

Mesosimulering i Aimsun

Parameterstudie for å simulere riktig
forsinkelse i kryss

Torbjørn H Birkeland

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Arvid Aakre, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Mesosimulering i Aimsun Parameterstudie for å simulere riktig forsinkelse i kryss	Dato: 08.06.2016 Antall sider (inkl. bilag): 122
	Masteroppgave <input checked="" type="checkbox"/> Prosjektoppgave <input type="checkbox"/>
Navn: Torbjørn Hogstad Birkeland	
Faglærer/veileder: Arvid Aakre, Trafikkteknisk senter ved NTNU	
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Jenny Persson, Asplan Viak	

Ekstrakt: <p>Erfaring med mesoskopiske trafikkmodeller i Norge tyder på at adferdsmodellene som brukes må kalibreres for å oppnå riktig trafikkfordeling i nettverket. Denne parameterstudien hentet inn data gjennom video-opptak fra tre ulike krysstyper i Trondheimsområdet for å kalibrere vikepliktsmodellen, <i>gap-acceptance model</i>, for Aimsun 8.1.3s mesonivå.</p> <p>Det ble studert en generell svingebevegelse i hvert av kryssene for å kalibrere <i>gap-acceptance model</i> med mål om å oppnå samsvar mellom observert og simulert forsinkelse. Forsinkelse ble valgt som resultatmål på grunn av dets viktighet i Aimsuns dynamiske trafikkfordeling. Svingebevegelsene som ble studert var en generell svingebevegelse inn i rundkjøring, en venstresving ut på hovedveg i et vikepliktsregulert kryss og en rett-fram bevegelse i signalanlegg. Svingebevegelsen i signalanlegget ble brukt til å fastsette parameteren <i>reaction time</i> som er den viktigste parameteren som bestemmer forsinkelse.</p> <p>Den fastsatte <i>reaction time</i> ble videre brukt som grunnlag til kalibrering av <i>gap-acceptance model</i> for svingebevegelsen inn i rundkjøring og venstresving ut på hovedveg. Resultatene fra kalibreringen i parameterstudien indikerer at parameterne <i>initial</i> og <i>final safety margin</i> burde settes henholdsvis over og under estimert kritisk tidsluke for den aktuelle svingebevegelsen. Mesomodellen i Aimsun bruker samme standardverdi for <i>initial</i> og <i>final safety margin</i> for alle svingebevegelser. Resultatene fra denne studien peker på at dette gir en for lav forsinkelse i svingebevegelser med en høy målt kritisk tidsluke som venstresvingen ut på hovedveg. For svingebevegelsen inn i rundkjøring stemmer standardverdiene for <i>initial</i> og <i>final safety margin</i> godt med kritisk tidsluke. Simulert forsinkelse ble også tilnærmet lik observert forsinkelse for svingebevegelsen inn i rundkjøringen.</p>

Stikkord:

1. Aimsun
2. Kalibrering
3. Gap-acceptance model
4. Forsinkelse

(sign.)

Forord

Denne avsluttende masteroppgaven er skrevet av Torbjørn Hogstad Birkeland ved Institutt for bygg, anlegg og transport ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og er skrevet i løpet av vårsemesteret 2016.


Masteroppgaven er todelt og består av en prosessrapport og en vitenskapelig artikkel. Temaet for oppgaven er mesoskopisk trafikksimulering i Aimsun. Høsten 2015 ble problemstillingen utarbeidet sammen med et litteraturstudie gjennom prosjektoppgaven som var et forprosjekt for masteroppgaven. Oppgaven er et parameterstudie av vikepliktsmodellen, *gap-acceptance model*, i trafikksimuleringsprogrammet Aimsun og har som mål om å finne et sett med parametre som beskriver forsinkelsen i generelle svingebevegelser i kryss riktig for Aimsuns mesomodell.

Prosessrapporten er første del av oppgaven og er basert på «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjekt- og masteroppgaver» utformet av Institutt for bygg, anlegg og transport i 2013. Den vitenskapelige artikkelen er andre del av oppgaven og er planlagt å sendes inn til «14th Aimsun Users' Meeting» i september 2016.

Takk til hovedveileder Arvid Aakre ved Trafikkteknisk senter ved NTNU for gode råd gjennom hele prosessen fra definering av problemstilling, innspill til datainnsamling, tips om aktuell faglitteratur og til gode tilbakemeldinger før innlevering. Videre rettes det en takk til Erlend Hoksrud Aakre som sammen med Arvid har bidratt med definering av problemstilling og gitt tilbakemeldinger på den vitenskapelige artikkelen og råd om simulering i Aimsun.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Asplan Viak gjennom Asplan Viak-programmet 2015. En takk rettes til Kari Skogstad Norddal for gode oppgaveforslag tidlig i prosessen og til Jenny Persson for god oppfølging og gode diskusjoner om oppgaven gjennom hele prosessen.

Trondheim, juni 2016



Torbjørn Hogstad Birkeland

Sammendrag

Erfaring med mesoskopiske trafikkmodeller gjennom Aimsun i Norge tyder på at adferdsmodellene som brukes må kalibreres for å oppnå riktig trafikkfordeling i nettverket. Denne parameterstudien hentet inn data fra tre ulike krysstyper i Trondheimsområdet gjennom video-opptak for å kalibrere vikepliktsmodellen, *gap-acceptance model*, for Aimsun 8.1.3s mesonivå.

Det ble studert en generell svingebevegelse i hvert av kryssene for å kalibrere *gap-acceptance model* med mål om å oppnå samsvar mellom observert og simulert forsinkelse. Forsinkelse ble valgt som resultatmål på grunn av dets viktighet i Aimsuns dynamiske trafikkfordeling. Forsinkelsen i de aktuelle svingebevegelserne med vikeplikt ble estimert ved hjelp av å måle kølengde over tid for å bruke Little's Law. Siktparametrene *visibility along main stream* og *look-ahead distance* er ikke tatt med i studien.

Svingebevegelserne som ble studert var en generell svingebevegelse inn i rundkjøring, en venstresving ut på hovedveg i et vikepliktregulert kryss og en rett-fram bevegelse i signalanlegg. Svingebevegelsen i signalanlegget ble brukt til å fastsette parameteren *reaction time* gjennom å oppnå samsvar mellom simulert forsinkelse og estimert forsinkelse i signalanlegg ut fra analytisk beregning.

Den fastsatte *reaction time* ble videre brukt som grunnlag til kalibrering av *gap-acceptance model* for svingebevegelsen inn i rundkjøring og venstresving ut på hovedveg. Resultatene fra kalibreringen i parameterstudien indikerer at parametrene *initial* og *final safety margin* burde settes henholdsvis over og under estimert kritisk tidsluke for den aktuelle svingebevegelsen. For svingebevegelsen inn i rundkjøring stemmer standardverdiene for *initial* og *final safety margin* godt med kritisk tidsluke og dette gir også tilnærmet godt samsvar mellom observert og simulert forsinkelse. For svingebevegelsen venstresving ut på hovedveg stemmer ikke standardverdiene for *initial* og *final safety margin* med kritisk tidsluke. Resultatene fra denne studien peker på at standardverdiene i Aimsuns mesomodell gir en for lav forsinkelse i svingebevegelser med høy kritisk tidsluke som venstresvingen ut på hovedveg. Det gis anbefaling om at disse svingebevegelserne burde få justert opp *initial* og *final safety margin* i henhold til en verdi for kritisk tidsluke.

Summary

Experience with mesoscopic traffic models in Norway suggests that the behaviour models used need to be calibrated in order to achieve correct traffic assignment. This study gathered data from three separate intersections in Trondheim, Norway; a signalized intersection, a roundabout and a give-way ramp, in order to calibrate Aimsun's mesoscopic gap-acceptance model. One turning movement from each intersection were studied. Delay time was used as the measure of performance because of its importance in Aimsun's dynamic traffic assignment.

The signalized intersection was used to find a global value for the Reaction Time that gave compliance with the analytical estimated delay time and saturation flow rate. This Reaction Time was then used as a basis when calibrating the gap-acceptance parameters in the roundabout and give-way ramp.

In the two studied give way turnings the queue lengths were observed in order to estimate the average delay time with Little's Law. The parameters Visibility Along Main Stream and Look-ahead Distance were excluded from this study.

The analysis suggests that the gap-acceptance parameters Initial and Final Safety Margin should be set, respectively, below and above an estimated critical gap for the defined turning. For the turning in the roundabout the default values of Initial and Final Safety Margin correspond well with the observed critical gap. The simulated delay in this turning were also in compliance with the observed delay. However, for the left turning the default values of Initial and Final Safety Margin were too low to be in correspondence with the critical gap. The simulated delay time was also much lower than the observed delay using the default parameters in the gap-acceptance model and defined Reaction Time.

