Leleur, 1994]. Oversigten over serviceniveauerne som defineret i Vejtrafik kan ses i Tabel 5.1.

| Middelforsinkelse pr. køretøj [s] | Forsinkelsesbeskrivelse | Serviceniveau |
|---|---|---|
| 0 - 11,9 | Næsten ingen forsinkelse | A |
| 12 - 17,9 | Begyndende forsinkelse | B |
| 18 - 23,9 | Ringe forsinkelse | C |
| 24 - 35,9 | Nogen forsinkelse | D |
| 36 - 71,9 | Stor forsinkelse | E |
| 72 - $\infty$ | Meget stor forsinkelse | F |

***Tabel 5.1.*** Serviceniveauer for kryds. [Lahrmann og Leleur, 1994]

## 5.2 Antal repetitioner

Da der arbejdes med en stokastisk model, skal antallet af repetitioner i hver simulering bestemmes for at sikre statistisk signifikans af resultaterne. I henhold til vejreglen om Anvendelse af Mikrosimulering bestemmes antal repetitioner ud fra en iterativ proces, der regner ud fra konfidensintervallet samt standardafvigelsen på de kritiske parametre. Det vælges at regne med et konfidensinterval på 95 %. Der anvendes følgende formel: [Vejdirektoratet, 2019]

$$N' = (S * t_{N'-1}(1 - \alpha/2))/(\bar{X} * \epsilon)^2$$

Hvor:
$N'$ = Det nødvendige antal repetitioner
$S$ = Standardafvigelsen
$t_{N'-1}(1 - \alpha/2)$ = T-værdi for 95 % konfidensinterval
$\bar{X}$ = Middelværdi af observeret parameter
$\epsilon$ = Signifikansniveau

Der køres indledningsvis 20 repetitioner. Dette gøres for at beregne standardafvigelsen og middelværdien af de kritiske parametre. I dette projekt er de kritiske parametre 95 % fraktilerne af den gennemsnitlige kølængde samt af den gennemsnitlige forsinkelse af hvert køretøj. Derefter indsættes standardafvigelse og middelværdi af den valgte parameter i ovenstående formel, og antal nødvendige repetitioner kan beregnes.

Ud fra de indledende 20 repetitioner, findes 95 % fraktilerne for kølængderne i A1 ligeudretningen, hvilket giver følgende middelværdi og spredning:

$\bar{X}$ = 6,70

$S = 0,86$

T-værdien aflæses ud fra en t-fordeling med 19 frihedsgrader og signifikansniveau på 0,025 til:

$t_{19}(1 - 0,05/2) = 2,093$ [Ayyub og McCuen, 2011]

Ved indsættelse i formlen giver det følgende antal repetitioner:

$$N' = (0,86 * 2,093)/(6,70 * 0,05)^2 = 28,87$$

Dernæst køres en simulering med 29 repetitioner for at sikre, at 20 repetitioner er tilstrækkeligt, hvorefter formlen anvendes igen. Dette viste et behov for 32 repetitioner. Herefter blev det testet med 40 repetitioner, hvorefter formlen blev anvendt igen. Dette gav et behov for 38 repetitioner, hvilket dermed kan konkluderes at være tilstrækkeligt.

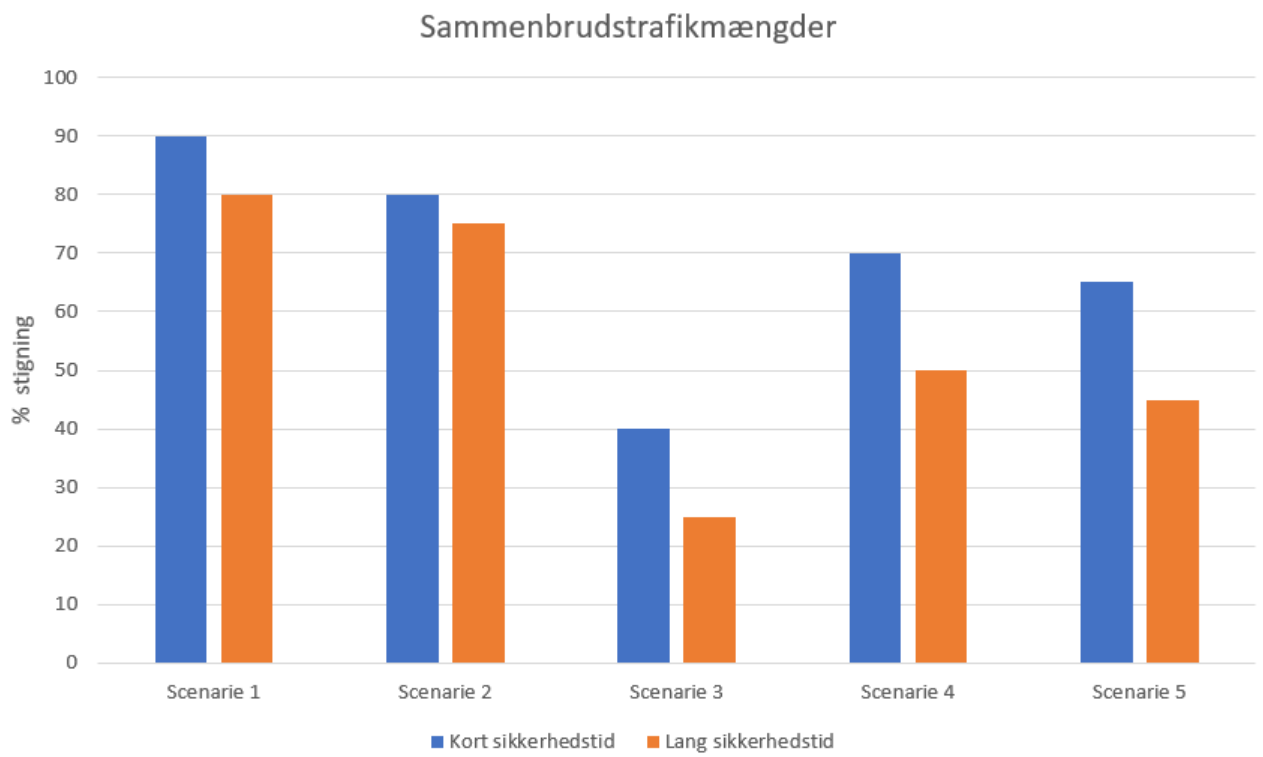
Samme fremgangsmåde er anvendt på forsinkelsestider, hvilket viste et behov for 23 repetitioner. Det vurderes at forsinkelsestiderne er mere retvisende end kølængderne da kølængderne er små grundet den lave trafikmængde, hvilket betyder at relativt små variationer kan medføre en stor standardafvigelse, som medfører et stort antal repetitioner. Derfor anvendes udregningen for forsinkelsestider, og de 23 nødvendige repetitioner rundes op til 25.

# Resultater 6

Simuleringerne af de forskellige scenarier har ført til en række resultater. Det er fundet, hvor store trafikmængder hvert scenarie kan håndtere, før der opstår sammenbrud i trafikafviklingen. I hvert scenarie er der simuleret med både kort og lang sikkerhedstid for fodgængere. Hvert scenarie er testet med ATS controller ved to forskellige trafikmængder. I det følgende kapitel beskrives resultaterne af de udførte simuleringer.

## 6.1 Oversigt over sammenbrudspunkter

De forskellige scenarier har vist sammenbrud ved forskellige trafikmængder. Der var på forhånd opstillet to kriterier for sammenbrud, der var baseret på kølængder i svingbanerne og middelforsinkelsen. I alle simuleringer var det kriteriet om middelforsinkelse, der først førte til sammenbrud. Dette kriterie blev defineret ud fra serviceniveauer i Vejtrafik som vist i Tabel 5.1. På Figur 6.1 vises de trafikmængder, hvor sammenbruddet i trafikafviklingen opstod.




***Figur 6.1.*** Oversigt over trafikmængderne, der førte til sammenbrud i simuleringerne. Y-aksen er stigningen i trafikmængder ift. basistrafikmængderne fra krydset Dannebrogsgade-Kastetvej.

Som det fremgår af Figur 6.1, bliver der afviklet større trafikmængder, når der er lavere sikkerhedstid for fodgængere. Dette ses særligt i Scenarie 3, 4 og 5, som er de tre scenarier med bundet venstresving.

I det følgende afsnit med resultatbehandling tages der udgangspunkt i simuleringerne med

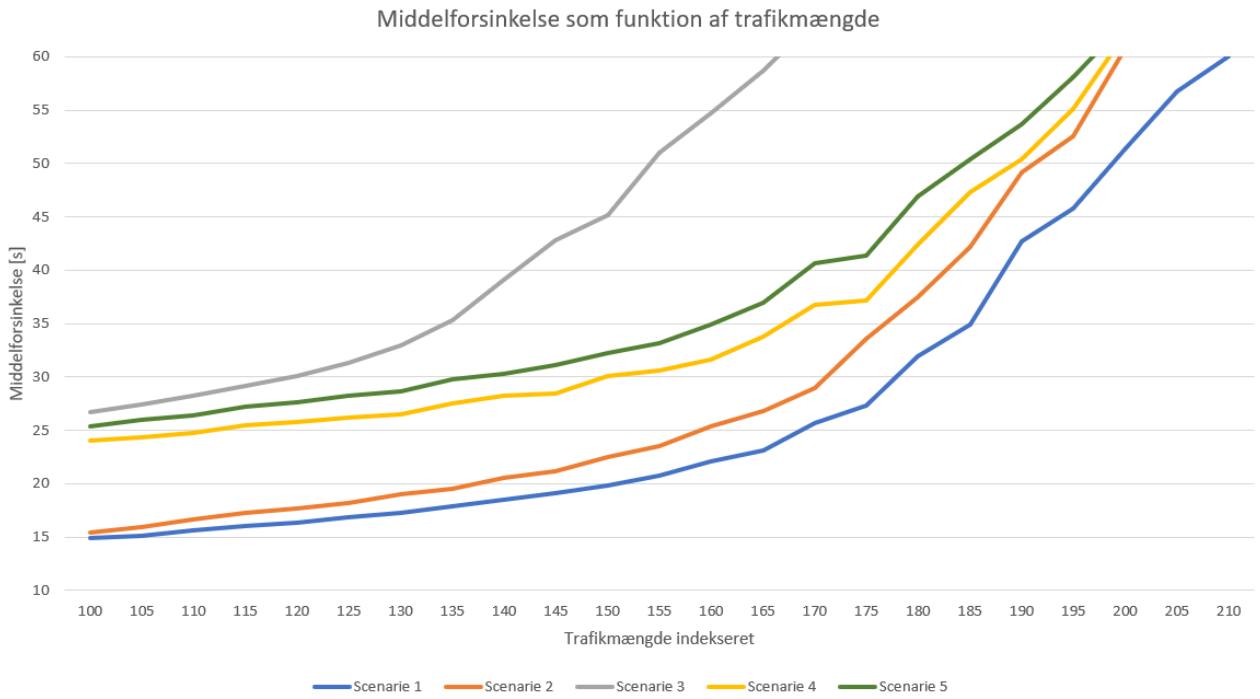
sikkerhedstiden på 13 sek. for fodgængere, der er den korte sikkerhedstid baseret på en fodgængerhastighed på 1,1 m/s. Denne sikkerhedstid er vurderet mest repræsentativ på baggrund af signaldokumtation for eksisterende kryds.

## 6.2 Analyse af middelforsinkelser

Ud fra trafikmængden og den udregnede middelforsinkelse, kan effektivteten af krydset vurderes. På Figur 6.2 kan det ses, at ved lav trafikmængde har Scenarie 1 og 2 samme forsinkelse. Ved de lavere trafikmængder, er det primært signalforsinkelsen, der påvirker middelforsinkelsen. I Scenarie 1 og 2 er signalforsinkelsen lav, da der ikke er bundne svingfaser. I Scenarie 3, 4 og 5 er signalforsinkelsen højere grundet det bundne venstresving. Dette medfører, at Scenarie 3, 4 og 5 har højere middelforsinkelse ved lave trafikmængder, da venstresvingende grundet det bundne venstresving stadig vil have høje forsinkelsestider, når der ikke er høj belastning i krydset.

Det kan yderligere ses på Figur 6.2, at Scenarie 3 hurtigere opnår en eksponentiel stigning i forsinkelse end de øvrige. Desuden kan det ses at ved tilstrækkeligt høje trafikmængder bliver forsinkelsen for Scenarie 2, 4 og 5 tilnærmelsesvis tilsvarende hinanden.

Ved høje belastningsgrader, bliver resultaterne for middelforsinkelse mindre pålidelige. Dette skyldes, at der opstår flere fejl i Vissim ved høje belastninger, når trafikanter grundet trafikken ikke gennemføre deres rute, hvorefter trafiktanten fjernes fra modellen. Det er på baggrund af dette valgt at vise graferne på 6.2 op til en middelforsinkelse på 60 sek, da det er skønnet, at resultaterne er pålidelige ved disse simuleringer.

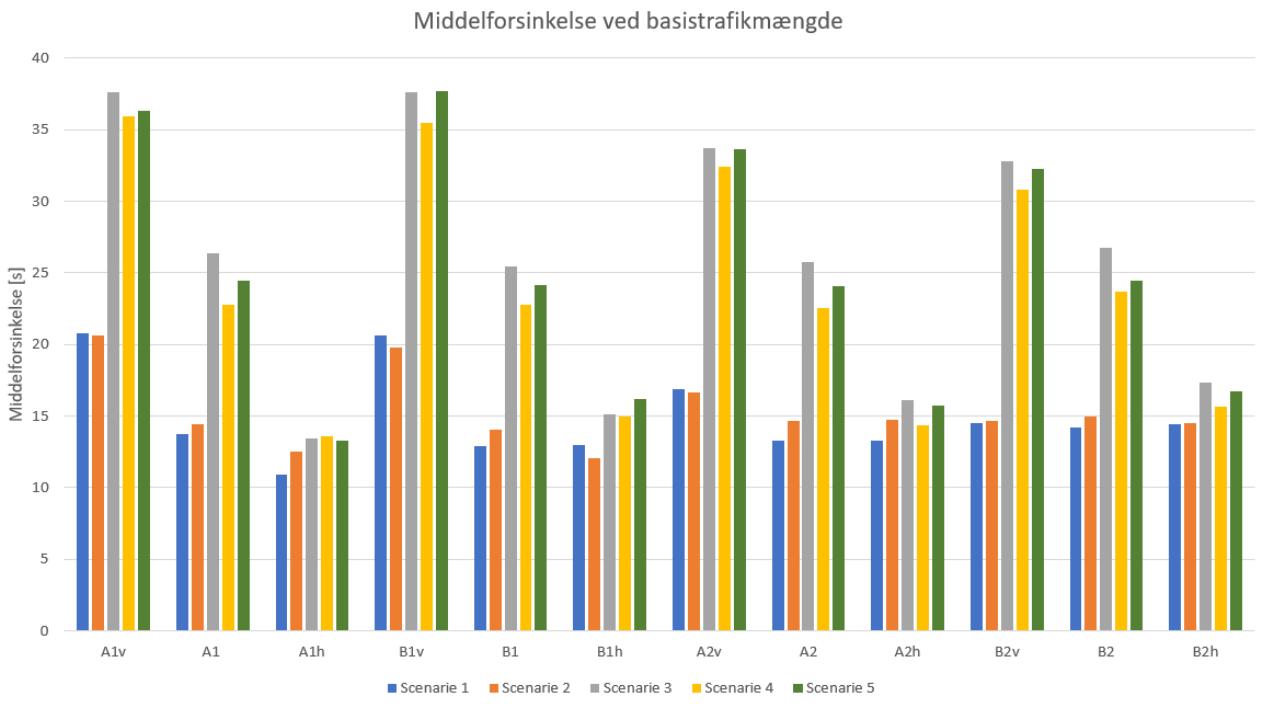



***Figur 6.2.*** Middelforsinkelse i de forskellige scenarier som funktion af trafikmængden. Simuleringerne på denne graf er udført med en sikkerhedstid på 13 sek. for fodgængere.

### 6.2.1 Forsinkelse i de enkelte kørespor

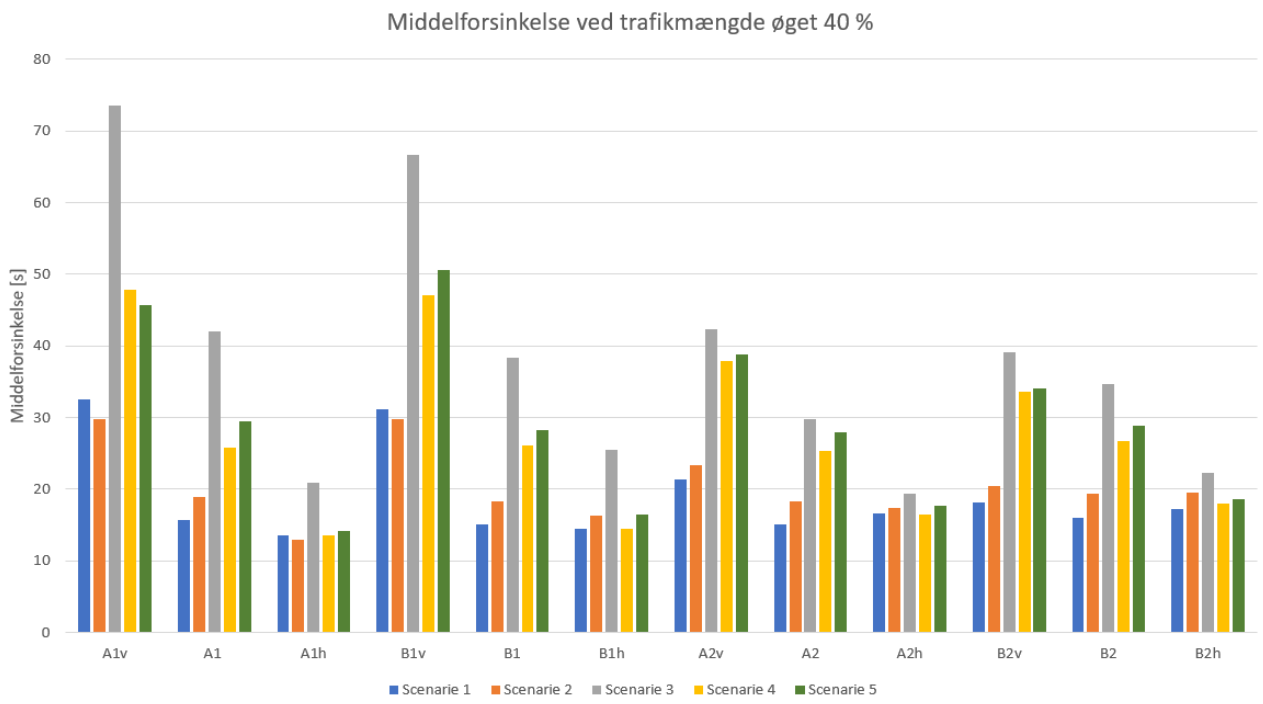
For yderligere sammenligning af scenarierne, betragtes middelforsinkelsen i hvert enkelt kørespor i krydset. På Figur 6.3 ses middelforsinkelsen med basistrafikmængden. Det ses ligesom på Figur 6.2, at de tre scenarier med bundet venstresving har større forsinkelser ved den lave trafikmængde. Det

er særligt de venstresvingende trafikanter, der oplever store forsinkelser. De ligeudkørende trafikanter oplever også større middelforsinkelser med bundet venstresving.



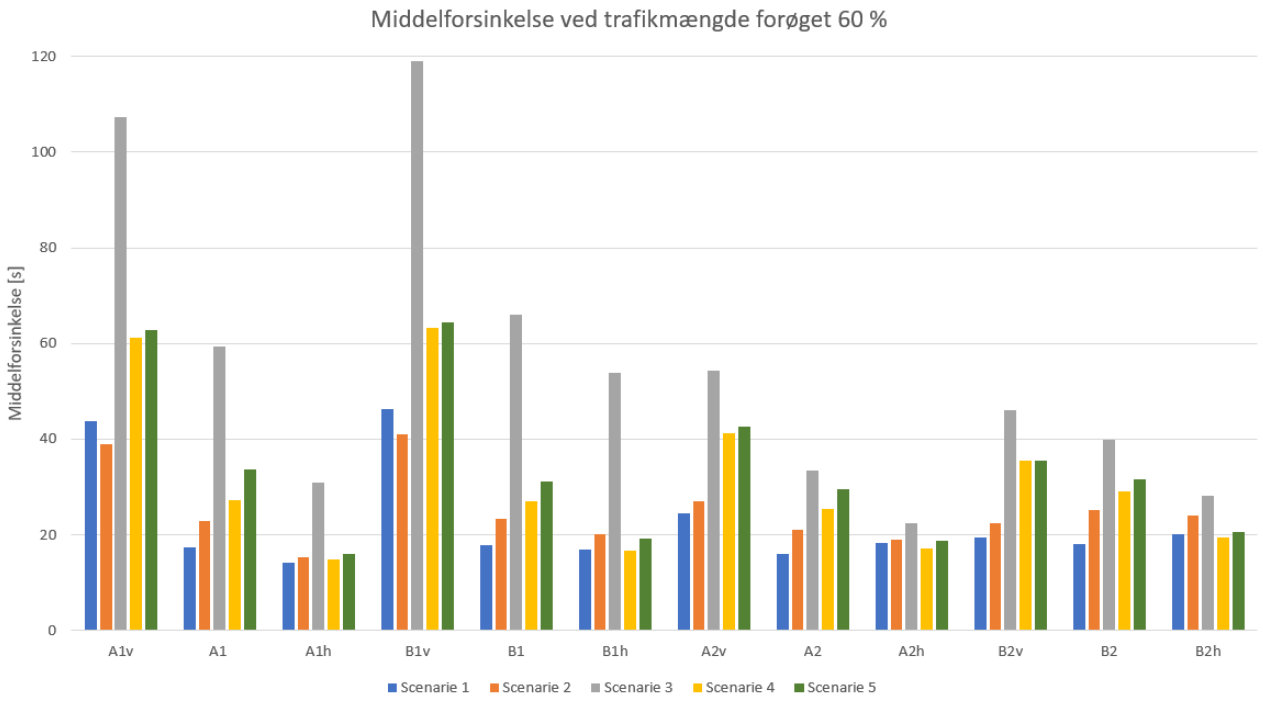

***Figur 6.3.*** Middelforsinkelserne ved samme trafikmængde i alle scenarierne. Trafikmængderne benyttet er basistrafikmængden.

Ses der i stedet på en trafikmængde med en 40 % forøgelse fra basistrafikmængden, fås middelforsinkelserne som vist på Figur 6.4. Det kan generelt ses, at Scenarie 4 og 5 har længere forsinkelse end Scenarie 1 og 2 i de fire venstresvingsspor og de fire ligeudkørende spor. I de fire højresvingsspor er det kun Scenarie 3, der har højere forsinkelse, hvorimod de andre fire scenarier ligger relativt tæt på hinanden. Modsat basistrafikmængden, oplever Scenarie 3 markant større forsinkelser end Scenarie 4 og 5.




***Figur 6.4.*** Middelforsinkelserne ved samme trafikmængde i alle scenarierne. Trafikmængderne benyttet er Scenarie 3's sammenbrudspunkt.

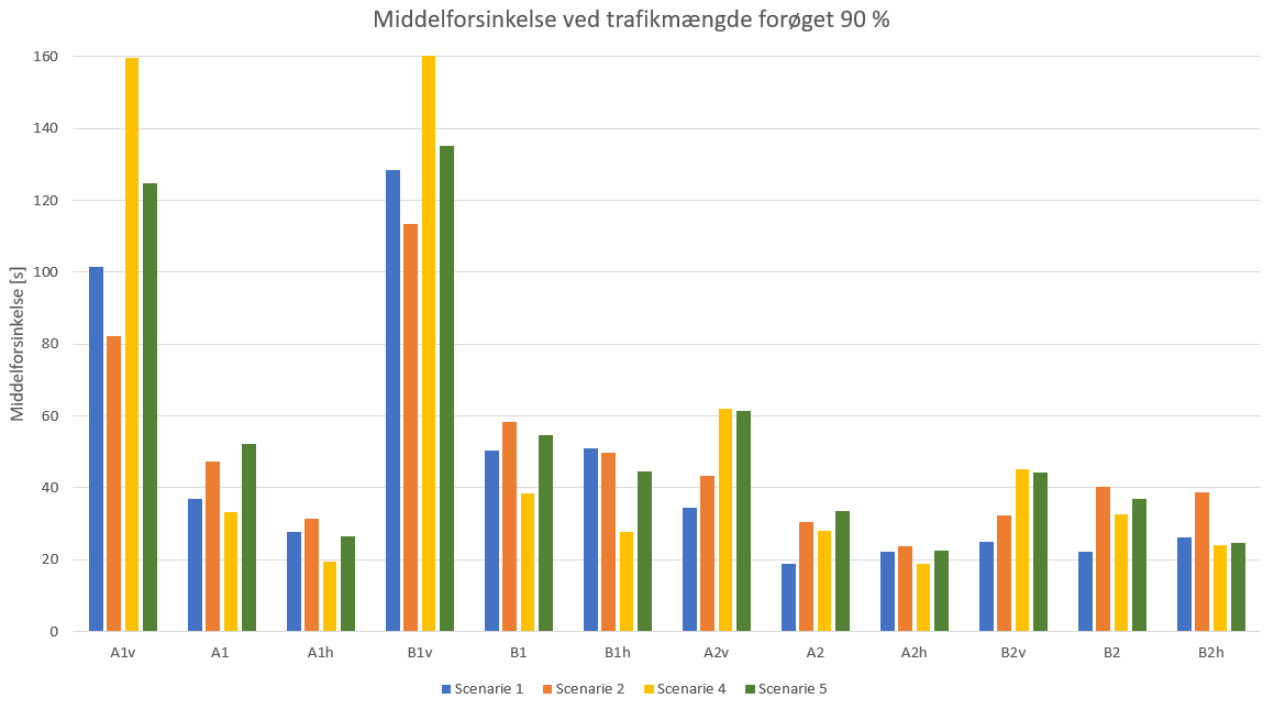
Ses der på en trafikmængde med en 60 % forøgelse fra basistrafikmængden, fås middelforsinkelserne som vist på Figur 6.5. Det kan generelt ses, at forskellen mellem Scenarie 3 og Scenarie 4 og 5 bliver større. Dette kan også ses af Figur 6.2, hvor afstanden mellem funktionerne bliver større ved 60 % i forhold til 40 %. Det ses også på Figur 6.5, at forsinkelserne i Scenarie 3 er markant større end forsinkelserne i de andre scenarier for både venstresvingende, højresvingende og ligeudkørende.




***Figur 6.5.*** Middelforsinkelserne ved samme trafikmængde i alle scenarierne. Trafikmængderne benyttet er 60 % større end basis.

Middelforsinkelserne med en trafikforøgelse på 90 % fra basistrafikmængden kan ses på Figur 6.6. I dette punkt blev der observeret sammenbrud i Scenarie 1, der havde den største kapacitet af

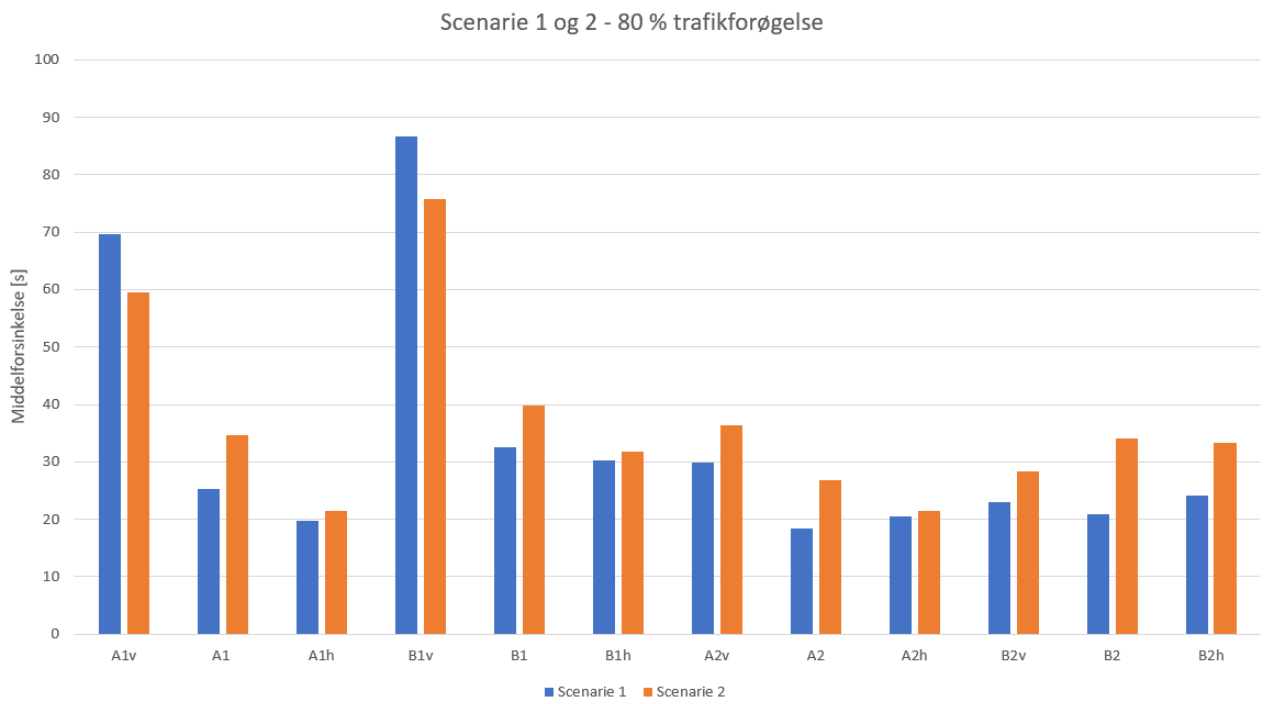
scenarierne. Her ses det, at de to mest belastede kørespor, A1v og B1v, har de laveste forsinkelser i Scenarie 2. Dette skyldes, at Scenarie 2 har ubundet venstresving, så venstresvingende både kan afvikles i hovedfasen og i svingfasen.