The results of the study indicate that the default values of the gap-acceptance model simulate too low delay times for turning with high critical gap values, such as left turn onto main road, and these turnings are recommended to be calibrated with using an estimated critical gap in order to achieve compliant delay times.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Sammendrag	iv
Summary	v
Figurliste for prosessrapport.....	ix
Tabelliste for prosessrapport	xi
Figurliste for vitenskapelig artikkel	xii
Tabelliste for vitenskapelig artikkel	xii
Definisjoner.....	xiii
DEL I: PROSESSRAPPORT.....	1
1. Innledning.....	2
1.1 Bakgrunn	2
1.2 Formål.....	3
1.3 Rapportens oppbygging	3
2. Metode.....	5
2.1 Litteraturstudie.....	5
2.2 Estimering av observert forsinkelse	5
2.3 Estimering av kritisk tidsluke og følgetid.....	9
2.4 Kalibreringsprosess av parametrene	10
3. Teoretisk grunnlag.....	13
3.1 Oppbyggingen av Aimsuns mesomodell.....	13
3.2 Forsinkelse i meso-modellen til Aimsun	15
3.3 Sammenheng mellom forsinkelse og rutevalg.....	16

3.4	Tidslukemodeller	18
3.5	Mesoskopisk gap-acceptance model i Aimsun.....	19
3.6	Parametre som bestemmer forsinkelse	21
3.7	Kalibrering og validering.....	24
4.	Planlegging og gjennomføring av datainnsamling.....	27
4.1	Krav til kryss som skulle observeres	27
4.2	Identifisering av aktuelle kryss	29
4.3	Vikeplikt-kryss.....	30
4.4	Rundkjøring	33
4.5	Signalanlegg	35
5.	Resultater fra innsamlet data	39
5.1	Data fra vikeplikt-kryss på Tunga.....	39
5.2	Data fra rundkjøring i Ila	44
5.3	Data fra signalanlegg på Nardo	48
6.	Kalibreringsprosess og simuleringsresultater.....	51
6.1	Dokumentasjon av modell	51
6.2	Fastsette antall simuleringsreplikasjoner	55
6.3	Maksimal tetthet i køsituasjon	56
6.4	Reaksjonstidsparametre	56
6.5	Parametre i gap-acceptance model	58
7.	Diskusjon.....	64
7.1	Sammenligning med litteratur og undersøkelser	64
7.2	Sammenligning med SIDRA INTERSECTION 6.1	66
7.3	Svakheter og begrensninger.....	67

8.	Konklusjon, anbefalinger og videre arbeid	70
8.1	Oppsummering og konklusjon.....	70
8.2	Anbefalinger	71
8.3	Videre arbeid	72
9.	Avslutning	73
10.	Referanser.....	74
	DEL II: VITENSKAPELIG ARTIKKEL	76
	CALIBRATION OF AIMSUN’S MESOSCOPIC GAP-ACCEPTANCE MODEL WITH DELAY TIME AS MEASURE OF PERFORMANCE	1
1.	INTRODUCTION	1
2.	METHODOLOGY	2
3.	DATA COLLECTION	4
4.	RESULTS	6
5.	DISCUSSION.....	10
6.	CONCLUSION.....	11
7.	BIBLIOGRAPHY	11
	VEDLEGG	a

Figurliste for prosessrapport

Figur 1 - Antall enheter i kø over en tidsperiode. Hentet fra Little & Graves (2008)	6
Figur 2 - Veg-tid diagram som illustrerer forsinkelse. Hentet fra Dion et al. (2002)	7
Figur 3 - Illustrasjon av Sieglochs metode hentet fra Aakre. A. (2015)	10
Figur 4 - Illustrasjon av kalibreringsprosessen gjennom tre steg	12
Figur 5 - Kjøretøybevegelse i Aimsuns mesomodell. Hentet fra Casas et al. (2010)	14
Figur 6 - Illustrasjon av køsituasjon fra mikrosimulering i Aimsun 8.1.3	16
Figur 7 - Iterativ prosess for rutevalg fritt oversatt fra Gaziz (2002).....	17
Figur 8 - Illustrasjon av situasjon i gap-acceptance model fra Aimsun 8.1.3	19
Figur 9 - Illustrasjon over sikkerhetsmargin for tidsluke som endres over tid. Hentet fra Transport Simulation Systems (2016).....	20
Figur 10 - Kalibrering- og valideringsprosess hentet fra Daamen et al. (2014).....	24
Figur 11 - Iterativ kalibreringsprosess hentet fra Casas et al (2010)	25
Figur 12 - Illustrasjon fra ArcMap over plasseringen til de observerte vikeplikt kryssene i Trondheim. Målestokk 1:50 000	30
Figur 13 - Illustrasjon av valgt X-kryss på Tunga fra SIDRA INTERSECTION 6.1	31
Figur 14 - Bilder fra de to ulike kameraposisjonene på Tunga	32
Figur 15 - Illustrasjon fra ArcMap over plasseringen til de observerte rundkjøringene i Trondheim. Målestokk 1:100 000	33
Figur 16 - Illustrasjon av valgt rundkjøring i Ila fra SIDRA INTERSECTION 6.1	34
Figur 17 - Kameraplassering ved rundkjøring i Ila	35
Figur 18 - Illustrasjon fra ArcMap over plasseringen til de observerte signalanleggene i Trondheim. Målestokk 1:50 000	36

Figur 19 - Illustrasjon av valgt signalanlegg på Nardo fra SIDRA INTERSECTION 6.1	37
Figur 20 - Kameraplassering ved signalanlegg på Nardo	38
Figur 21 - Trafikkvolum på Tunga fra SIDRA INTERSECTION 6.1	39
Figur 22 - Samlet trafikkfordeling for alle svingebevegelser på Tunga fra Aimsun 8.1.3	40
Figur 23 - Kølengde for venstre- og høyresving ved vikeplikt-kryss på Tunga.....	41
Figur 24 - Estimering av kritisk tidsluke og følgetid for venstresving ut på hovedveg i vikeplikt-krysset	43
Figur 25 - Trafikkvolum fordelt på svingebevegelser i Ila fra SIDRA INTERSECTION 6.1	44
Figur 26 - Samlet trafikkfordelingen for alle svingebevegelser i Ila fra Aimsun 8.1.3	45
Figur 27 - Kølengde over tid for Fylkesveg 715 ved rundkjøring i Ila	46
Figur 28 - Estimering av kritisk tidsluke og følgetid for studert svingebevegelse i rundkjøring	48
Figur 29 - Illustrasjon av geometrisk oppbygging av de ulike kryssene i Aimsun 8.1.3	54
Figur 30 - Gjennomsnittlig forsinkelse som funksjon av reaksjonstid i signalanlegg	57
Figur 31 - Simulert forsinkelse for studert svingebevegelse i rundkjøringen som funksjon av final safety margin.....	59
Figur 32 - Simulert forsinkelse i rundkjøringen med varierende give way time factor	60
Figur 33 - Simulert forsinkelse for venstresvingen i vikeplikt-krysset som funksjon av final safety margin	61
Figur 34 - Simulert forsinkelse i vikeplikt-krysset med varierende give way time factor	62
Figur 35 - Forsinkelse i signalanlegg som funksjon av metningsgrad. Hentet fra Dion et al (2004)	65

Tabelliste for prosessrapport

Tabell 1 - Parametre til beregning av forsinkelse i signalanlegg	9
Tabell 2 - Oversikt over parametre som inngår i kalibreringsanalysen med standardverdier i meso-modellen	23
Tabell 3 - Forsinkelse i vikeplikt kryss for venstre- og høyresving	42
Tabell 4 - Kritisk tidsluke og følgetid for venstresving i vikeplikt kryss	43
Tabell 5 - Forsinkelse i rundkjøring	47
Tabell 6 - Kritisk tidsluke og følgetid i rundkjøringen	47
Tabell 7 - Data fra signalanlegget på Nardo	49
Tabell 8 - Metningsgrad og kapasitet for signalanlegg	49
Tabell 9 - Estimert forsinkelse i signalanlegg	50
Tabell 10 - Standardverdier for kjøretøyklassen car	51
Tabell 11 - Standardverdier for kjøretøyklassen truck	52
Tabell 12 - Tilpasset kjøretøylengde norske forhold for klassen car	52
Tabell 13 - Standardavvik i simulert forsinkelse	55
Tabell 14 - Maksimal tetthet observert for de ulike kryssene	56
Tabell 15 - Definerte parametre til kalibrering av gap-acceptance model	58
Tabell 16 - Kalibrerte verdier for rundkjøringen	61
Tabell 17 - Kalibrerte verdier for venstresvingen i vikeplikt krysset	63
Tabell 18 - Sammenligning av initial og final safety margin med ulike målinger for kritisk tidsluke	66
Tabell 19 - Anbefaling til initial og final safety margin	71

Figurliste for vitenskapelig artikkel

Figure 1 - Relationship between Initial and Final Safety Margin with Give-Way Time Factor from Transport Simulation Systems (2015)	2
Figure 2 - Studied turning movements from the left: signalized intersection, give-way ramp and roundabout from Aimsun 8.1.3 and Google Earth.	4
Figure 3 - Traffic counts and distribution for the observed hour in the give-way ramp	5
Figure 4 - Traffic counts and distribution for the observed hour in the roundabout	5
Figure 5 - Queue length over time in the studied turning movement in the give-way ramp	7
Figure 6 - Queue length over time in the studied turning movement in the roundabout	7
Figure 7 - Simulated delay time in the signalized intersection as a function of Reaction Time	8
Figure 8 - Simulated delay time in the give-way ramp as a function of Final Safety Margin. ..	9
Figure 9 - Simulated delay time in the roundabout as a function of Final Safety Margin.	9

Tabelliste for vitenskapelig artikkel

Table 1 - Input parameters to Akcelic's (1988) generalized formula for delay time	3
Table 2 - Observed phasing data and vehicle count in the signalized intersection	6
Table 3 - Critical gap and follow-up time for the give-way turnings	6
Table 4 - Results from the calibration of the Give Way Time Factor	10

Definisjoner

Parameterstudien i denne oppgaven er gjort i trafikksimuleringsprogrammet Aimsun som har engelsk språk som oppbygging. Det er derfor brukt de engelske begrepene skrevet i kursiv for de ulike adferdsmodellene og parametrene i programmet i denne oppgaven. Dette definisjonskapittelet inneholder en kort definisjon på de ulike begrepene, modellene og parametrene som er brukt i oppgaven.