***Figur 6.6.*** Middelforsinkelserne ved samme trafikmængde i alle scenarierne. Trafikmængderne benyttet er 90 % større end basis. Scenarie 3 er ikke medtaget på figuren, da belastningen ved denne trafikmængde blev skønnet for høj til, at resultaterne var pålidelige.

### 6.2.2 Parvis sammenligning

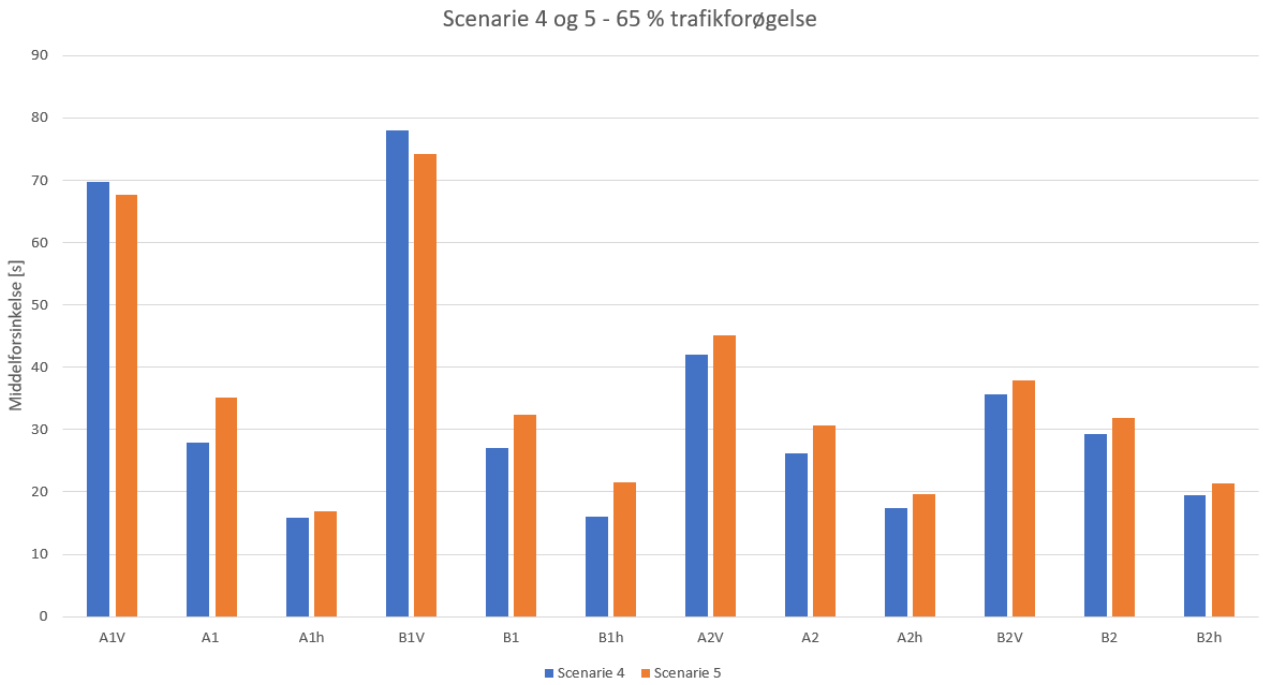
Ud fra Figur 6.1 kan det ses, at der i Scenarie 2 opstår sammenbrud ved lavere trafikmængder end i Scenarie 1. Den eneste forskel på modelopbygningen i Scenarie 1 og 2 består i, at der i Scenarie 1 ikke er nogen svingpile, hvorimod der i Scenarie er indsat ubundet venstre- og højresving. Sammenbruddet i Scenarie 1 opstod ved, at middelforsinkelserne i de to mest belastede venstresvingsspor, A1v og B1v, blev meget høje, hvilket medførte en høj middelforsinkelse i krydset. Det var forventet, at svingpilene i Scenarie 2 ville afhjælpe denne problematik. Dog blev det observeret, at Scenarie 2's middelforsinkelse overskred kriteriet for sammenbrud før Scenarie 1. For at undersøge dette nærmere, sammenlignes de detaljerede resultater for de to scenarier. Dette kan ses på Figur 6.7.




***Figur 6.7.*** Middelforsinkelserne i Scenarie 1 og 2 ved samme trafikmængde. Trafikmængderne benyttet er Scenarie 2's sammenbrudspunkt.

Ud fra Figur 6.7 kan det ses, at venstresvingssporene A1v og B1v har lavere forsinkelse, efter svingpilene er indsat i Scenarie 2. Modsat har alle andre kørespor højere forsinkelse i Scenarie 2. Det er særligt de ligeudkørende trafikanter, der har højere forsinkelse i Scenarie 2. Da de ligeudkørende udgør den største andel af trafikanterne i krydset, vil forskellen på den gennemsnitlige forsinkelse for de ligeudkørende have en stor effekt på den samlede middelforsinkelse i krydset. Dette medfører, at middelforsinkelsen samlet set bliver højere i Scenarie 2 med svingpile. Dog kan det også ses, at den maksimale forsinkelse i krydset er faldet fra 87 sek. i Scenarie 1 til 76 sek. i Scenarie 2.

Betragtes Scenarie 4 og 5, kan der sammenlignes for at se forskellen på to ligeudbaner hele vejen igennem modellen i Scenarie 4 og en lokal udvidelse til to ligeudbaner i krydsområdet i Scenarie 5. Derfor sammenlignes Scenarie 4 og Scenarie 5, hvilket kan ses på Figur 6.8.




***Figur 6.8.*** Middelforsinkelserne i Scenarie 4 og 5 ved samme trafikmængde. Trafikmængderne benyttet er Scenarie 5's sammenbrudspunkt.

Ud fra Figur 6.8 kan det ses, at Scenarie 4 med to ligeudbaner i hele modellen har lavere forsinkelse end Scenarie 5 i alle trafikstrømme udover A1V og B1V, der er de to højest belastede venstresvingsspor. De største forskelle ses i forsinkelsen for de ligeudkørende, som er betydeligt højere i Scenarie 5, hvor der kun er to ligeudbaner i krydsområdet. Særligt A1 og B1 oplever højere forsinkelser i Scenarie 5 end i Scenarie 4.

## 6.3 Effekt af ATS controller

ATS controller er testet i hvert scenarie ved både basis- og sammenbrudstrafikmængde. Disse resultater sammenlignes med resultaterne ved den traditionelle trafikstyring med 13 sek. sikkerhedstid. Middelforsinkelsen pr. køretøj for hver simulering kan ses i Tabel 6.1

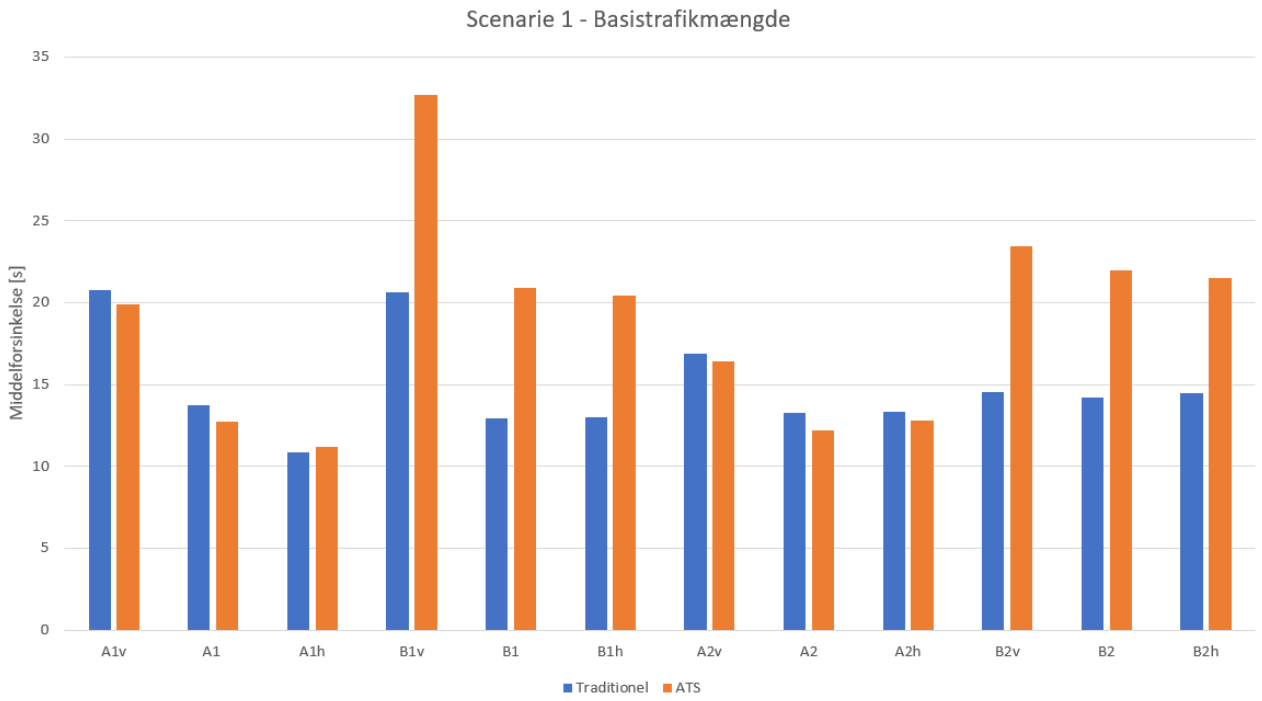
| | Basistrafik | | Sammenbrudstrafikmængde | |
|---|---|---|---|---|
| | Traditionel | ATS | Traditionel | ATS |
| Scenarie 1 | 14,9 | 17,9 | 42,7 | 46,4 |
| Scenarie 2 | 15,5 | 17,9 | 37,5 | 36,9 |
| Scenarie 3 | 26,7 | 26,5 | 39,1 | 31,7 |
| Scenarie 4 | 24,0 | 24,1 | 36,8 | 29,0 |
| Scenarie 5 | 25,4 | 25,6 | 37,0 | 31,7 |

***Tabel 6.1.*** Middelforsinkelser i sek. med traditionel trafikstrying og ATS.

Af resultatnerne i Tabel 6.1 kan det ses, at ATS controlleren ikke har nogen effekt ved basistrafikmængder. Derimod ses der en tydelig effekt ved sammenbrudstrafikmængderne, hvor middelforsinkelserne med undtagelse af Scenarie 1 er lavere med ATS. Det er særligt i scenarierne med bundet venstresving, at ATS giver lavere forsinkelse.

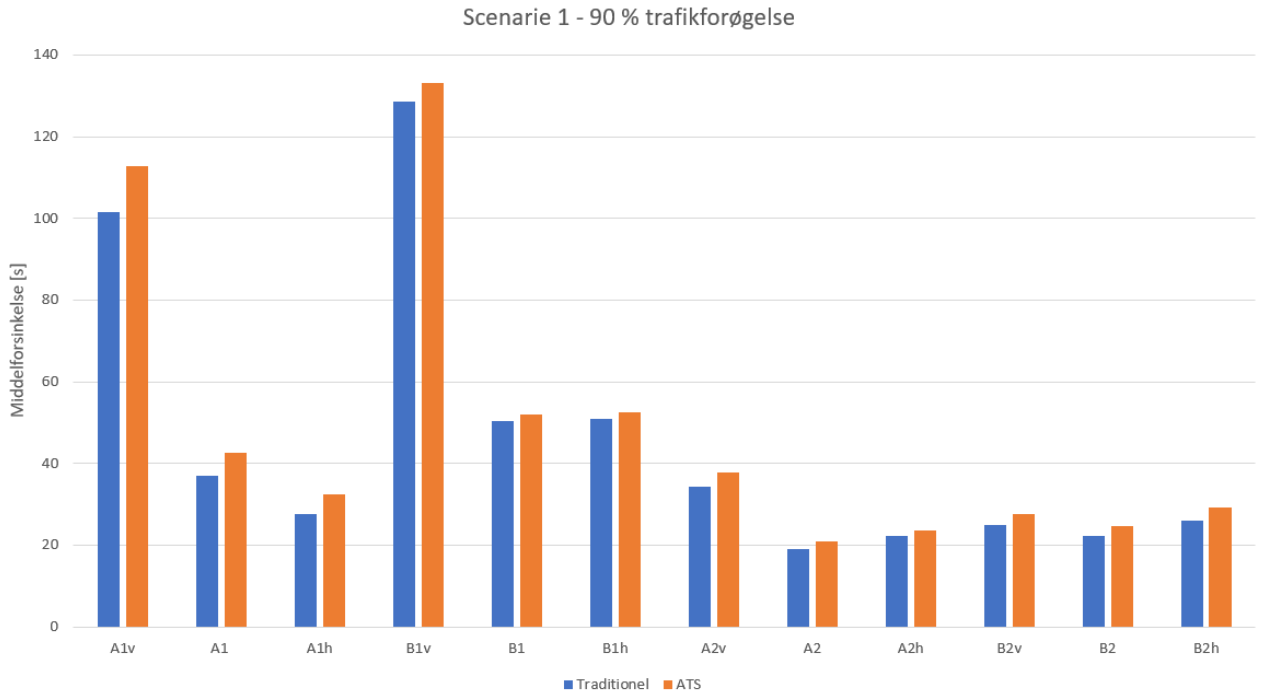
På Figur 6.9 ses resultaterne for Scenarie 1 med basistrafikmængder for den traditionelle trafikstyring og ATS controller. Den samlede middelforsinkelse pr. køretøj blev 14,9 sek. for den traditionelle styring og 17,9 sek. for ATS controlleren. Som det fremgår af Figur 6.9, har ATS generelt lavere forsinkelse i

A-retningen, men højere forsinkelse i B-retningen. Der er i dette scenarie kun 2 faser, hvilket begrænser mulighederne for optimering af signalgruppeplanen.




***Figur 6.9.*** Scenarie 1 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved basistrafikmængden.

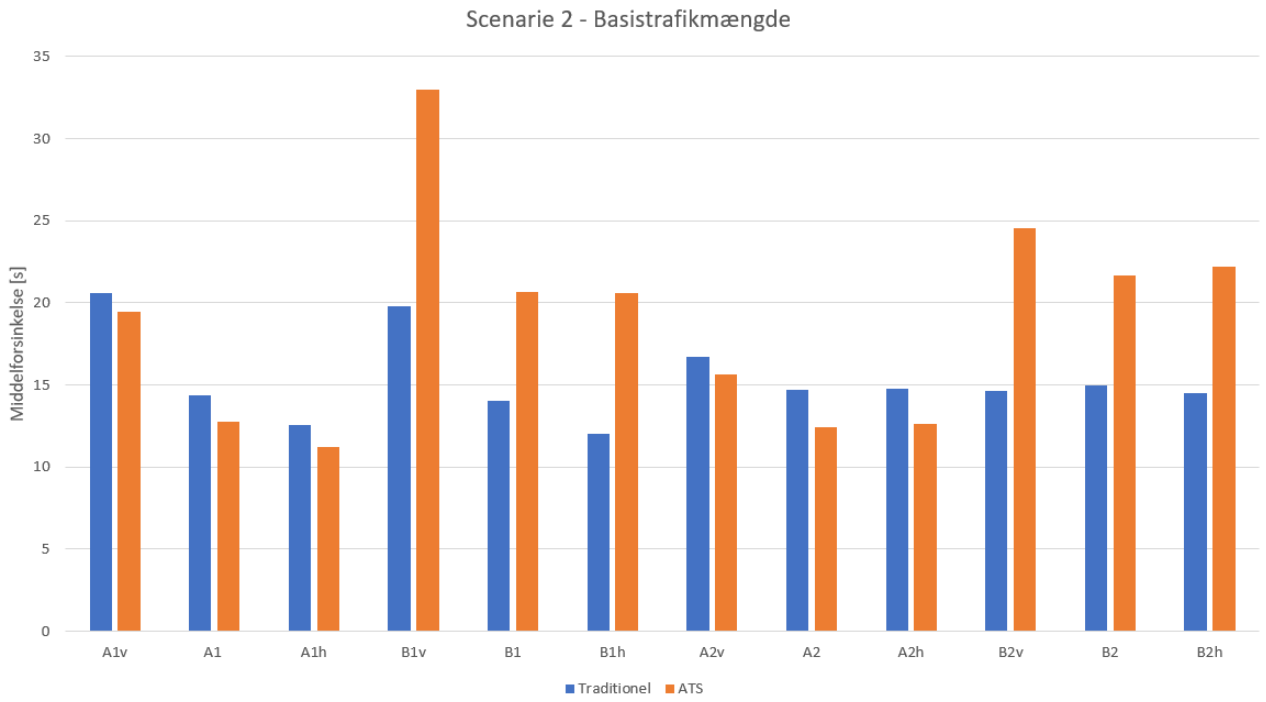
På Figur 6.10 ses resultaterne for Scenarie 1 med en 90 % trafikforøgelse fra basistrafikmængden, hvilket var sammenbrudstrafikmægnden i Scenarie 1 med den traditionelle styring. Den samlede middelforsinkelse pr. køretøj var 42,7 sek. med den traditionelle styring og 46,4 sek. med ATS controller. Forsinkelsen i alle kørespor er højere med ATS.




***Figur 6.10.*** Scenarie 1 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved 90 % trafikforøgelse.

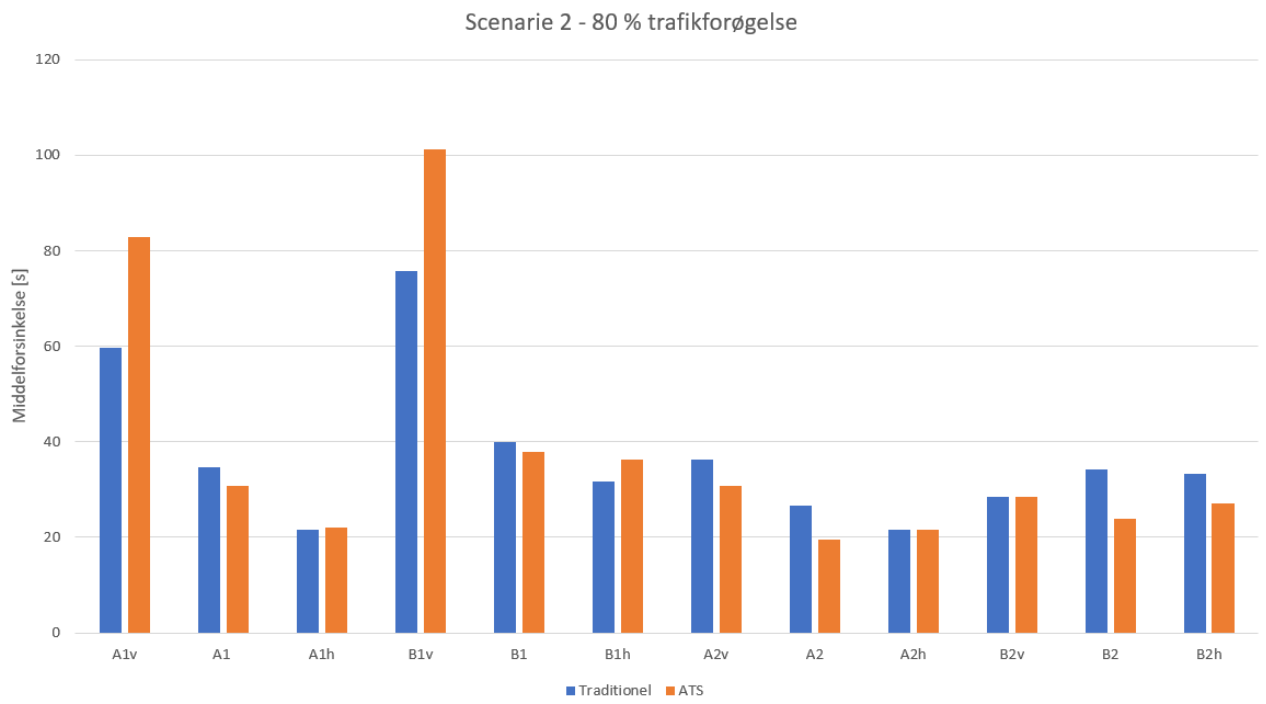
I Scenarie 2 indføres ubundne svingpile for både højre- og venstresvingende, hvilket giver flere

fasevalg, men stadigvæk begrænsede muligheder for optimering. Ved basistrafikmængde gav dette en samlet middelforsinkelse på 15,5 for den traditionelle og 17,9 for ATS. På Figur 6.11 fremgår middelforsinkelsen i hvert kørespor. Det ses, at ATS har lavere forsinkelse i A-retningerne, men markant højere forsinkelse i B-retningerne.



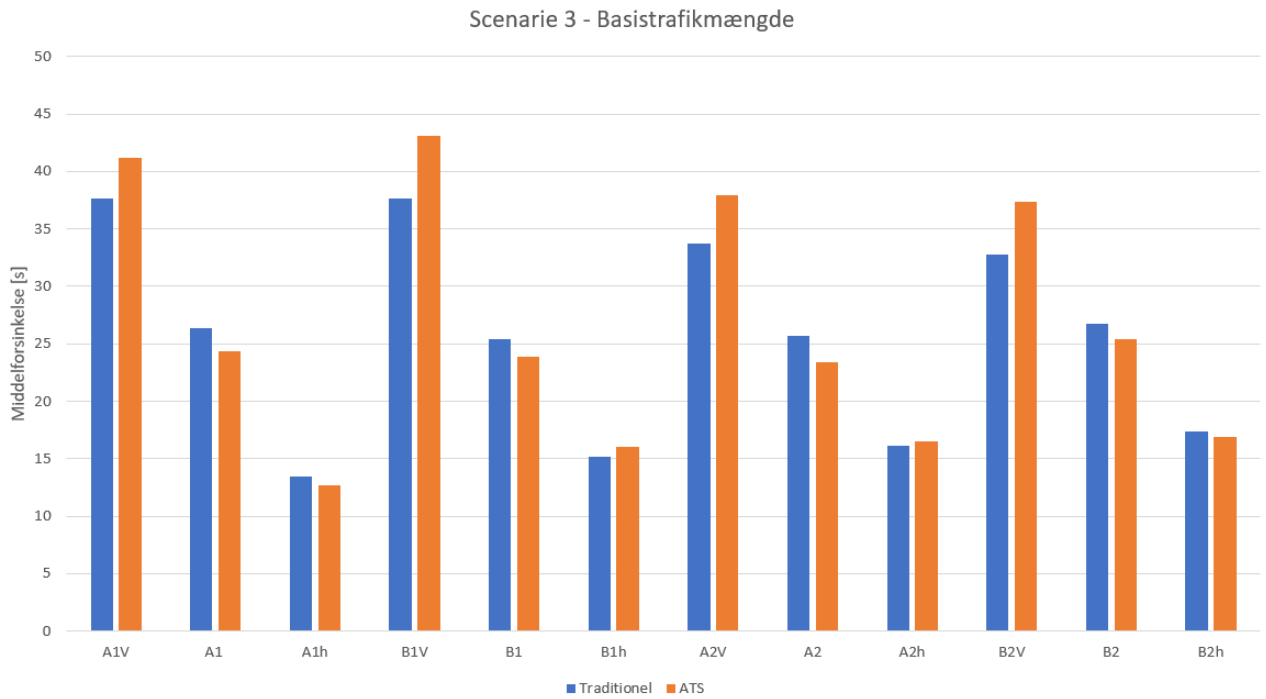

***Figur 6.11.*** Scenarie 2 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved basistrafikmængden.

Betragtes Scenarie 2 ved sammenbrudstrafikmængden fra den traditionelle trafikstyring, bliver den samlede middelforsinkelse 37,5 sek. for den traditionelle og 36,9 for ATS. På Figur 6.12 fremgår det, at de to højest belastede svingspor har højere forsinkelse ved ATS. For alle ligeudkørende trafikstrømme giver ATS lavere forsinkelser, hvilket er hovedårsagen til, at ATS har lavere middelforsinkelse pr. køretøj.




***Figur 6.12.*** Scenarie 2 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved 80 % trafikforøgelse.

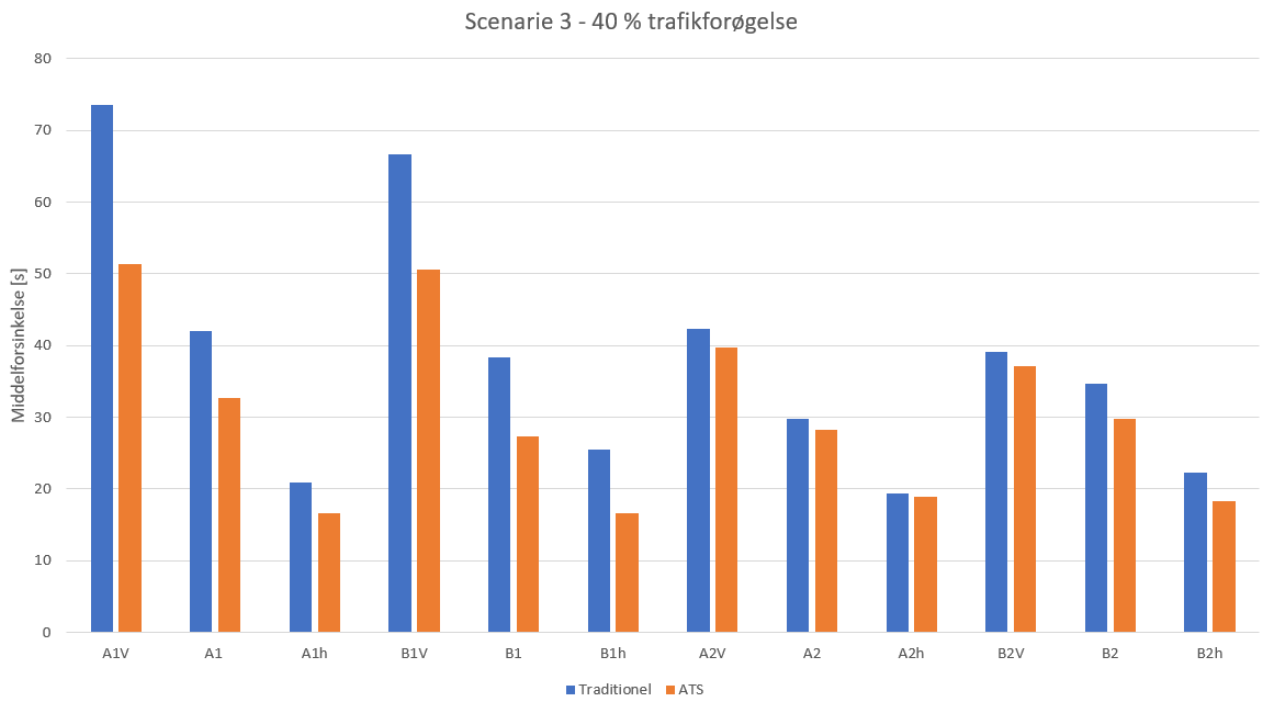
I Scenarie 3 indsættes bundet venstresving. Ved basistrafikmængde giver dette en middelforsinkelse på 26,7 for traditionel styring og 26,5 for ATS. På Figur 6.13 kan det ses, at venstresvingende har højere forsinkelser ved ATS, hvorimod ligeudkørende har højere forsinkelser ved traditionel styring. For højresvingende er forsinkelserne varierende, da hver styringsform giver lavest forsinkelse i to af højresvingssporene.




***Figur 6.13.*** Scenarie 3 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved basistrafikmængden.

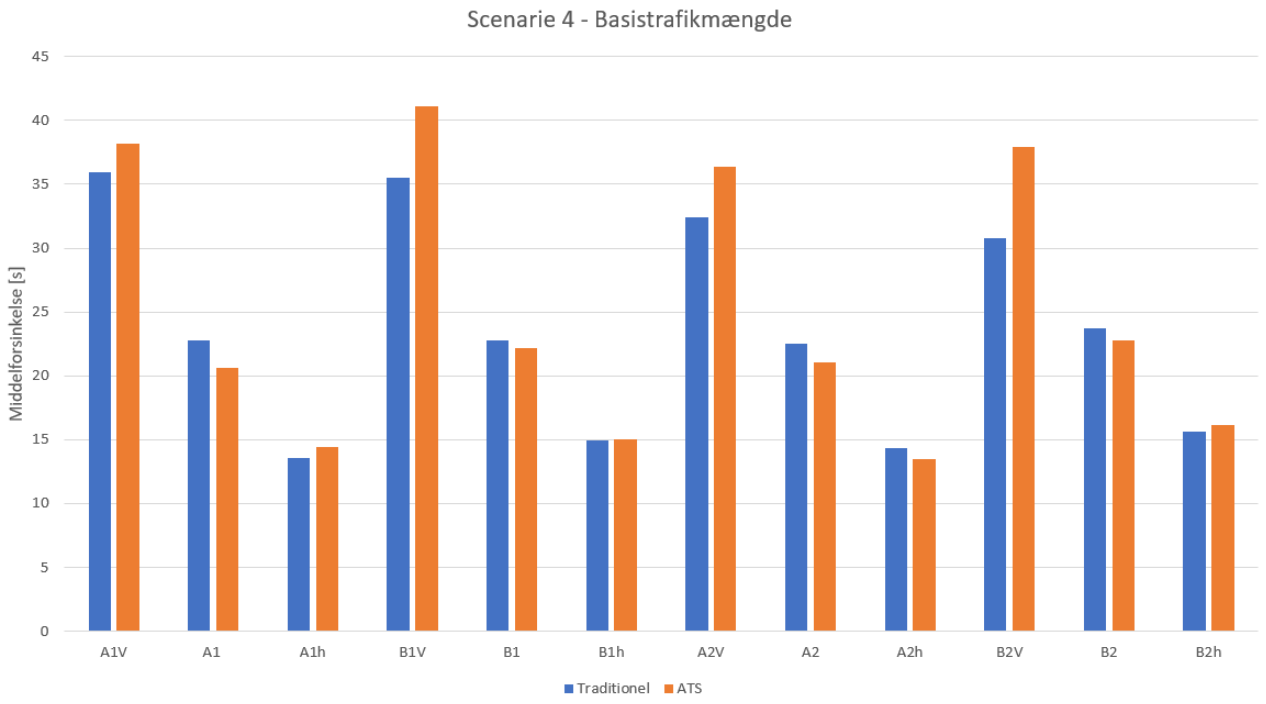
Indsættes sammenbrudstrafikmængden fra Scenarie 3 med traditionel trafikstyring, er middelforsinkelsen pr. køretøj 39,1 med den traditionelle og 31,7 med ATS. Det fremgår af Figur 6.14, at ATS giver lavere forsinkelse i samtlige trafikstrømme. Særligt de to højest belastede venstresving giver store

forskelle. I det mest belastede kørespor, A1V, er middelforsinkelsen 73,6 sek. med den traditionelle controller og 51,4 med ATS. De ligeudkørende i A1 og B1 har ligeledes markant lavere forsinkelse med ATS controlleren.