Aimsun: Trafikksimuleringsprogram utviklet av Transport Simulation Systems (TSS) i Spania som simulerer på enten makro-, meso- og mikronivå.

Makro-, meso- og mikrosimulering: Simulering av ulik detaljgrad. Makrosimulering er med trafikkstrømmer og mikrosimulering er med enkeltkjøretøy. Meso-simulering defineres som en mellomting mellom disse to.

Gap-acceptance model: Adferdsmodell i mikro- eller mesosimulering i Aimsun som beskriver vikepliktsadferd i kryss. Hovedmodellen som analyseres i denne oppgaven.

Car-following model: Kjøretøymodell i Aimsun som beskriver hvordan kjøretøy beveger seg i forhold til kjøretøyet foran ved hjelp av ulike parametre. Basert på Gipps (1981) *car-following model*.

Lane-changing model: Beslutningsmodell i Aimsun som avgjør om simulerte kjøretøy vil endre felt der det er mulig. Videreutvikling av Gipps (1986) modell.

Lane-selection model: Beslutningsmodell i mesomodellen i Aimsun som bestemmer hvilket felt ut av et kryss et kjøretøy velger der det er flere muligheter.

Initial safety margin: Parameter brukt i Aimsuns *gap-acceptance model* som bestemmer sikkerhetsmarginen et kjøretøy krever for å akseptere en tidsluke i prioriterte trafikkstrømmer før den har ventet en tid tilsvarende *maximum give way time*. Defineres for hver svingebevegelse eller ut i fra vegtype.

Final safety margin: Parameter brukt i Aimsuns *gap-acceptance model* som bestemmer sikkerhetsmarginen et kjøretøy krever for å akseptere en tidsluke i prioriterte trafikkstrømmer etter den har ventet en tid tilsvarende *maximum give way time*. Defineres for hver svingebevegelse eller ut i fra vegtype.

Maximum give way time: Parameter brukt i Aimsuns *gap-acceptance model* som modellerer utålmodighet og bestemmer etter hvilken tid et kjøretøy velger å akseptere en kortere sikkerhetsmargin ved *final safety margin* over *initial safety margin*. Defineres for hver kjøretøyklasse.

Give way time factor: Faktor som justerer *maximum give way time* for alle kjøretøyklasser i svingebevegelser.

Jam density: Parameter som måles i kjøretøy per kilometer og brukes i Aimsuns mesomodell for å bestemme hvor mange kjøretøy som får plass på en vegstrekning. Brukes her i oppgaven synonymt med maksimal tetthet.

Reaction time: Den viktigste parameteren for mikro- og mesosimulering i Aimsun. Inngår i de fleste kjøretøy- og adferdsmodeller og avgjør tiden kjøretøy bruker på å oppfatte endringer eller å ta beslutninger.

Reaction time at traffic light: Parameter i Aimsuns mesomodell som brukes for første kjøretøy i hvert felt inn til et signalanlegg. Brukes for å ta hensyn til tapt tid i signalanlegg.

Reaction time factor: Faktor som defineres på vegstrekninger som endrer den definerte *reaction time* ved en gitt faktor.

Look-ahead distance: Parameter som brukes i Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model*. Denne parameteren bestemmer hvor tidlig kjøretøy med vikeplikt begynner å se fram mot krysset og kjøretøy med forkjøringsrett.

Visibility along main stream: Parameter som brukes i Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model* som bestemmer hvor langt oppstrøms trafikkstrømmer med forkjøringsrett det skal søkes etter kjøretøy.

Vehicle length: Parameter som brukes i de fleste beslutningsmodeller i Aimsun. Består av et gjennomsnittsmål for kjøretøyslengde og avvik fra dette for de ulike kjøretøyklassene

Warm-up: En definert trafikkmengde som fyller nettverket som simuleres over en gitt tidsperiode før den virkelige simuleringen og resultatene produseres. Brukes for å få riktig simuleringer siden nettverket sjeldent er helt tomt ved start.

SIDRA INTERSECTION 6.1: Analyseverktøy for å beregne og vurdere kapasitet- og avviklingsforhold for enkeltkryss eller små nettverk. Utviklet av SIDRA SOLUTIONS i Australia.

Peak flow period: Parameter i SIDRA INTERSECTION 6.1 som bestemmer hvor lang tid trafikktoppen for det definerte trafikkvolumet skal vare. Lavere *peak flow period* gir høyere trafikkintensitet over den definerte perioden og er også avhengig av *peak flow factor*.

Peak flow factor: Faktor i SIDRA INTERSECTION 6.1 som sammen med *peak flow period* bestemmer hvordan trafikken som er definert over tidsintervallet skal fordeles. Lavere faktor gir høyere trafikkintensitet over den definerte *peak flow period*.

Two-Way Sign Control-calibration (TWSC-calibration): Metode utviklet av SIDRA SOLUTIONS brukt i SIDRA INTERSECTION 6.1 for å bestemme kritisk tidsluke og følgetid basert på basisverdier, kryssgeometri, fartsgrenser og skiltregulering.

DEL I:
PROSESSRAPPORT

1. Innledning

Innledningen presenterer først bakgrunnen for oppgaven. Her gis det en kort innføring i hva trafikksimulering brukes til og hvorfor det er viktig å kalibrere modellene etter lokale forhold. Videre presenteres formålet med masteroppgaven og deretter beskrives den videre oppbyggingen av rapporten, samt oversikt over vedlagte dokumenter.

1.1 Bakgrunn

Trafikksimulering på mesoskopisk nivå er et nyttig planverktøy for å analysere rutevalg, avviklingsproblemer og alternative løsninger i større og kompliserte trafikknettverk. Trafikksimuleringsprogrammet Aimsun ble for noen år siden valgt som etatstandard for trafikksimulering på mesonivå i Norge av Statens Vegvesen. Aimsun er utviklet av Transport Simulation Systems (TSS) med hovedkontor i Barcelona. Programmet simulerer trafikken på mikro-, meso eller makronivå ved bruk av matematiske modeller med justerbare parametre. Erfaringer med trafikkmodeller og flere undersøkelser fra blant annet Fang & Elefteriadou (2005) og det danske Vejdirektoratet (2010) slår fast at standardparametrene i de matematiske modellene må kalibreres etter lokale trafikkforhold og lokal kjøreadferd for å få riktige simuleringsresultater.

Casas et al. (2010, s. 212) beskriver kalibreringsprosessen som en øvelse hvor en endrer modellparametrene for å få det simulerte resultatet til å stemme best mulig med innsamlet data fra virkelig trafikk. De vanligste data å samle inn og kalibrere etter er trafikkvolum og hastighet som også de datatypene som er lettest tilgjengelig. Metoden foreslått av Casas et al. (2010, s.213) for større nettverk går ut på å endre de globale parametrene for å oppnå et best mulig samsvar mellom simulert resultat og innsamlet data. Forfatterne kommenterer videre at en mer nøyaktig, men også mer tidkrevende metode er å kalibrere modellene som bestemmer kjøretøyadferd.

Det har vært mest fokus på forskning med kalibrering av parametre på mikronivå fram til nå, men det er stadig flere mesomodeller som lages i Norge og det er dermed viktig å forske på effekten av parametrene i de mesoskopiske modellene. De matematiske kjøretøymodellene som bygger opp mesonivået i Aimsun er en forenkling av de modellene som brukes på det mikroskopiske nivået og parametrene for *gap-acceptance model* er definert annerledes.

1.2 Formål

Formålet med oppgaven er å kalibrere hovedparametrene i Aimsun mesoskopiske *gap-acceptance model* med innsamlet data om forsinkelse i tre ulike krysstyper i Trondheimsområdet. Parametrene som skal kalibreres og som er en del av *gap-acceptance model* er *initial safety margin*, *final safety margin*, *give way time factor* og *maximum give way time*. I tillegg til disse skal også parametrene generell reaksjonstid og reaksjonstid ved rødt lys kalibreres for å oppnå riktig forsinkelse. Parametrene *vehicle length* og *jam density* blir satt ut i fra observerte verdier. Målet er å ende opp med et sett med parametre som gir riktig forsinkelse for de studerte svingebevegelesene i alle de undersøkte kryssene.