***Figur 6.14.*** Scenarie 3 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved 40 % trafikforøgelse.

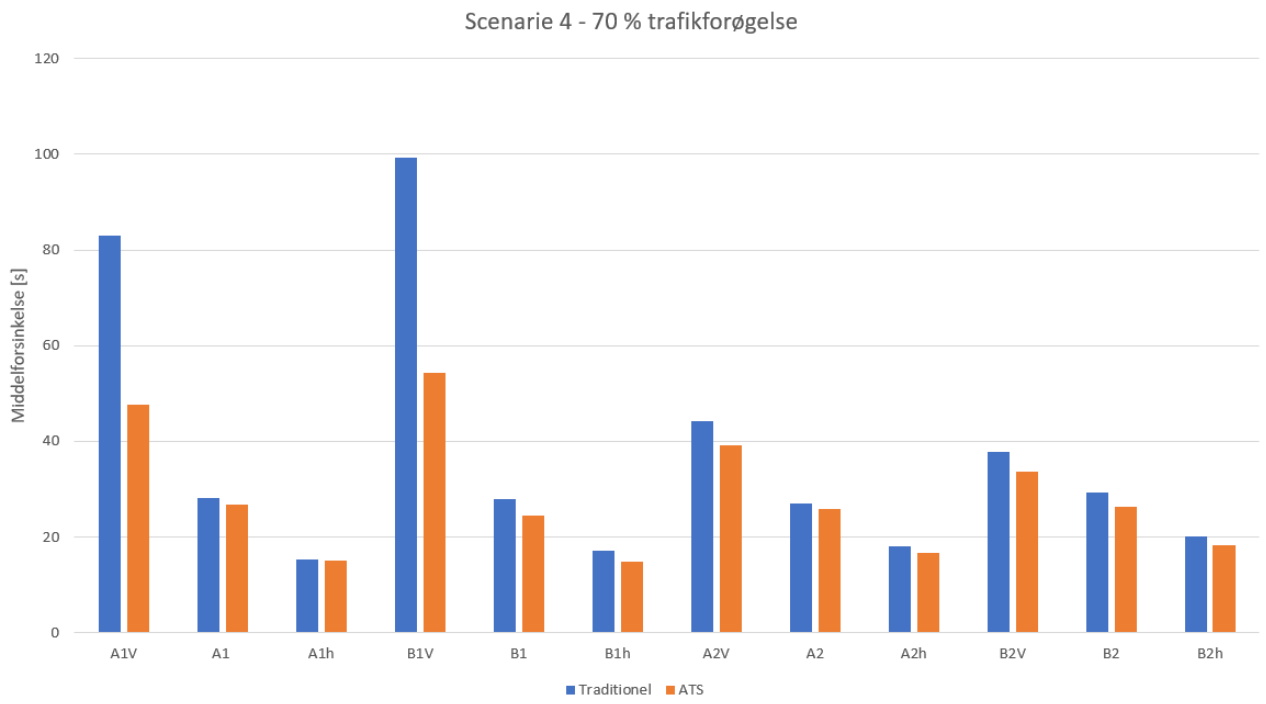
I Scenarie 4 indsættes to ligeudbaner igennem hele modellen, og der er stadig bundet venstresving og ubundet højresving. Ved basistrafikmængde giver det en middelforsinkelse pr. køretøj på 24,0 sek. for den traditionelle og 24,1 sek. for ATS. Af Figur 6.15 fremgår det, at ATS har højere forsinkelser i alle fire venstresvingsspor, men lavere forsinkelse for alle ligeudkørende.




***Figur 6.15.*** Scenarie 4 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved basistrafikmængden.

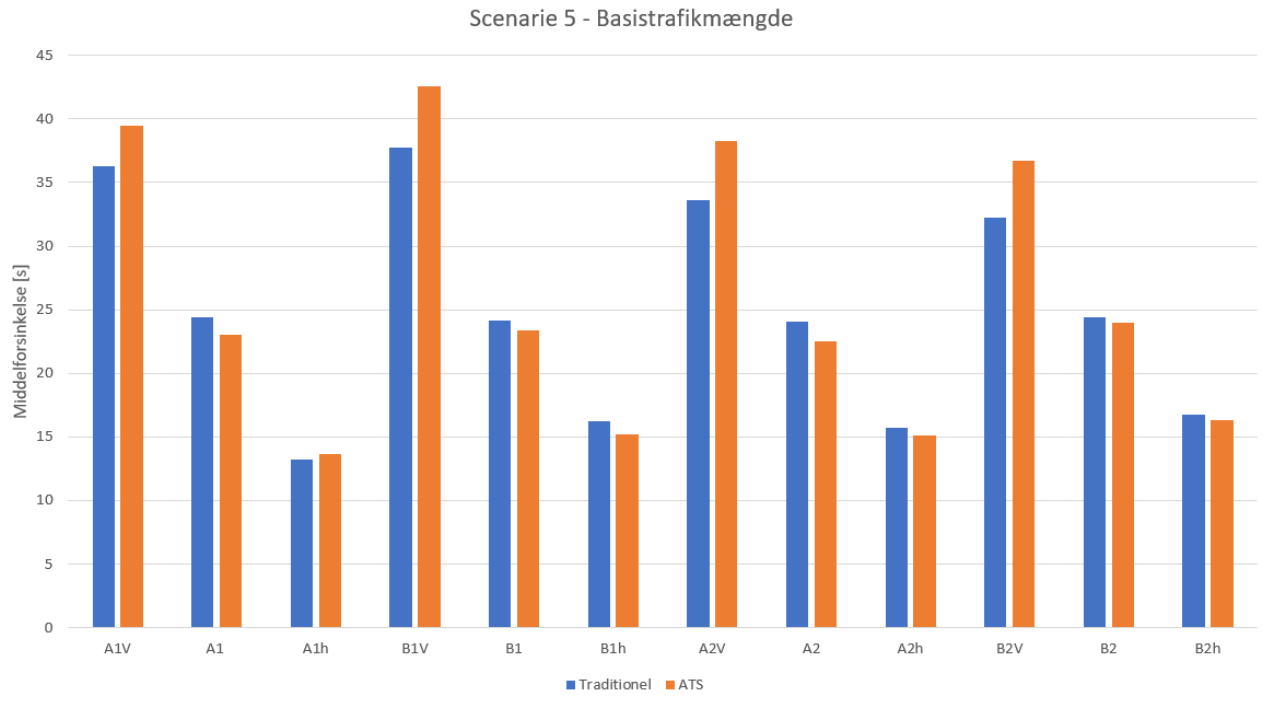
Indsættes sammenbrudstrafikmængden fra Scenarie 4 med traditionel trafikstyring, bliver middelfor-

sinkelsen pr. køretøj 36,8 sek. med traditionel trafikstrying og 29,0 sek. med ATS controller. Det kan ses på Figur 6.16, at det særligt er de to højest belastede venstresvingsspor, A1V og B1V, der giver store udslag og har markant lavere forsinkelse med ATS controlleren. I det højest belastede spor, B1V, er middelforsinkelsen 99,2 sek. med den traditionelle og 54,3 sek. med ATS.



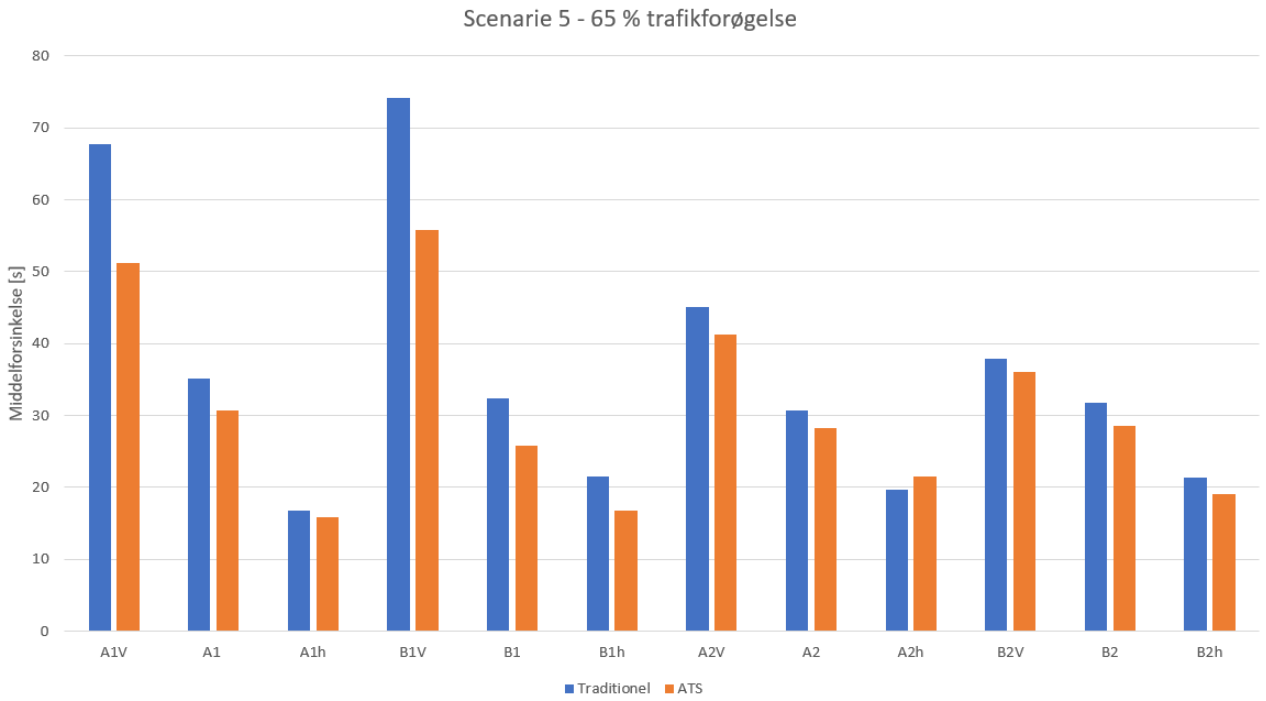

***Figur 6.16.*** Scenarie 4 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved 70 % trafikforøgelse.

I Scenarie 5 indsættes to ligeudbaner lokalt ved krydset og sammenfletning efter. Der er stadig bundet venstresving og ubundet højresving. Ved basistrafikmængde giver det en middelforsinkelse pr. køretøj på 25,4 sek. for den traditionelle og 25,6 sek. for ATS. Af Figur 6.17 fremgår det, at ATS har højere forsinkelse i venstresvingene men lavere forsinkelse i alle andre retninger.




***Figur 6.17.*** Scenarie 5 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved basistrafikmængden.

Indsættes sammenbrudstrafikmængden fra Scenarie 5 med traditionel trafikstyring, bliver middelforsinkelsen pr. køretøj 37,0 sek. med traditionel trafikstrying og 31,7 sek. med ATS controller. Det kan ses på Figur 6.18, at ATS har lavere forsinkelser end den traditionelle i alle kørespor undtagen A2h. Særligt de venstresvingende har markant lavere forsinkelse ved ATS.



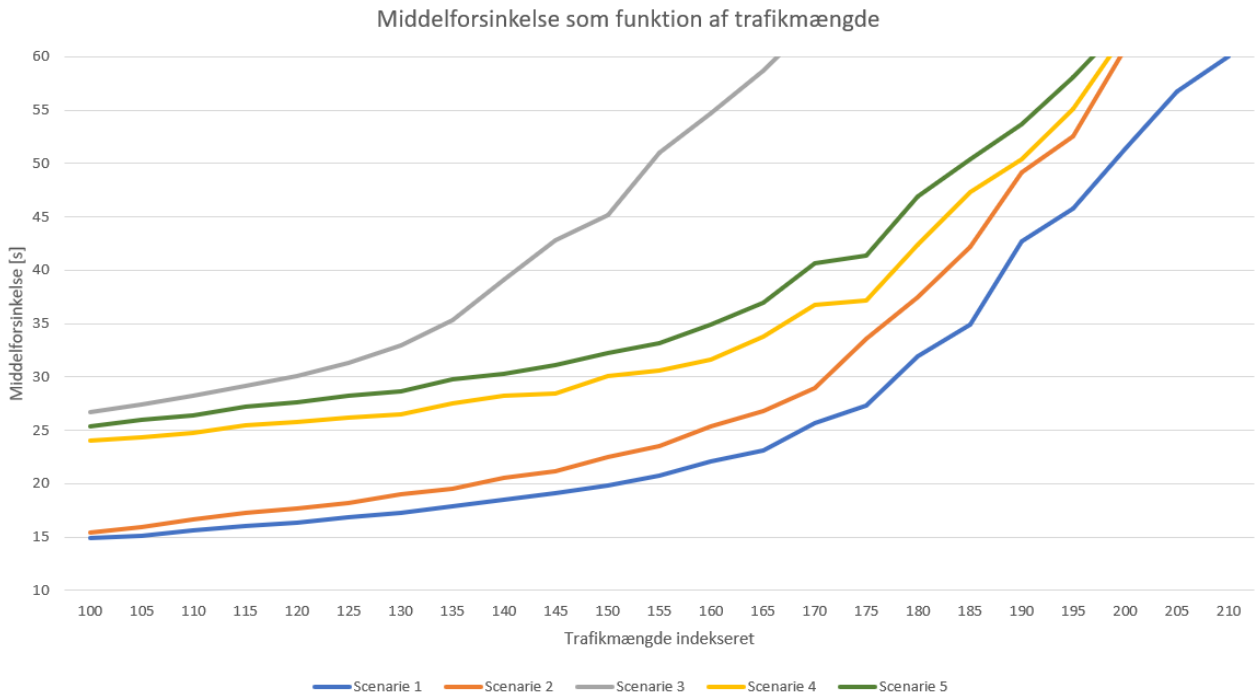

***Figur 6.18.*** Scenarie 5 - sammenligning af traditionel og ATS controller ved 65 % trafikforøgelse.

# Konklusion 7

Der er blevet foretaget et stort antal simuleringer i Vissim med forskellige variationer i trafikmængde, signalstyring og krydsgeometri. Herigennem er der opnået en række resultater, hvoraf der kan udledes betydningen af de forskellige tiltag på kapaciteten i krydset.