Følgende problemstilling skal besvares med avgrensingen til parametrene nevnt ovenfor:

«Hvilke verdier for utvalgte parametre i Aimsuns mesomodell simulerer forsinkelsen for generelle svingebevegelser i kryss mest nøyaktig»

Oppgaven er avgrenset til de utvalgte parametrene for å gjøre det mulig å gå i dybden på kalibrering av disse i Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model*. De utvalgte parametrene er også de som har størst påvirkning på forsinkelse i kryss og er dermed viktig å fokusere på. For å besvare på den definerte problemstillingen skal det først samles inn data fra tre ulike krysstyper. Denne dataen skal igjen brukes til å estimere en gjennomsnittlig forsinkelse som skal brukes som resultatmål opp mot den simulerte forsinkelsen.

1.3 Rapportens oppbygging

Masteroppgaven er delt inn i to hoveddeler, en prosessrapport og en vitenskapelig artikkel. Denne første delen er en prosessrapport som går i dybden på fremgangsmåten og metodene som er brukt for å besvare den definerte problemstillingen. Rapporten er utarbeidet i henhold til dokumentet med råd og retningslinjer for rapportskrivning ved Institutt for bygg, anlegg og transport (2013).

Prosessrapporten inneholder en teoretisk bakgrunn som bygger på det gjennomførte litteraturstudiet. Merk at den teoretiske bakgrunnen ikke er en fullstendig oversikt over simuleringsverktøyet og at det forventes at leseren har grunnleggende kunnskap om trafikkteori og trafikksimulering for å få mest ut av rapporten. Videre gjør prosessrapporten rede for hvordan datainnsamlingen ble gjort og presenterer analyse av innsamlet data.

Bakgrunnen for simuleringene er også dokumentert i prosessrapporten sammen med diskusjon, resultater og en oppsummerende avslutning. Sammen med den vitenskapelig artikkelen som samlet presenterer resultatene av oppgaven utgjør disse to delene masteroppgaven i sin helhet.

Den vitenskapelige artikkelen inneholder en introduksjon, informasjon om metodene som er brukt, de viktigste resultatene, samt diskusjon og konklusjon. I tillegg er det et abstrakt i starten av artikkelen. Abstraktet og artikkelen er planlagt innsendt til den 14. brukerkonferansen for Aimsun høsten 2016. Den vitenskapelige artikkelen er skrevet i sin helhet av kandidaten med endringer foreslått av veileder ut i fra gjennomgang av tidligere utkast.

Følgende dokumenter er vedlagt i opplistet rekkefølge på slutten av oppgaven:

1. Oppgavetekst
2. Trafikktall for vikeplikt kryss og rundkjøring
3. Trafikkfordeling for vikende og prioriterte strømmer
4. Data om tidsluker fra observert signalanlegg
5. Data til beregning av kritisk tidsluke og følgetid
6. Data om kjøretøylengde

2. Metode

Dette kapittelet beskriver de ulike metodene som er benyttet i arbeidet med innsamlet data i masteroppgaven. Selve datainnsamlingen og informasjon om denne prosessen er beskrevet i kapittel 4. Metodene presentert i dette kapittelet er forankret i litteraturstudiet som er beskrevet først i dette kapittelet.

2.1 Litteraturstudie

Ved oppstart av masteroppgaven ble litteraturstudiet som ble startet i forbindelse med prosjektoppgaven om mesomodellering i Aimsun videreført. Fokuset på litteratursøket ble nå flyttet fra generelt om oppbyggingen av mesomodellen i Aimsun til kalibrering av delmodeller og spesifikt om matematisk utregning av forsinkelse. Den tekniske og matematiske dokumentasjonen om Aimsun er i stor grad hentet fra brukermanualen fra Transport Simulation Systems, kapittelet om Aimsun i Fundamentals of Traffic Simulation (Barcelo, 2010) samt artikler produsert av personer med tilknytning til Transport Simulation Systems.

Videre ble det hentet inn litteratur som kunne brukes til å gi gode estimat av observert forsinkelse. Her ble blant annet litteratur som omhandlet kø-teori (Little & Graves, 2008) og generelle kapasitetshåndbøker (National Research Board, 2010, Statens Vegvesen, 1985) hentet inn for å kunne gi gode metoder som passet den definerte problemstillingen.

Kalibrering var også et viktig tema som det ble fokusert på under litteraturstudiet. Her ble det valgt å følge fremgangsmåten foreslått av Buisson et al. (2014) fordi denne metoden hadde en oppbygging som passet problemstillingen i oppgaven godt. For å kunne sammenligne kryssene i oppgaven ble det også funnet litteratur på kapasitet i kryss med vikeplikt med mål som kritisk tidsluke og følgetid (Troutbeck & Brilon, 1997).

2.2 Estimering av observert forsinkelse

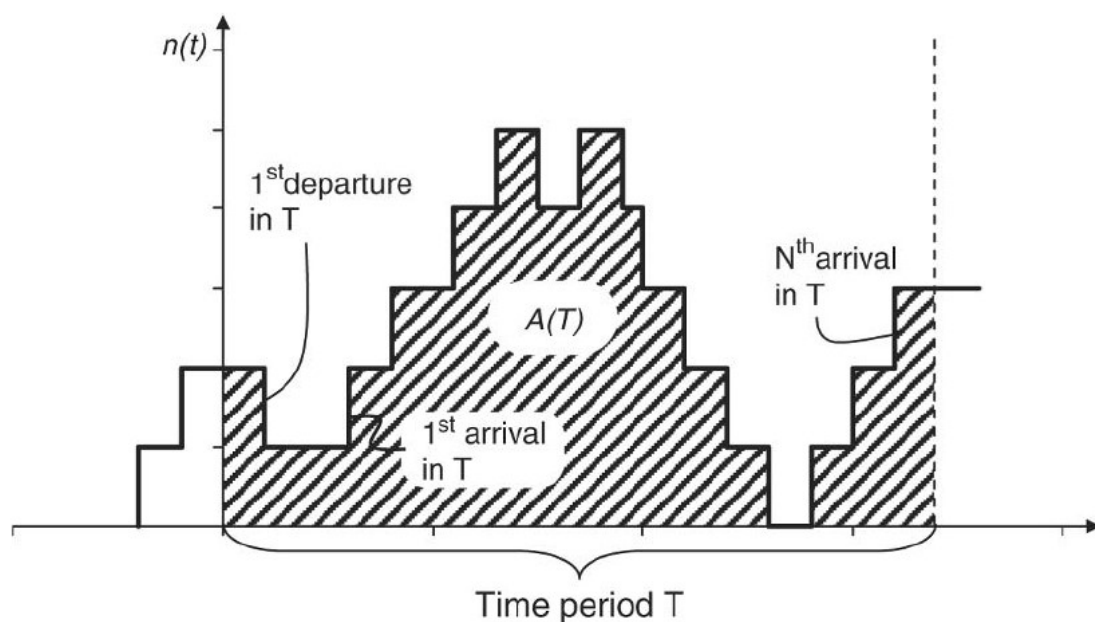
Problemstillingen i oppgaven definerer at de valgte parametrene skal kalibreres slik at observert forsinkelse skal bli mest mulig lik simulert forsinkelse i Aimsuns meso-modell. Derfor er det viktig med en metode som estimerer observert forsinkelse tilfredsstillende likt som forsinkelse blir beregnet i simuleringsprogrammet.

Forsinkelse i Aimsun blir beregnet som forskjellen i simulert reisetid og ideell reisetid for hvert kjøretøy gjennom de forskjellige elementene i nettverket (Transport Simulation Systems,

2016). Ideell reisetid er at kjøretøyet kjører den definerte fartsgrensen på strekningene og gjennom svingebevegelesene uten å måtte stoppe eller vike for andre kjøretøy, fotgjengere eller lignende. Aimsun angir gjennomsnittlig forsinkelse for alle kjøretøy som har kjørt på definert strekning i gitte tidsintervall ved endt simulering.

Estimering av observert forsinkelse skal gjøres i tre ulike krysstyper. For både vikeplikt-krysset og rundkjøringen skjer forsinkelsen i studert svingebevegelse på grunn av vikeplikt for andre kjøretøy. For signalanlegg samles det opp kø ved hjelp av signaler som skaper forsinkelse og køen avvikles ved grønt signal med en hastighet avhengig av reaksjonstidene til sjåførene i køen. Denne forskjellen gjør at det blir benyttet to ulike metoder for å estimere forsinkelse avhengig av hvordan sjåførene i de ulike kryssene kan påvirke forsinkelsen.

Den planlagte metoden for å estimere observert forsinkelse for vikeplikt-krysset og rundkjøringen er å bruke videobilder fra kølengden som oppstår inn til de studerte svingebevegelesene som analyseres. Fordelen med denne metoden er at den gjør det mulig å sammenligne forsinkelsen på en avgrenset strekning der kølengden oppstår. På den måten sammenlignes simulert forsinkelse for en definert strekning i Aimsun med den samme observerte forsinkelsen på strekningen. For å beregne forsinkelse ut i fra kølengden benyttes «Little's Law» for å beskrive sammenhengen mellom ventetid, ankomstfrekvens og antall enheter i en kø. En illustrasjon på hvordan kølengde registreres over tid er vist i figur 1 under.



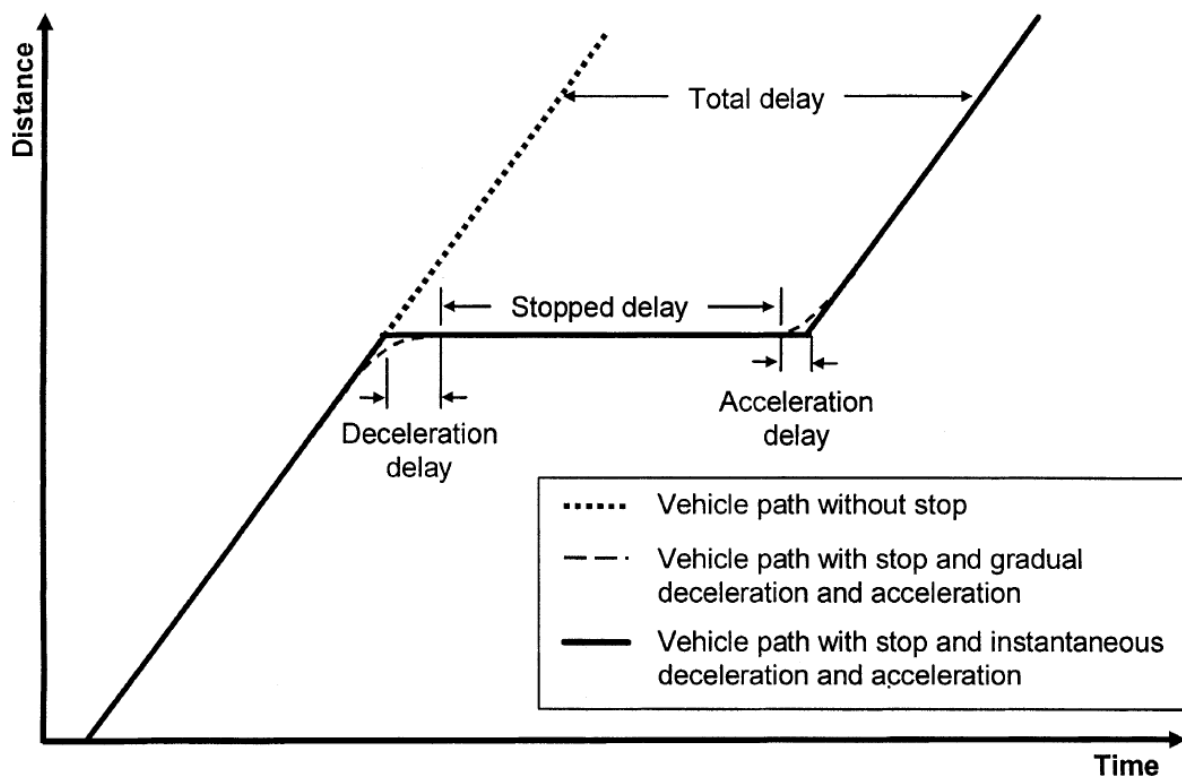
Figur 1 - Antall enheter i kø over en tidsperiode. Hentet fra Little & Graves (2008)

Fra «Little's Law» er sammenhengen definert på følgende måte der L er gjennomsnittlig antall enheter i kø, W er gjennomsnittlig ventetid i systemet for en enkelt enhet og λ er gjennomsnittlig ankomst av enheter per tidsenhet (Little & Graves, 2008).

$$L = \lambda W$$

Ved å observere kølengden over registreringsperioden samtidig som antall kjøretøy som bruker den aktuelle svingebevegelsen kan altså gjennomsnittlig forsinkelse estimeres. Forsinkelsen er illustrert som arealet under grafen i figur 1.

Ulempen med denne metoden er at den ikke tar hensyn til forsinkelse som kommer fra nedbremsing på den aktuelle strekningen før krysset og dermed hastighet under fartsgrensen. Der hvor det er vesentlig kø kan derimot denne delen av forsinkelsen regnes som neglisjerbar og kølengden alene vil gi tilstrekkelig nøyaktig estimering av observert forsinkelse for bruk til sammenligning med simulert forsinkelse i Aimsun. Illustrasjonen i figur 2, hentet fra Dion et al. (2002) viser de forskjellige delene av forsinkelsen i størrelsesmessig forhold til hverandre



Figur 2 - Veg-tid diagram som illustrerer forsinkelse. Hentet fra Dion et al. (2002)

For at denne metoden skal være gyldig er det også viktig at kølengden registreres enten ved hver ankomst og avreise fra køen eller med et så kort tidsintervall mellom hver observasjon at det gir tilstrekkelig nøyaktighet for å beregne forsinkelsen. Trafikken for alle svingebevegelesene i krysset må også registreres med en nøyaktighet som er god nok til å fange opp trafikkvariasjon som påvirker forsinkelse over registreringsperioden. Dette er viktig for å få simulert rush-topper med relativ kort varighet som kan gi store utslag i kølengden og dermed forsinkelsen. Både rush-topper for vikende trafikkstrøm og trafikkstrøm med forkjøringsrett må registreres på forholdvis små tidsintervall siden begge påvirker forsinkelse i en vikepliktsituasjon.

I motsetning til vikepliktsituasjonene i rundkjøring og vikeplikt kryss er det ikke annet enn ankomstfordelingen av trafikken og metningsgrad som påvirker oppbyggingen av køen for et signalanlegg. Det er ikke opp til fremste sjåfør å forkaste eller akseptere en luke. Metoden for å estimere forsinkelse i signalanlegg fokuserer derfor på å beskrive avviklingen av køen som oppstår på rødt signal. Avviklingen av denne kølengden avhenger av reaksjonstiden og tidslukene til kjøretøyene i køen.

For å estimere forsinkelsen i signalanlegget er det valgt å bruke en generalisert formel presentert av Akçelik (1988) basert på den amerikanske Highway Capacity Manual (National Research Board, 2010). Følgende formel under er hentet fra Akçelik (1988) og gir et mål på forsinkelse per kjøretøy som inkluderer både forsinkelse som følge av signalreguleringen pluss ekstra forsinkelse, *overflow delay*, på grunn av blant annet tilfeldige ankomster til signalanlegget.

Ved å ta med leddet med ekstra forsinkelse, *overflow delay*, så er formelen avhengig av lengden på registreringsperioden. Det er derfor valgt å følge metoden til Highway Capacity Manual (National Research Board, 2010) for å finne verdiene som er vist i tabell 1. Leddet med den ekstra forsinkelsen er mest aktuelt å ta med for signalanlegg med en metningsgrad som er over 0,80.

$$d = \frac{0,5 c (1 - u)^2}{1 - u x} + 900 T x^n \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{m(x - x_0)}{Q T}} \right]$$

Tabell 1 - Parametre til beregning av forsinkelse i signalanlegg

d	Gjennomsnittlig forsinkelse i sekunder per kjøretøy
c	Omløpstid i sekunder
u	Andelen effektiv grøntid av omløpstiden
x	Metningsgrad
T	Tidsperiode i timer
n	Kalibreringsparameter
m	Kalibreringsparameter
Q	Kapasitet i kjøretøy per time
x ₀	Kalibreringsparameter

Videre er det valgt å bruke de amerikanske kalibreringsparametrene som gir $n=2$, $m=4$ og $x_0=0$. Dette er valgt fordi Akçelik (1988) viser at de gir en gjennomsnittlig verdi mellom de australske og kanadiske parametrene for forsinkelse i signalanlegg med metningsgrad under 0,9.