## 7.1 Effekter af tiltag

Det blev fundet, at Scenarie 1 kunne håndtere den største mængde trafik, før sammenbrudskriteriet for den samlede middelforsinkelse pr. køretøj blev overskredet. Dette til trods for, at Scenarie 1 ikke indeholder svingpile og kun har ét ligeudkørende spor i hver retning. Scenarie 1 havde den laveste middelforsinkelse pr. køretøj af alle scenarierne ved alle trafikmængder. Dette kan ses af grafen over middelforsinkelserne, der fremgår af Figur 7.1




***Figur 7.1.*** Middelforsinkelse i de forskellige scenarier som funktion af trafikmængden. Simuleringerne på denne graf er udført med en sikkerhedstid på 13 sek. for fodgængere.

Scenarie 2 havde den forskel fra Scenarie 1, at der er indsat ubundne svingpile for alle højre- og venstresvingende bilister. Scenarie 2 viste en højere middelforsinkelse pr. køretøj end Scenarie 1 ved alle trafikmængder. Det kan herudfra konkluderes, at Scenarie 1 uden svingpile kunne håndtere større trafikmængder, hvis der ses på den samlede middelforsinkelse pr. køretøj i krydset. Sammenlignes der derimod på middelforsinkelsen i hvert enkelt kørespor, viste Scenarie 1 større maksimal forsinkelse i de mest belastede kørespor.

Ud fra resultaterne af Scenarie 1 og 2 kan det konkluderes, at ubundne svingpile havde en positiv

effekt på de maksimale forsinkelser i krydset. Det var i dette tilfælde to venstresvingsspor, der havde de største forsinkelser. Den ekstra fase og dermed de ekstra mellemtider gav dog større forsinkelser i de øvrige retninger, hvilket medførte en større samlet middelforsinkelse pr. køretøj. Antallet af ligeudkørende var større end antallet af venstresvingende, og dermed vægtede forsinkelsen på ligeudkørende højere end de positive effekter på de venstresvingende, når middelforsinkelsen pr. køretøj blev udregnet som et vægtet gennemsnit.

Udover ubundne sving, blev der i Scenarie 3 undersøgt effekten af bundet venstresving. Disse blev undersøgt, da bundne svingfaser har positiv effekt på trafiksikkerheden i krydset. Scenarie 3 var geometrisk identisk med Scenarie 1 og 2. Forskellen bestod i, at Scenarie 3 indeholdte bundet venstresving og ubundet højresving. Dette gav en betydelig reduktion af kapaciteten i krydset. Scenarie 3 havde den højeste middelforsinkelse i samtlige kørespor, og det kan dermed entydigt konkluderes, at det bundne venstresving har en negativ påvirkning på trafikafviklingen i krydset. Dette ses som en konsekvens af, at de venstresvingende ikke længere må køre på hovedsignalet, hvorfor venstresvingssporet hurtigere blevet fyldt op. Dette resulterede i opstuvning af trafik ud i ligeudsporet. Herudover har de ligeudkørende grønt i en mindre andel af omløbet, når der skal gives plads til de bundne svingfaser.

I Scenarie 4 blev der indsat 2 ligeudbaner i alle retnigner i krydset. Herudover var krydset identisk med Scenarie 3. Der blev noteret en markant forbedring af kapaciteten i krydset, og middelforsinkelserne var lavere i alle kørespor sammenlignet med Scenarie 3. Sammenlignes der med Scenarie 1 og 2, havde Scenarie 4 højere middelforsinkelse i alle venstresvingende og ligeudkørende kørespor. Konklusionen herpå er, at ses der på middelforsinkelsen pr. køretøj i krydset, kan de to ligeudbaner ikke opveje for kapacitetstabet ved de bundne svingfaser.

I Scenarie 5 blev der undersøgt effekten af kun at have en lokal udvidelse til to ligeudbaner i krydset. Forskellen fra Scenarie 4 bestod i, at vejene i modellen kun havde 1 kørespor udenfor krydsområdet. Det kunne ses, at middelforsinkelserne blev større end i Scenarie 4. Forskellen var i de fleste tilfælde omkring 10 %. Den største forskel var i A1, hvor Scenarie 5 gav 25 % højere forsinkelse. Det kan konkluderes, at en lokal udvidelse giver en negativ effekt på fremkommeligheden. Forskellen skal ses i lyset af, at Scenarie 5 vil være billigere at anlægge grundet mindre pladskrav og asfaltforbrug.
Der var to kørespor, hvor Scenarie 5 havde lavere forsinkelse end Scenarie 4. De to kørespor var de to højest belastede venstresvingsspor, A1V og B1V. Dette kan skyldes, at venstresvingende bilister i Scenarie 4 har problemer med at foretage vognbaneskift mellem de to ligeudkørende spor grundet den høje trafikbelastning. I Scenarie 5 vil de venstresvingende bilister køre direkte ind i det venstreliggende ligeudkørende spor, når vejen udvider sig til to ligeudbaner. Dermed oplever de ikke problemet med at skifte vognbane mellem de to de ligeudkørende spor.

## 7.2 Effekt af sikkerhedstider

Der blev i projektet benyttet to forskellige sikkerhedstider til fodgængere. Dette var baseret på usikkerheder i vejreglernes anbefaling af fodgængerhastighed til benyttelse i udregningen. Det blev konkluderet, at jo højere fodgængerhastighed, der regnes med i udregningen af sikkerhedstiderne, jo højere blev krydskapaciteten. Det blev ud fra simuleringerne konkluderet, at længden af sikkerhedstiderne har effekt på fleksibiliteten af signalanlægget, da minimumsgrøntiderne kan være lavere, jo mindre sikkerhedstiden for fodgængere er. Resultaterne viste, at det var i Scenarie 3, 4 og 5, at der var størst forskel på trafikafviklingen ved de to forskellige sikkerhedstider. Det kan herudfra konkluderes, at længden af sikkerhedstiden har størst betydning ved bundne svingfaser.

## 7.3 ATS

Der blev i projektet undersøgt forskellige tilgange til signalstyring. Hoveddelen af rapporten omhandler en traditionel trafikstyring som beskrevet i vejreglerne. Der blev imidlertid også undersøgt en ny form for adaptiv signalstyring baseret på machine learning og radarinput. Denne signalstyring er udviklet af firmaet ATS. ATS controlleren blev testet ved basistrafikmængde og sammenbrudstrafikmængde i alle 5 scenarier.

Det kunne ses af resultaterne, at ATS controlleren havde den største positiv effekt på trafikafviklingen i scenarierne med bundne svingfaser. Reduktionen af forsinkelserne i de bundne svingfaser var størst ved de høje trafikmængder.

Det blev generelt observeret, at ATS controlleren ikke havde en positiv effekt i Scenarie 1, hvor der kun er to faser og ingen svingpile. I Scenarie 2 med ubundne svingpile havde ATS controlleren øgede maksimale forsinkelser i de mest belastede kørespor. Ved de lave trafikmængder havde ATS controlleren lavere forsinkelser for primærretningen i krydset og højere forsinkelser for sekundærretningen. Overordnet set blev der ikke observeret nogen positiv effekt på middelforsinkelsen pr. køretøj i Scenarie 2.

I Scenarie 3 blev der indsat de bundne svingfaser, hvilket gav flere muligheder for fasevalg. Ved de lave trafikmængder var den samlede middelforsinkelse pr. køretøj uændret ved traditionel trafikstyring og ATS controller i Scenarie 3. Ved højere trafikmængder blev der observeret en stor positiv effekt af ATS controlleren. Alle kørespor havde lavere forsinkelser, og det var særligt de bundne svingfaser, der ved de høje trafikmængder oplevede en markant forbedring ift. den traditionelle trafikstyring.

I Scenarie 4 blev der observeret samme tendens som Scenarie 3. Ved lave trafikmængder var den samlede middelforsinkelse pr. køretøj den samme ved begge signalstyreformer. Ved høje trafikmængder var der en stor positiv effekt af ATS controlleren. Alle kørespor havde lavere forsinkelser, og det mest belastede kørespor havde halveret forsinkelse ved ATS ift. den traditionelle trafikstyring.
Scenarie 5 viste samme tendenser som Scenarie 4. 11 ud af 12 kørespor viste lavere forsinkelser, og den overordnede forsinkelse var betydeligt lavere. Det højest belastede kørespor havde 34 % lavere forsinkelse med ATS controller.

Det kan overordnet konkluderes, at ATS controlleren viste den største positive effekt ved bundne svingfaser og høje trafikmængder. Dette er sammenhængende med, at der er større optimeringspotentiale i disse situationer, da der er mange mulige fasevalg, der kan træffes. Resultaterne viser, at ATS controlleren er bedre til at implementere det bundne venstresving med mindst mulig påvirkning på trafikafviklingen. Kombinationen af, at radarinputtet sporer alle biler i modellen på alle tidspunkter og softwarens evne til at udnytte de naturlige huller i trafikstrømmen gør, at de bundne venstresving afvikles mere effektivt.

# Diskussion 8

I det følgende kapitel diskuteres beslutninger og antagelser foretaget i projektet samt deres indflydelse på resultaterne.

## 8.1 Prioritering i signalanlæg

En del af beslutningsprocessen i forbindelse med opsætningen af et signalanlæg består af at bestemme, hvordan de forskellige trafikstrømme skal prioriteres, og hvordan trafikafviklingen vurderes.

- Skal alle trafikstrømmes ventetid prioriteres lige højt, eller skal trafikstrømmene med flest trafikanter vægte højere end de mindre trafikerede strømme? Hvis der holder en enkelt bil og venter i et bundet venstresvingsspor, imens der er store trafikmængder i de andre kørespor, vil middelforsinkelsen i krydset blive lavest ved at lade bilen i venstresvingssporet holde og vente. Det vil dermed ikke nødvendigvis være de samme tiltag, der giver lavest middelforsinkelse og lavest maksimal forsinkelse i et signalanlæg.
  I dette projekt er sammenbrud defineret ud fra værdien for den samlede middelforsinkelse pr. køretøj i krydset. Der kunne samtidig være brugt et kriterie for den maksimale middelforsinkelse i det højest belastede kørespor. Dermed ville der være taget hensyn til serviceniveauet for de venstresvingende trafikanter. Et sådan kriterie ville resultere i, at Scenarie 2 får højere sammenbrudstrafikmængde end Scenarie 1.

- Er busser og lastbiler vigtigere at få igennem krydset end biler? Hvis der kører kollektiv transport gennem krydset, kan det vælges at prioritere busserne, så der skabes mindst mulig ventetid for passagererne i den kollektive transport. Dette er oftest en politisk beslutning, da det fremmer attraktiviteten af den kollektive transport, hvis busserne bliver prioriteret i signalanlæggene.

- Hvilke kriterier ønskes signalanlægget optimeret i forhold til: Ventetid, brændstofforbrug, flest mulige trafiktanter igennem, kollektiv trafik eller noget helt andet? Hvis et område skal prioriteres, vil det typisk ske på bekostning af et andet område. Ønskes det eksempelvis at optimere på brændstofforbruget, skal antallet af stop og accelerationer minimeres. Dette vil optimeres mest muligt ved at give længere grøntid til de trafikstrømme med flest trafikanter, så det kun er på de mindre trafikerede veje, at trafikanterne laver opbremsninger. Dette vil dog medføre øgede forsinkelser for trafikanterne på de mindre trafikerede veje. Derudover bruger den tunge trafik mere brændstof end personbiler, og derfor vil brændstofforbruget mindskes, hvis den tunge trafik prioriteres, så de så vidt muligt undgår at stoppe i krydset.

## 8.2 Trafiksikkerhed kontra trafikafvikling

Ønskes det at lave et signalanlæg med så høj trafiksikkerhed som muligt, vil dette have en negativ indflydelse på trafikafviklingen og fremkommeligheden. Eksempelvis bundne svingfaser har en positiv

effekt på trafiksikkerheden, men en negativ effekt på trafikafviklingen. Dette skyldes, at der overordnet set vil være mere rødtid i omløbet, og fleksibiliteten i signalanlægget nedsættes.

I dette projekt blev der arbejdet med to forskellige sikkerhedstider for fodgængere. Den længste sikkerhedstid gav større trafiksikkerhed, da fodgængere fik længere tid til at rømme krydset, før de konfliktende trafikstrømme fik grønt lys. Den lange sikkerhedstid havde dog en negativ effekt på trafikafviklingen i krydset. Det var særligt i scenarierne med bundet venstresving, at den længere sikkerhedstid havde en negativ effekt på fremkommeligheden og førte til større forsinkelser. Herudover er der en mulig risiko for, at trafikanter vil blive utålmodige og potentielt køre i gult/rød-perioden, hvis trafikanternes erfaring er, at mellemtiden er meget lang i det specifikke kryds.

Udregningen af sikkerheds- og mellemtider har høj indflydelse på signalanlæggets effektivitet. Udregningen er foretaget i henhold til håndbogen Projektering af Signalanlæg, der benytter en hastighed på 50 km/t for alle rømmende og indkørende bilister. Dette giver samlet set brugbare sikkerhedstider, men det kan overvejes at justere de enkelte værdier for trafikanthastigheder. Et studie fra Via Trafik har anbefalet, at der i kryds med hastighedsbegrænsning på 50 km/t benyttes en værdi på 40 km/t for rømmende og indkørende bilisters hastighed. Herudover anbefaler de, at hastigheden for rømmende venstresvingende bilister sættes til 22 km/t. Generelt set anbefaler Via Trafik, at passagetiden efter grønt øges til 3,5 - 4 sek. i stedet for de nuværende 3 sek. Var disse værdier benyttet i stedet for værdierne fra vejreglerne, havde det givet anderledes resultater for sikkerhedstiderne. [Via Trafik, 2018]

I opførelsen og opsætningen af et signalanlæg vil det være en afvejning, hvor højt trafiksikkerheden og trafikafviklingen vægtes i krydset. I dette projekt er der taget størst hensyn til trafiksikkerheden i Scenarie 3, 4 og 5, da disse indeholder bundet venstresving. Det blev dog også observeret, at det bundne venstresving generelt nedsatte fremkommeligheden i krydset. Der kunne yderligere være indsat bundet højresving, der kan forhindre højresvingsulykker med cyklister. Dette havde formentligt haft en yderligere negativ effekt på fremkommeligheden, der dog kan mindskes, hvis de det bundne højresving afvikles i samme fase som det bundne venstresving.

## 8.3 Fleksibilitet i det designede signalanlæg

Under opsætningen af signalanlægget, skal der tages stilling til, hvor fleksibelt krydset skal være. I dette projekt er der lagt nogle bindinger på signalanlægget for at få det til at være repræsentativt for så mange eksisterende kryds som muligt. Eksempelvis er hovedsignalerne bundet sammen, så A1 og A2 altid har grønt samtidig, og B1 og B2 altid har grønt samtidig. Ligeledes er svingpilene bundet sammen i grupper, der har grønt samtidig.
Med den teknologiske udvikling og større fokus på trafikstyring, er der mulighed for at lave anlæg, hvor hver retning styres særskilt. Et eksempel på dette kunne være, hvis der var et stort antal venstresvingende trafikanter i A1v/A1V, men meget få eller ingen i A2v/A2V. Her kunne det vælges at lukke ned for alle trafikanter i A2-retningen og i stedet give grøn venstresvingspil for A1v/A1V samt holde hovedsignalet grønt for de ligeudkørende i A1. Ved at gøre dette vil de venstresvingende blive afviklet samtidig med, at der kan afvikles et større antal ligeudkørende i A1. Dette vil overordnet være bedre for trafikafviklingen end at give grønt samtidig for A1v/A1V og A2v/A2V, hvis der ikke er behov for at give grønt i A2v/A2V.
Trafikafviklingen i modelkrydset i dette projekt kunne muligvis have været optimeret ved at modellere signalanlægget mere fleksibelt. Det blev dog vurderet, at det ville være repræsentativt for flere eksisterende kryds at binde retningerne til hinanden.