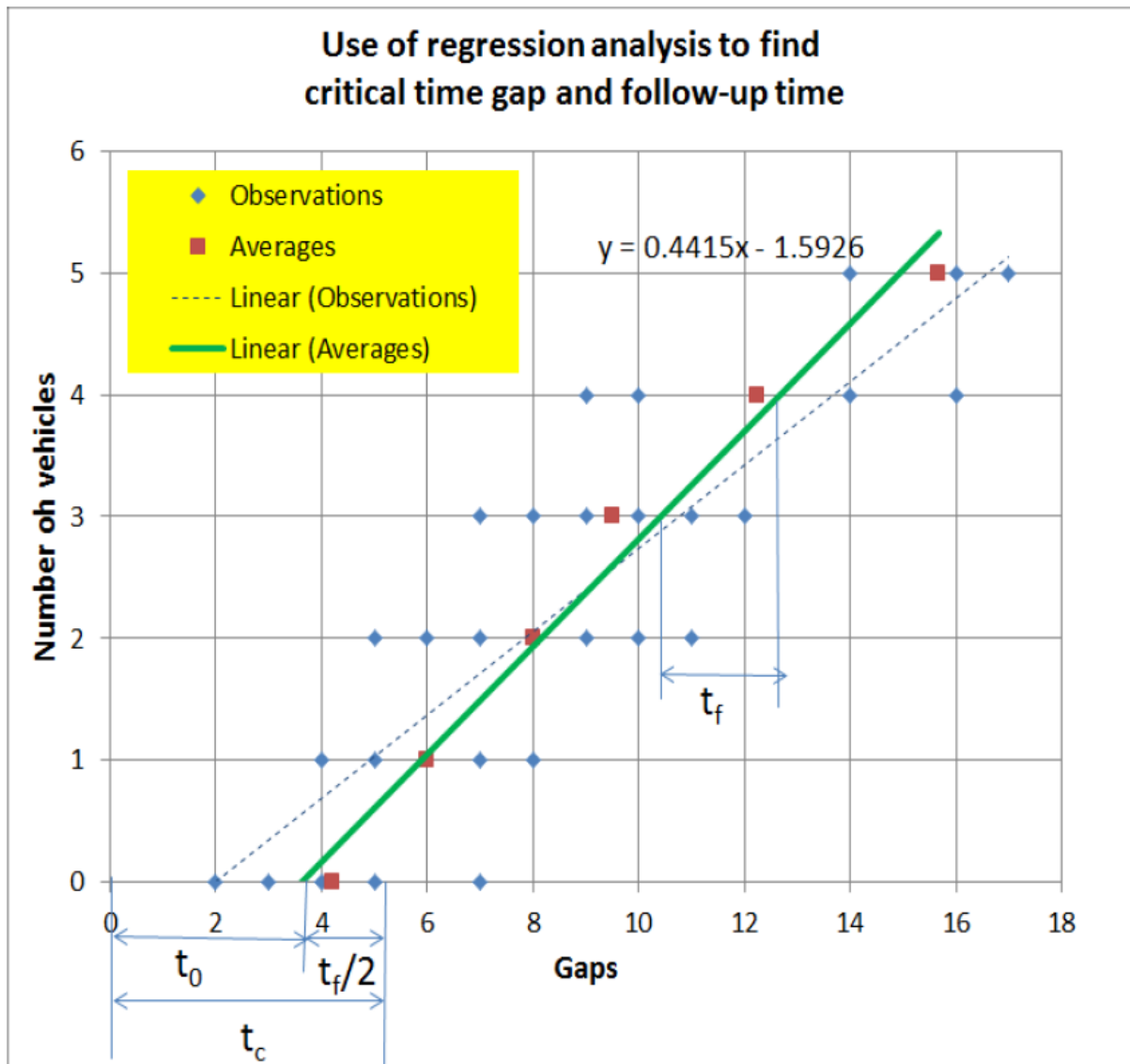
2.3 Estimering av kritisk tidsluke og følgetid

For estimering av kritisk tidsluke og følgetid er det valgt å følge Sieglochs metode med lineær regresjonsanalyse. Metoden måler tidsluker i trafikkstrømmen med prioritet når det er kø i vikende trafikkstrøm (Troutbeck & Brilon, 1997). Antall kjøretøy som aksepterer tidslukene med ulik lengde blir registrert. Deretter tas gjennomsnitt av de ulike tidslukene for hvert antall kjøretøy som aksepterte luken. Disse gjennomsnittsverdiene blir igjen brukt til å lage en lineær regresjonslinje som angir kritisk tidsluke (t_c) og følgetid (t_f) på følgende måte.

$$\text{Stigninggrad av regresjonslinje} = \frac{1}{t_f}$$

$$t_c = t_0 + \frac{t_f}{2}$$

Der t_0 er der den lineære regresjonslinjen treffer x-aksen med tidslukene. Metoden er illustrert i figur 3 som er hentet fra forelesning av Aakre, A. (2015). Sieglochs metode er bare gyldig så lenge det er kø i vikende trafikkstrøm og det vil derfor kun bli målt tidsluker for periodene i den totale registreringsperioden hvor dette er tilfredsstillt.



Figur 3 - Illustrasjon av Sieglochs metode hentet fra Aakre, A. (2015)

2.4 Kalibreringsprosess av parametrene

Den planlagte prosessen for å kalibrere parametrene for å oppnå samsvar mellom estimert observert forsinkelse og simulert forsinkelse består av flere steg (Aakre, E.H. 2015). Det er til sammen tre globale parametre og fire lokale parametre som skal bestemmes i løpet av kalibreringsprosessen. To av parametrene er faktorer som stiller inn globale parametre for lokale elementer. Dette gir til sammen fem ulike parametre som skal kalibreres for hvert kryss. De globale parametrene gjelder for hele nettverket og er planlagt å kalibreres først før de lokale parametrene som inngår i *gap-acceptance model* kalibreres. En dypere beskrivelse av parametrene som skal kalibreres er skrevet i kapittel 3.6. Videre følger en liste over parametrene som inngår i kalibreringsprosessen delt inn i globale og lokale parametre.

Globale parametre

- *Reaction time*
- *Reaction time for front vehicle at traffic light*
- *Maximum give-way time*

Lokale parametre

- *Initial safety margin*
- *Final safety margin*
- *Give-way time factor*
- *Reaction time factor*

Første steg i kalibreringsprosessen er å sette fornuftige verdier for *jam density* og *vehicle length* som kan brukes for alle krysstypene. *Jam density* er enkelt fysisk målbar ved å se hvor tett kjøretøyene stiller seg i køsituasjoner og er dermed valgt å settes ut fra observerte verdier for hvert enkelt kryss. *Jam density* er også en parameter som har mindre innvirkning på de simulerte resultatene enn reaksjonstid og parametre som inngår i Aimsuns *gap-acceptance model* (Ciuffo et al. 2013). *Vehicle length* vil bli estimert ut fra tall om den norske bilparken.

Andre steg i den planlagte metoden for kalibreringsprosessen er å starte med signalanlegget. Dette er fordi den simulerte forsinkelsen i signalanlegget kun er avhengig av *reaction time* og *reaction time for front vehicle at traffic light* i tillegg til *jam density* og *vehicle length* som allerede er definert. Dette andre steget skal fastsette en global *reaction time* som også vikeplikt-krysset og rundkjøringen skal benytte for å senere kalibrere parametrene i *gap-acceptance model* som begge disse kryssene bruker. På denne måten sikres det at den reaksjonstiden som benyttes videre i kalibreringen ikke bare gir riktig forsinkelse i vikeplikt-kryss, men også stemmer med signalanlegget som hovedsakelig kun bruker reaksjonstid-parametre.

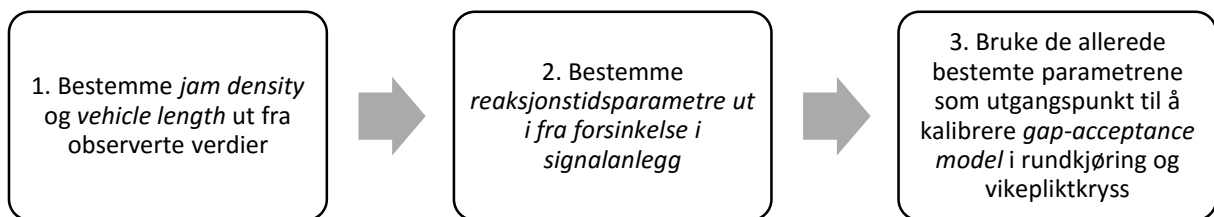
Siste steg er å kalibrere *give-way time*, *initial safety margin* og *final safety margin* for å få samsvar mellom estimert observert forsinkelse og simulert forsinkelse i vikeplikt-krysset og rundkjøringen. Her er det planlagt å ta utgangspunkt i standardverdiene for disse parametrene i Aimsun og justere *initial safety margin* og *final safety margin* opp eller ned avhengig av hvordan simulert forsinkelse er i forhold til observert forsinkelse med parametrene som allerede er satt i første og andre steg. I tillegg er det mulig å justere *give-way time* for å få samsvar

mellom forsinkelsene hvis justering av *initial safety margin* og *final safety margin* ikke gir tilfredsstillende samsvar. I denne delen av prosessen er vil det også vurderes fornuftige parameterverdiene er i forhold til det som kan observeres av vikepliktsadferd. Målet er her at kalibreringen av parametrene i Aimsuns *gap-acceptance model* vil gi riktig forsinkelse for både vikepliktkrysset og rundkjøringen.

Aimsuns mesomodell er stokastisk og vil produsere resultater som avhenger av tilfeldigheter i hver simulering. Derfor er det viktig at alle stegene i kalibreringsprosessen gjøres med et høyt nok antall simuleringer og at gjennomsnittsforsinkelsen fra alle disse benyttes til sammenligning.