## 8.4 Fritliggende kontra samordnet signalanlæg

I dette projekt er det valgt at lave modelkrydset som et fritliggende signalanlæg. Dette er primært valgt for at kunne isolere effekterne af hvert enkelt tiltag ved at begrænse antallet af variable. Derudover minimeres mulighederne for fejlindtastninger ved at have en mere simpel model.
Ved flere samordnede kryds skal der yderligere tages hensyn til, at effekterne kan være anderledes afhængigt af, hvordan ændringerne tilpasses samordningen. Dette skyldes primært, at ankomstfordelingerne har indflydelse på trafikafviklingen og forsinkelsen i et signalreguleret kryds.

## 8.5 Antal repetitioner

Vejreglens metode til udregning af antal gentagelser er ikke fordelagtig ved simuleringer med varierende trafikmængder, da beregningen skal gentages ved hver anvendt trafikmængde. Det udregnede antal gentagelser øges ved høj kapacitetsudnyttelse, hvilket i dette projekt gav op mod 200 gentagelser ved de højest anvendte trafikmængder. Det vil i praksis kræve stort tidsforbrug at køre simuleringerne med så mange gentagelser, og dette var ikke tidsmæssigt muligt med det høje antal simuleringer, der blev udført i dette projekt.
Et højt antal gentagelser er muligvis ikke nødvendigt i et projekt som dette, da hovedpointen er at sammenligne scenarierne med hinanden for at finde effekten af de forskellige tiltag. De stokastiske variabler i Vissim-modellen vil være identisk i alle scenarier, da det er de samme gentagelser der køres (i Vissim kaldet samme random seed).

## 8.6 Bindinger ved ATS controller

Fordelen ved ATS softwaren er, at den kan tilpasse signalprogrammet til ændringer i trafikken. I forhold til sammenligning af resultaterne skal bindingerne i signalanlægget dog være de samme for, at sammenligningsgrundlaget er ens.

Ved gennemgang af simuleringerne med ATS controlleren viste det sig, at ATS havde en kortere maksimal omløbstid end den traditionelle controller. Fejlen viste sig at være opstået ved, at ATS under opsætning af controlleren fik indtastet en forkert værdi. Dette resulterede i, at den maksimale omløbstid blev kortere ved ATS, og A-retningen havde kortere grøntid på et omløb, end den burde have haft. Dette kan forklare nogle af forskellene mellem resultaterne. Hvis den ene controller har længere omløb, vil den være mere effektiv, da mellemtiderne udgør en mindre del af omløbet.

En vigtig parameter i ATS controlleren er den maksimale ventetid. Den definerer, hvor lang tid den første trafikant i et kørespor må holde for rødt lys, før trafikanten får førsteprioritet i fasevalget. Denne parameter har i dette projekt været sat til 40 sek. Ud fra resultaterne ved lave trafikbelastninger, blev det observeret, at de venstresvingende havde en forsinkelse, der tilnærmelsesvis svarede til maks. ventetiden. Det kan herudfra diskuteres, hvorvidt maks. ventetiden skal differentieres ved forskellige tidspunkter med forskellige trafikmængder, så der opretholdes et højere serviceniveau for venstresvingende i situationer med lav trafikbelastning.

## 8.7 Vurdering af Vissim som simuleringsværktøj

En af styrkerne ved Vissim er det høje antal parametre, der kan justeres. Vejreglens anbefalinger til parameterværdier bygger på observationer og empiriske værdier. Det kan være vanskeligt at opnå korrekt kalibrering af værdierne alene på baggrund af de angivne værdier i vejreglen. Dette vil påvirke reliabiliteten af resultaterne, hvis der kigges på de specifikke resultater for mængden af afviklet trafik.

Forholdet mellem resultaterne i de forskellige scenarier og controllere vil imidlertid stadigvæk være gyldigt, da adfærden er den samme i modellerne. Dette vil sige, at de fundne sammenbrudspunkter indeholder usikkerheder, men forholdet mellem sammenbrudstrafikmængderne i hvert scenarie er mindre usikkert. I Vissim er det følgende adfærdparametre, der vurderes relevant for simulering i signalanlæg:

- Følgeafstand
- Hastighed
- Reaktionstid
- Fletteparametre
- Acceleration og decceleration

## 8.8 Fjernelse af biler i Vissim

I Vissim findes en indstilling, der sikrer, at trafikken ikke går helt i stå, fordi der holder biler og ikke kan flette sammen. Hvis en bil skal foretage et vognbaneskift for at gennemføre sin rute, men den øvrige trafik forhindrer dette vognbaneskift, vil bilen blive fjernet fra modellen, når den har holdt helt stille i 60 sek. i træk. Efter endt simulering viser Vissim en log over fejl i løbet af simuleringen. Disse fejl indebærer, hvor mange biler der er fjernet i hver gentagelse, samt hvorvidt nogle trafikinput ikke kunne gennemføres grundet trafikopstuvning. Sidstnævnte fejl opstår ved, at vejen i modellen er helt fyldt med biler, hvormed der fysisk ikke er plads til at sende flere biler ind.
Det blev i dette projekt observeret, at der i Scenarie 1, 2 og 3 ved høje trafikmængder opstod problemer med, at trafikinputtet ikke kunne gennemføres. I Scenarie 4 og 5 opstod der ved høje trafikmængder problemer med, at bilister blev fjernet fra modellen, fordi de ikke kunne foretage vognbaneskift. Disse problemer opstod primært ved trafikmængder højere end sammenbrudsmængderne, hvorfor det er vurderet, at betydningen på resultaterne var begrænset. På Figur 6.2 og Figur 6.6 blev det dog valgt at begrænse de viste resultater, da det særligt i Scenarie 3 ved trafikmængder med mere end 60 % forøgelse fra basismængden blev vurderet, at resultaterne blev upålidelige grundet et stort antal fejl.

# Litteraturliste


Aimsun, 2016, *Modelling medway*. Besøgt: 14-02-2019. URL: https://www.aimsun.com/medway-model/.

Ayyub, Bilal og Richard McCuen, 2011, *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists*. Taylor og Francis Group.

Buch, Thomas m.fl., 2017, „Store sikkerhedseffekter ved bundne svingfaser". I: *Trafik & Veje*.

Buck, Sebastian, Nicolai Mallig og Peter Vortisch, 2017, „Calibrating Vissim to Analyze Delay at Signalized Intersections". I: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2615, s. 73–81. DOI: 10.3141/2615-09.

Burghout, Wilco, 2006, „Hybrid Traffic Simulation Models: Vehicle Loading at Meso - Micro Boundaries". I: DOI: 10.1201/9781439808016-c2.

COWI og Københavns Kommune, 2012, *Mikrosimulering af cyklister i myldretid - vejledning*. Tek. rap.

Danmarks Statistik, 2016, *Flere pendler længere til arbejde*. URL: https://www.dst.dk/da/Statistik/nyt/NytHtml?cid=27211.

— , 2019, *Folketal den 1. i kvartalet*. URL: http://www.statistikbanken.dk/GALDER.

Ehlert, Anett, Arne Schneck og Nate Chanchareon, 2016, „Junction parameter calibration for mesoscopic simulation in Vissim". I: *Transportation Research Procedia*.

Eriksen, Andreas m.fl., 2019, „Controlling Signalized Intersections using Machine Learning". I:

Aagaard, Pierre E. m.fl., 1998, *PEDESTRIANS' AND CYCLISTS' EFFECT ON CAPACITY OF THE RIGHT-TURN MOVEMENT AT SIGNALIZED INTERSECTIONS: AN EMPIRICAL PILOT STUDY*. Besøgt: 18-02-2019. URL: http://www.trafikdage.dk/td/papers/papers98/kap_veje/p_aagaard/p_aagaard.pdf.

Herrstedt, Lene, 1981, *Fodgængertrafik i byområder*. Danmarks tekniske højskole.

Hussain, Etikaf, Muhammad Bilal Nawaz og Mir Ali, 2017, „Calibration and Validation of VISSIM for signalized intersection of Karachi". I: URL: https://www.researchgate.net/publication/322050379_Calibration_and_Validation_of_VISSIM_for_signalized_intersection_of_Karachi.

Lahrmann, Harry og Steen Leleur, 1994, *Vejtrafik*. Polyteknisk Forlag.

Ma, J. m.fl., 2011, „A study on multi-resolution scheme of macroscopic-microscopic traffic simulation model". I: ISSN: 2153-0017. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083058.

PTV Group, 2018, *Vissim 10 manual*. PTV Group.

Tian, Zong Z. m.fl., 2002, „Variations in Capacity and Delay Estimates from Microscopic Traffic Simulation Models". I: *Transportation Research Record*. DOI: 10.3141/1802-04. URL: https://doi.org/10.3141/1802-04.

Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019, *Bekendtgørelse om anvendelse af vejafmærkning*. URL: https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=196669.

Vejdirektoratet, 2012, *Konsekvenser for trafikanter og samfund - bedre trafiksignaler*. Tek. rap. URL: http://vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/temaer/its/Documents/VD_Bedre_trafiksignaler.pdf.

— , 2015, *Kapacitet og Serviceniveau*. Tek. rap.

— , 2018a, *Nøgletal om vejtransport*. Tek. rap. URL: http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/statistik/Sider/default.aspx.

— , 2018b, *Projektering af trafiksignaler*. Tek. rap. URL: http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=Projektering+af+trafiksignaler&docId=vd20180119-full.

— , 2018c, *Statsvejnettet 2018*. Tek. rap. URL: http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/980/Statsvejnettet_2018_WEB_2.pdf.

— , 2018d, *Vejkryds i Byer*. Tek. rap. URL: http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=midterheller&docId=vd20180158-full.

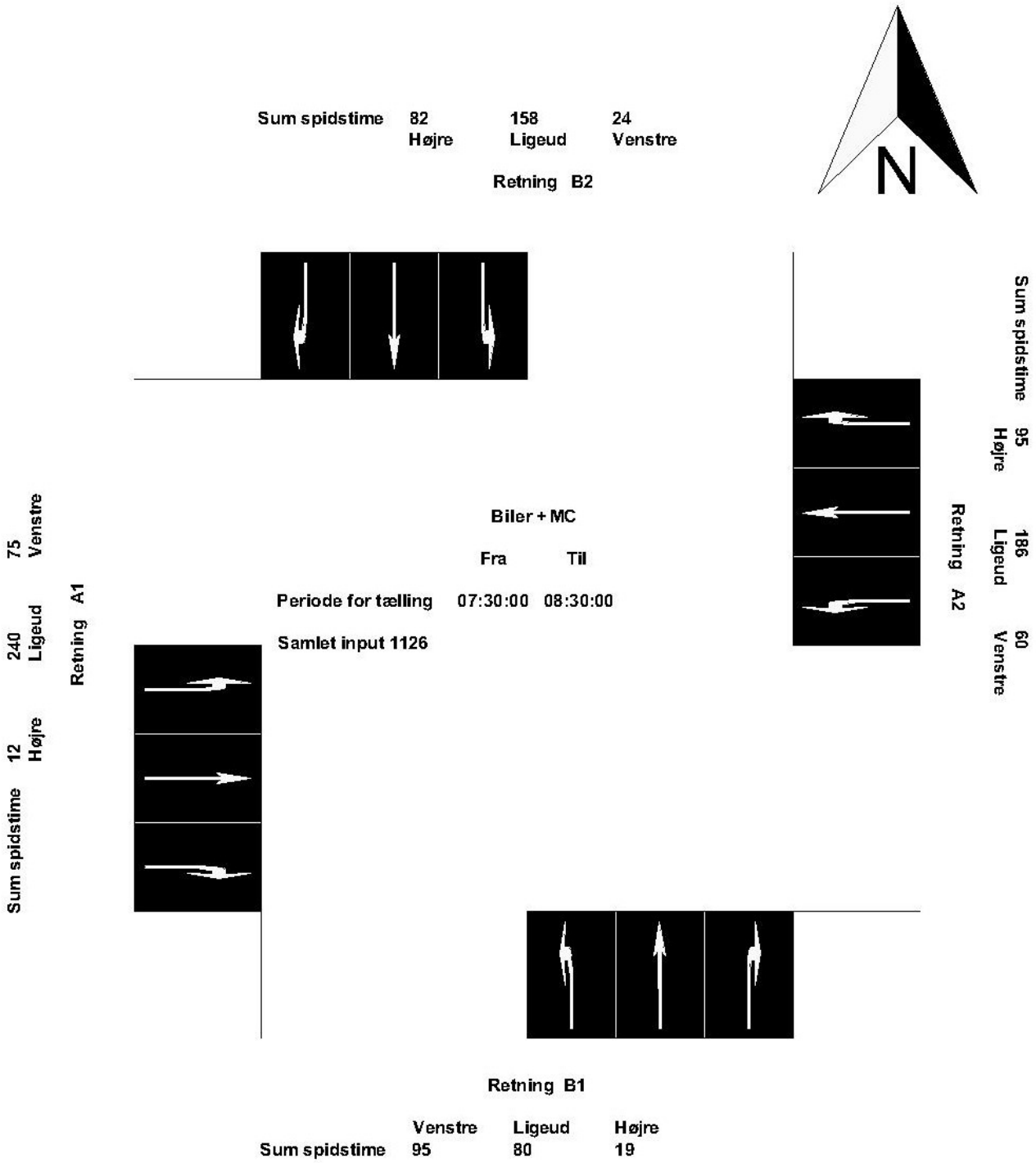
— , 2019, *Anvendelse af mikrosimuleringsmodeller - hørings udgave*. Tek. rap. URL: http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=mikrosimulering&docId=vd20190017-full.

Via Trafik, 2018, *Fastlæggelse af sikkerhedstider i trafiksignalanlæg*. Tek. rap.

Wu, Ning, 2007, „Total Approach Capacity at Signalized Intersections with Shared and Short Lanes: Generalized Model Based on a Simulation Study“. I: *Transportation Research Record* 2027, s. 19–26. DOI: 10.3141/2027-03.

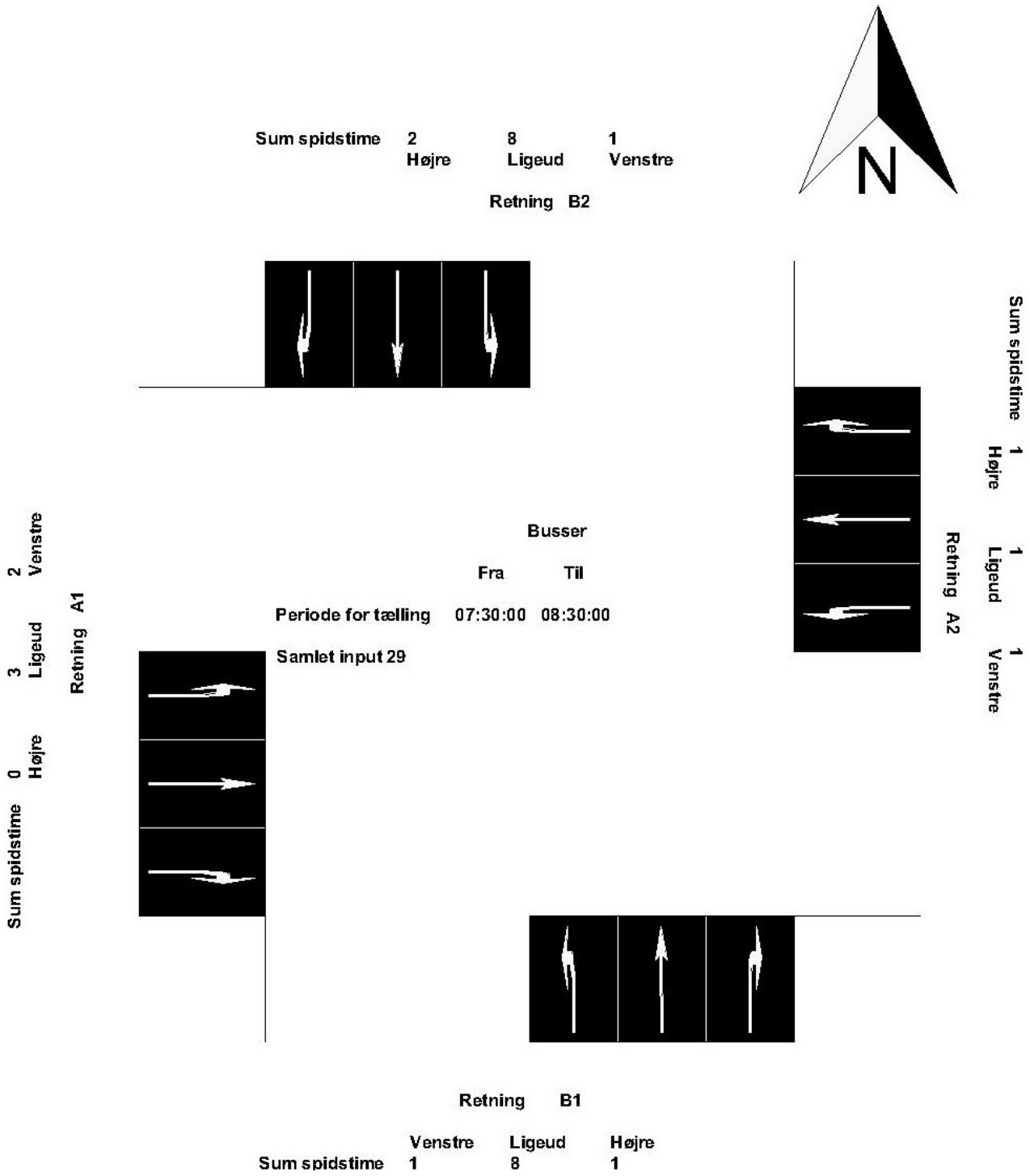
# Trafikinput A

## A.1 Biltrafik



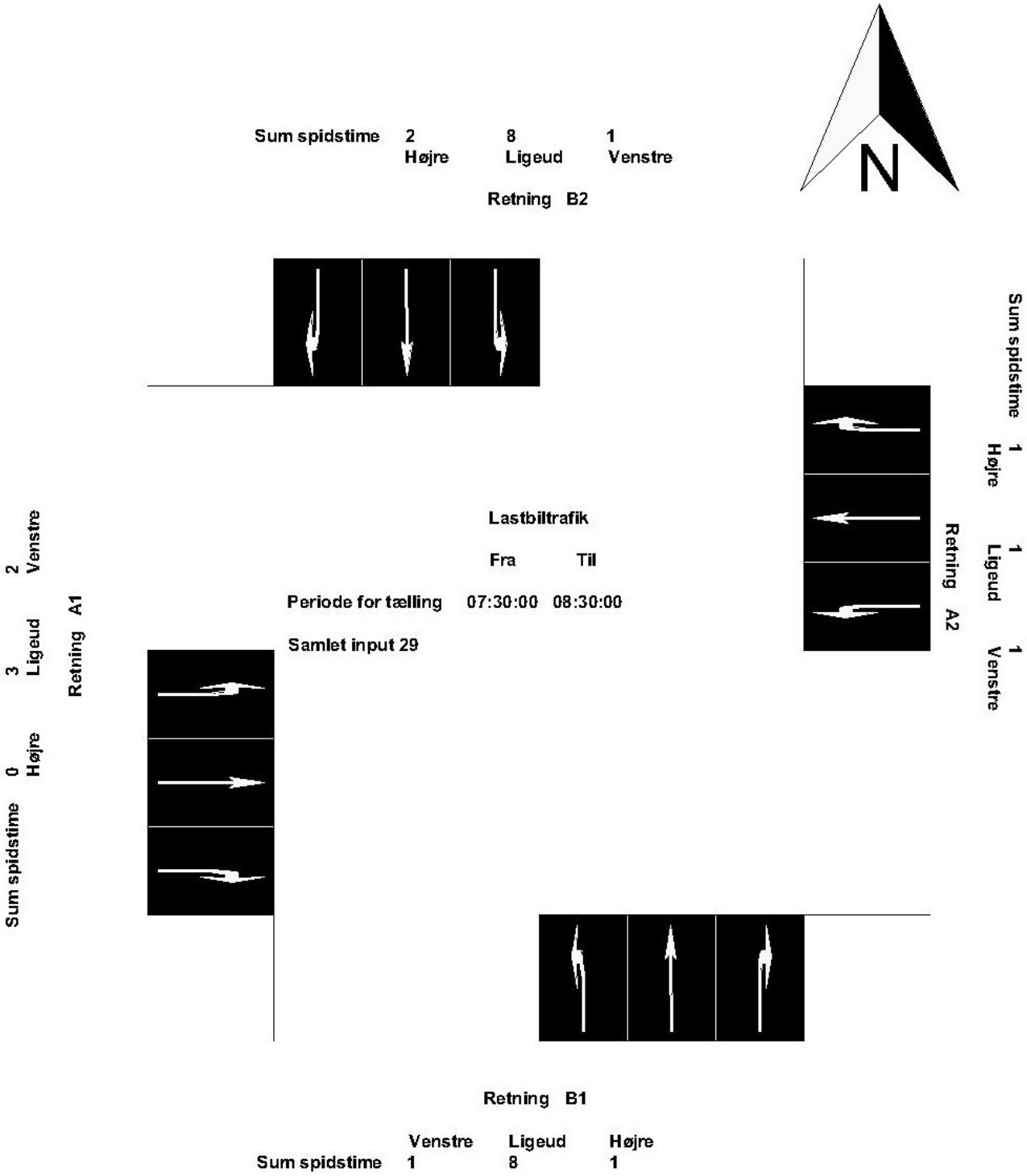

***Figur A.1.*** Trafiktal for biltrafikken i krydset.

## A.2 Bustrafik



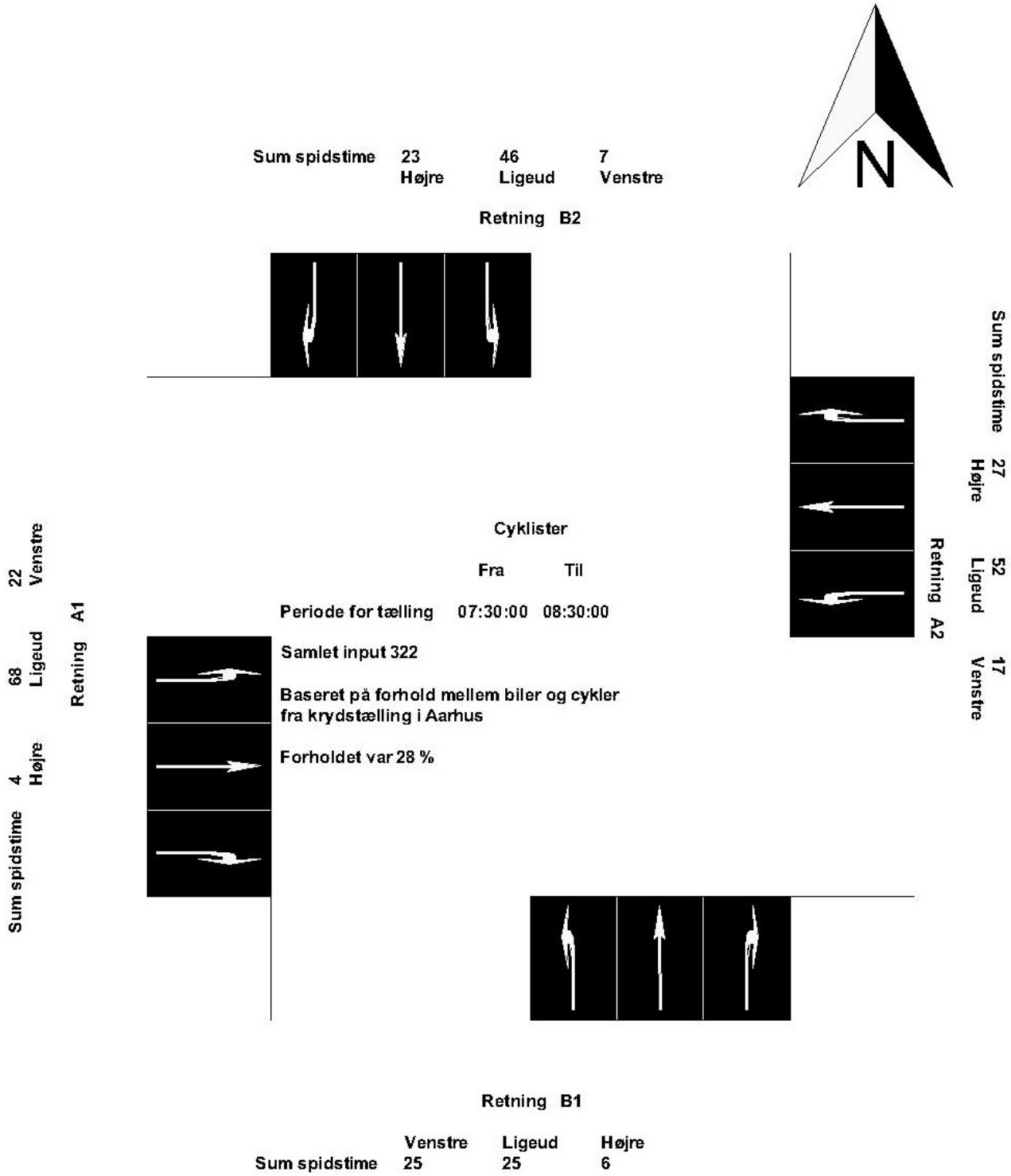

***Figur A.2.*** Trafiktal for bustrafikken i krydset.

## A.3 Lastbiltrafik



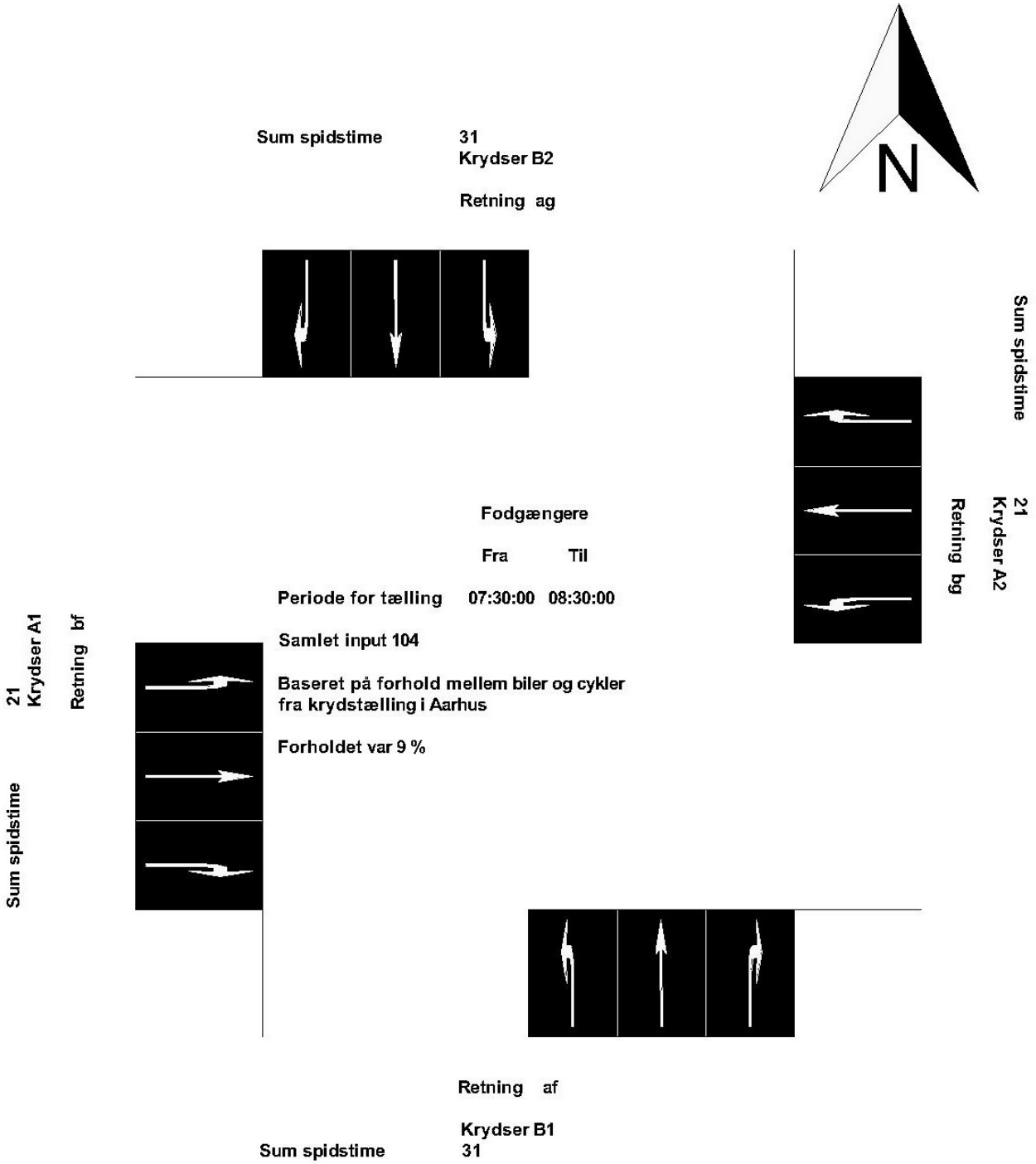

***Figur A.3.*** Trafiktal for lastbiltrafikken i krydset.

## A.4 Cykeltrafik




***Figur A.4.*** Trafiktal for cykeltrafikken i krydset.

## A.5 Fodgængeretrafik




***Figur A.5.*** Trafiktal for fodgængeretrafikken i krydset.