For å finne et passende antall simuleringer er det planlagt å bruke en metode beskrevet av Buisson (2014). Her beregnes et minimum antall simuleringer (R_i) ut i fra følgende faktorer: hvor stor akseptert feil det tolereres (d_i), standardavviket til gjennomsnittet av det simulerte resultatet (Y_i) basert på et definert antall replikasjoner (R_0) og kritisk verdi av en t-fordeling med et gitt signifikansnivå ($t_{\alpha/2}$). Dette gir følgende ligning hentet fra Buisson (2014) som skal gi et minimumsmål på antall replikasjoner som må simuleres.

$$R_i = \left(\frac{S_{R_0}(Y_i)t_{\alpha/2}}{d_i} \right)^2$$



Figur 4 - Illustrasjon av kalibreringsprosessen gjennom tre steg

3. Teoretisk grunnlag

Først i dette kapitlet forklares kort oppbyggingen av mesomodellen i Aimsun og hvordan den fungerer. Videre tar kapitlet for seg teorien bak forsinkelse i Aimsuns mesomodell, samt parametrene som påvirker den. I tillegg forklares viktigheten av forsinkelse for rutevalg og begrunner hvorfor det er valgt å kalibrere parametrene etter akkurat dette simuleringsresultatet. Videre presenterer kapitlet Aimsuns *gap-acceptance model* og hvordan denne påvirker forsinkelse, samt parametrene som inngår i denne modellen. Forskjellen mellom denne modellen og andre modeller for tidsluker blir også forklart. Det er også et delkapittel om kalibrering og validering av trafikkmodeller.

Teorien presentert i dette kapitlet har bakgrunn i det gjennomførte litteraturstudiet, brukerhåndboken til Aimsun, samt prosjektoppgaven skrevet høsten 2015 om samme tema. Det er lagt vekt på å presentere det som er relevant for den definerte problemstillingen og ikke gi noe fullstendig oversikt over verken Aimsun som trafikksimuleringsprogram eller oppbyggingen av Aimsuns mesomodell i helhet.

3.1 Oppbyggingen av Aimsuns mesomodell

En modell i Aimsun består av tre hovedobjekter. Dette er sentroider som er start- og sluttpunktene kjøretøyene beveger seg mellom, vegstrekninger som trafikken kjører på, og kryss som kjøretøyene bruker til å bevege seg fra seksjon til seksjon (Ciuffo et al., 2013). Modellering av kjøretøy i Aimsuns mesomodell gjøres på to forskjellige måter avhengig om det aktuelle kjøretøyet er i en seksjon eller i en node. Casas et al (2010, s. 190) beskriver at følgende modeller bestemmer bevegelsene for hvert enkelt kjøretøy:

Kjøretøy i seksjoner bestemmes ut i fra følgende modeller

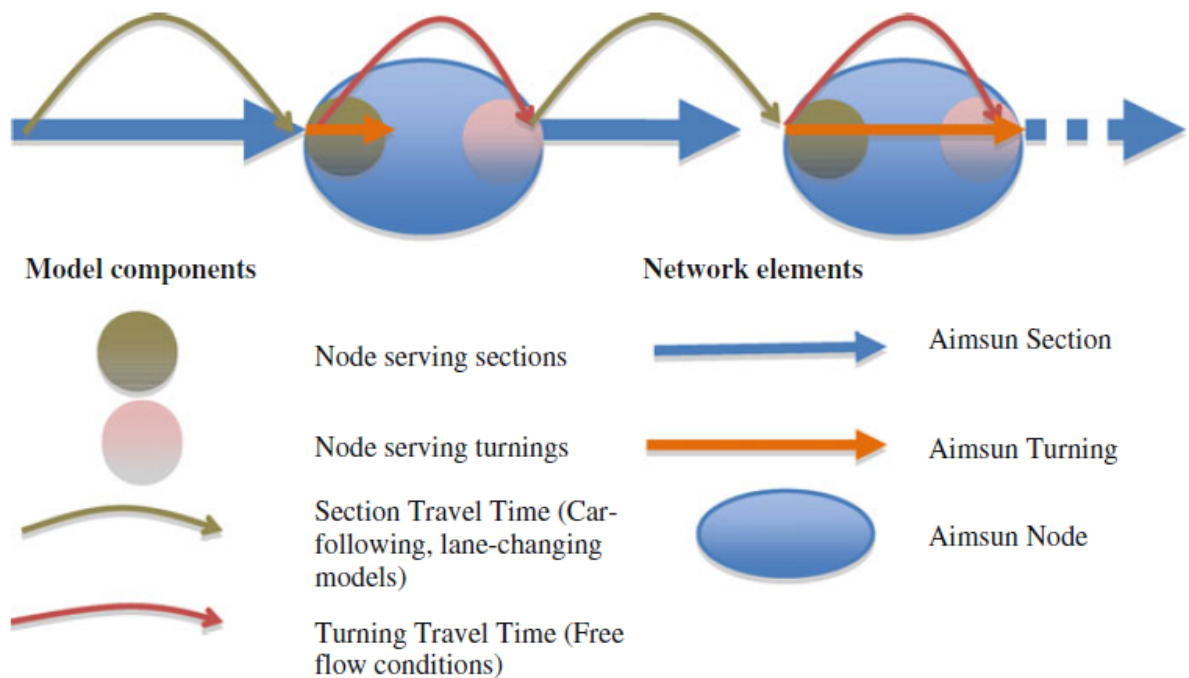
- *Car following model*
- *Lane changing model*

Kjøretøy i kryss bestemmes ut i fra en kryssmodell som inkluderer

- Svingebevegelsen til kjøretøyet
- Kjøretøyet bevegelse fra vegstrekningen til krysset gjennom *gap-acceptance model*
- Kjøretøyet bevegelse fra krysset til ny vegstrekning gjennom *lane selection model*

Både vegstrekninger og svingebevegelser blir modellert som lenker kjøretøyene beveger seg igjennom. Svingebevegelsen i nodene blir forenklet ved å anta fri flyt for kjøretøyene (Casas et al., 2010). Denne forenklingen er realistisk fordi svingebevegelsen oftest er en relativ kort strekning hvor andre kjøretøy ikke påvirker fart eller akselerasjon til det svingende kjøretøyet. Tiden et kjøretøy bruker gjennom en bestemt seksjon modelleres av *car-following model* og *lane changing model* som begge bruker reaksjonstid som hovedparameter. Mesomodellen bruker en forenkling av Gipps' (1981) *car-following model* som brukes i mikrosimuleringen. Casas et al (2010, s. 190) beskriver at svingebevegelser og vegstrekninger behandles som kjøretøybeholdere med et maks antall kjøretøy basert på parameteren *jam density*.

En viktig forskjell mellom mikro- og mesosimulering i Aimsun er at mesosimuleringen er hendelsesstyrt i motsetning til mikrosimuleringen som er tidsstyrt (Casas et al., 2010, s. 183). Simulering på mesonivå oppdateres hver gang en definert hendelse inntreffer og mikrosimulering oppdateres ved et fast tidssteg. Hendelsene som kan inntreffe er knyttet til kjøretøy som genereres, kommer inn eller ut av en node eller inn i nettverket fra en virtuell kø. I tillegg er det hendelser knyttet til signalkontroll, utgangsresultater og endringer i trafikketterspørsel (Casas et al., 2010, s. 183). Figur 5 illustrerer et kjøretøys bevegelser gjennom et meso-nettverket.



Figur 5 - Kjøretøybevegelse i Aimsuns mesomodell. Hentet fra Casas et al. (2010)

3.2 Forsinkelse i meso-modellen til Aimsun

Ved simulering lastes kjøretøy inn i modellen gjennom en matrise med start- og sluttsentroider. Her defineres det hvor mange kjøretøy som kjører fra og til alle de definerte sentroidene i løpet av et bestemt tidsintervall. Simuleringen er stokastisk og tidsluken mellom kjøretøyene som lastes inn på nettverket vil være forskjellige for hver simulering.

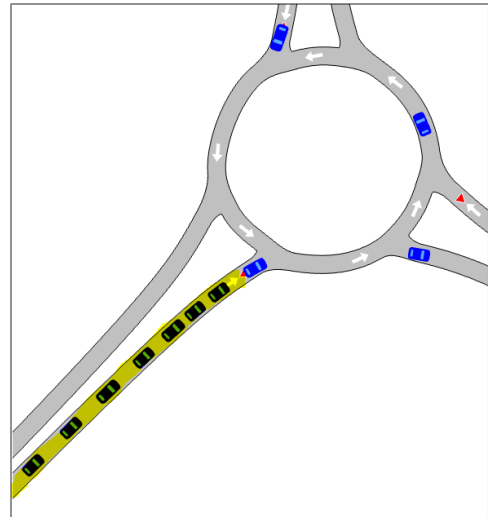
Gjennom mesosimulering i Aimsun er alle kjøretøyene i nettverket definert til å være enten på en strekning eller i et kryss. Brukermanualen til Aimsun (Transport Simulation Systems, 2016) beskriver at *car-following-model* og *lane-changing-model* blir brukt på strekninger og *gap-acceptance model* og *lane-selection model* blir brukt i kryss. Det er disse ulike kjøretøymodellene som beregner forsinkelsen som oppstår enten på strekninger eller i kryss.

Forsinkelse oppstår gjennom nettverket fra start- til slutt punkt og defineres i brukermanualen til Aimsun (Transport Simulation Systems, 2016) til å være forskjellen mellom simulert reisetid og reisetiden gjennom nettverket under ideelle forhold. Reisetiden under ideelle forhold vil si at kjøretøyene har fri-flyt-forhold og dermed holder fartsgrensen igjennom nettverket.

De største forsinkelsene for trafikk skjer i kryss hvor det oppstår konfliktpunkter mellom ulike kjørebegrevelser. Konflikter mellom trafikanter blir løst ved trafikkregler gjennom vikeplikt eller signalanlegg. Casas et al (2010, s.190) beskriver at kjøretøyene i nettverket modelleres etter flere ulike matematiske modeller som beskriver kjøretøyets bevegelse og dermed forsinkelse for ulike situasjoner.

I kryss bestemmes vikepliktsadferd gjennom Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model* som beskrives mer detaljert i delkapittel 3.5. Når et kjøretøy må vike eller stoppe og det kommer flere kjøretøy dannes det en kø på strekningen. På strekningen er det hovedsakelig Aimsuns mesoskopiske *car-following-model* som bestemmer kjøretøyenes bevegelse i forhold til hverandre, men størsteparten av forsinkelsen bestemmes av *gap-acceptance model* som bestemmer når første kjøretøy i køen forlater strekningen og kjører inn i krysset og ut på en ny strekning. I tillegg til disse modellene påvirker også strekningens egenskaper som fartsgrense, svingeradius og maksimal tetthet kjøretøyenes forsinkelse.

I figur 6 til høyre vises en typisk køsituasjon i en rundkjøring i Aimsuns mikromodell. De svarte bilene på den gulmarkerte strekningen modelleres etter *car-following-model*, og den blå bilen foran modelleres etter *gap-acceptance model* helt til den kjører ut i rundkjøringen og neste kjøretøy rykker fram i køen og dermed endrer hvilken modell som innvirker på forsinkelsen. Begge modellene vil ha en påvirkning på forsinkelsen i den aktuelle tilfarten. Dette gjør at det er til sammen veldig mange parametre som påvirker forsinkelsen på ulike måter



Figur 6 - Illustrasjon av køsituasjon fra mikrosimulering i Aimsun 8.1.3

Det er flere ulike mål for forsinkelse som brukes i Aimsun. På strekninger er det mulig å se gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy over strekningen, men også hvor stor andel av den totale reisetiden over strekningen som er forsinkelse. Aimsun oppgir også en total gjennomsnittlig forsinkelse for alle kjøretøy i nettverket etter hver simulering. Denne totale forsinkelsen måler gjennomsnittlig forsinkelse i sekunder per kilometer kjørt. For måling av simulert forsinkelse til kalibrering i denne oppgaven vil gjennomsnittlig forsinkelse over en gitt strekning målt i sekunder bli brukt.

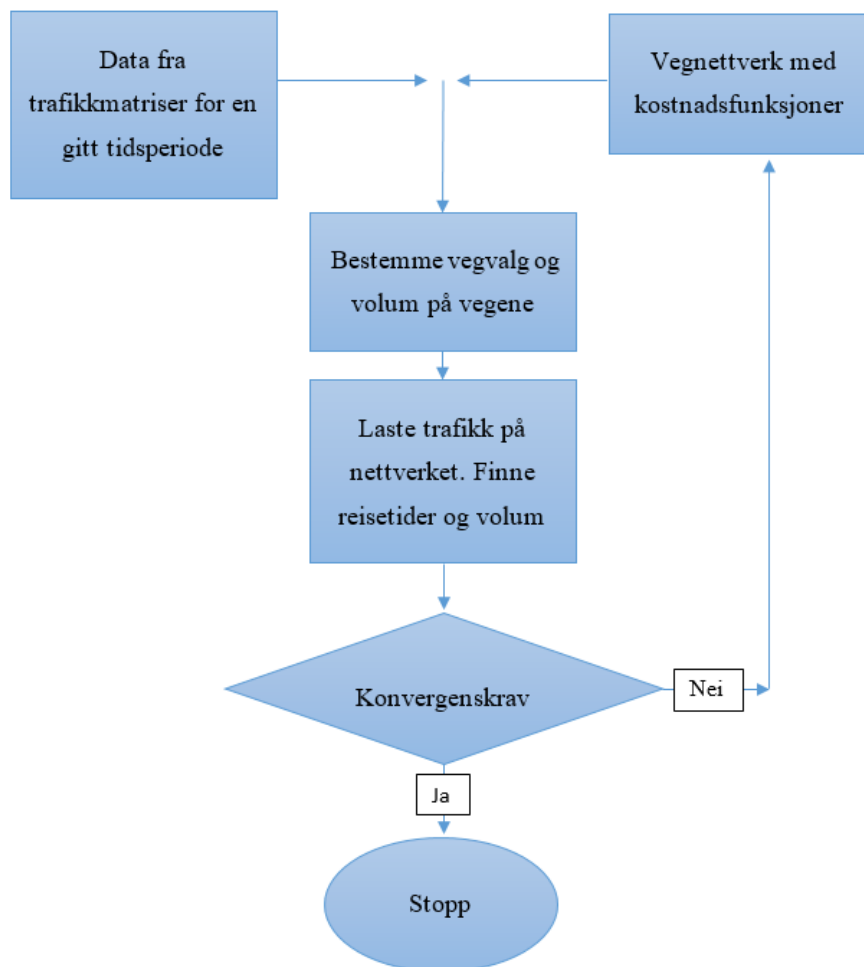
3.3 Sammenheng mellom forsinkelse og rutevalg

Mesosimulering i Aimsun brukes oftest i store nettverk, alene eller som en hybridløsning med mikrosimulering fordi forenklingene fra mikrosimulering gjør at simuleringene er mye mindre ressurskrevende og dermed bruker mindre tid per simulering (Casas et al., 2011). Store nettverk krever særlig mye ressurser fordi det oftest er flere ulike ruter hvert kjøretøy kan ta fra sin startsentroide til sin sluttcentroide.

Casas et al. (2010, s. 192) forklarer at den dynamiske trafikkfordelingen i Aimsun bruker Wardrops første prinsipp. Dette prinsippet blir i brukermanualen (Transport Simulation Systems, 2015) forklart ved at reisetiden på alle brukte ruter vil være den samme. Trafikkfordelingen regner med andre ut reisetid for alle ruter og minimerer reisetiden ved å fordele trafikken ut over de aktuelle rutene som er tilgjengelige fra start- til sluttcentroide. Denne typen trafikkfordeling blir av Casas et al. (2010, s. 192) forklart som en brukerstyrt likevekt hvor hvert enkelt kjøretøy velger den ruten som gir lavest reisetid for seg selv.

Reisetiden er summen av reisetiden under fri-flyt-forhold pluss forsinkelse. Det er derfor nødvendig å få simulert riktig forsinkelse for å oppnå riktig rutevalg og dermed riktig trafikkfordeling for hele nettverket. Aimsuns dynamiske trafikkfordelingen fungerer om en iterativ prosess der vegnettverket oppdateres med nye reisetider hver gang trafikken lastes inn på nettverket. Dette forsetter helt til endringene fra forrige iterasjon er så små at prosessen tilfredsstillende et gitt konvergenskrav. Den iterative prosessen er forklart i figur 7 som er fritt oversatt fra Gaziz (2002, s. 229).

Hvis det simuleres for lav forsinkelse i forhold til virkelig forsinkelse på enkelte ruter vil dette føre til at flere kjøretøy velger disse rutene og trafikkfordelingen gjennom nettverket blir forskjellig fra virkeligheten. For kryss blir forsinkelsene generelt større etterhvert som trafikken gjennom kryssene øker. Det er også viktig at denne forsinkelsen øker i takt med virkelig forsinkelse siden trafikkfordelingen er en iterativ prosess



Figur 7 - Iterativ prosess for rutevalg fritt oversatt fra Gaziz (2002)

Ut fra denne metoden for å beregne rutevalg for kjøretøy gjennom større nettverk ser en at forsinkelsen som oppstår i kryss er vesentlig for hvilken rute som blir valgt når det er stor trafikk i nettverket. Hvis simulert forsinkelse har store avvik fra observert forsinkelse i kryss vil også trafikfordelingen i nettverket være feil. Dette vil igjen påvirke kalibreringen av modellen som beskrives nærmere i kapittel 3.7.

3.4 Tidslukemodeller

Usignaliserte kryss blir regulert ved hjelp av vikepliktsregler som bestemmer hvilke trafikstrømmer som har prioritet eller må vike for andre strømmer. Troutbeck & Brilon (1997) beskriver at denne typen kryss blir analysert ved hjelp av modeller som bruker tidsluker. De forklarer videre at vikende sjåfører selv bestemmer hvilke luker i strømmene med konflikter som skal aksepteres eller forkastes.

Det er to viktige elementer for å studere vikepliktkryss med tidsluker i følge Troutbeck & Brilon (1997). Det første er hvilken størrelse tidslukene som sjåførene velger å akseptere eller forkaste har. Det andre er hvordan tidslukene i prioritetsstrømmene er fordelt og hvor ofte det oppstår en tidsluke av akseptabel størrelse.

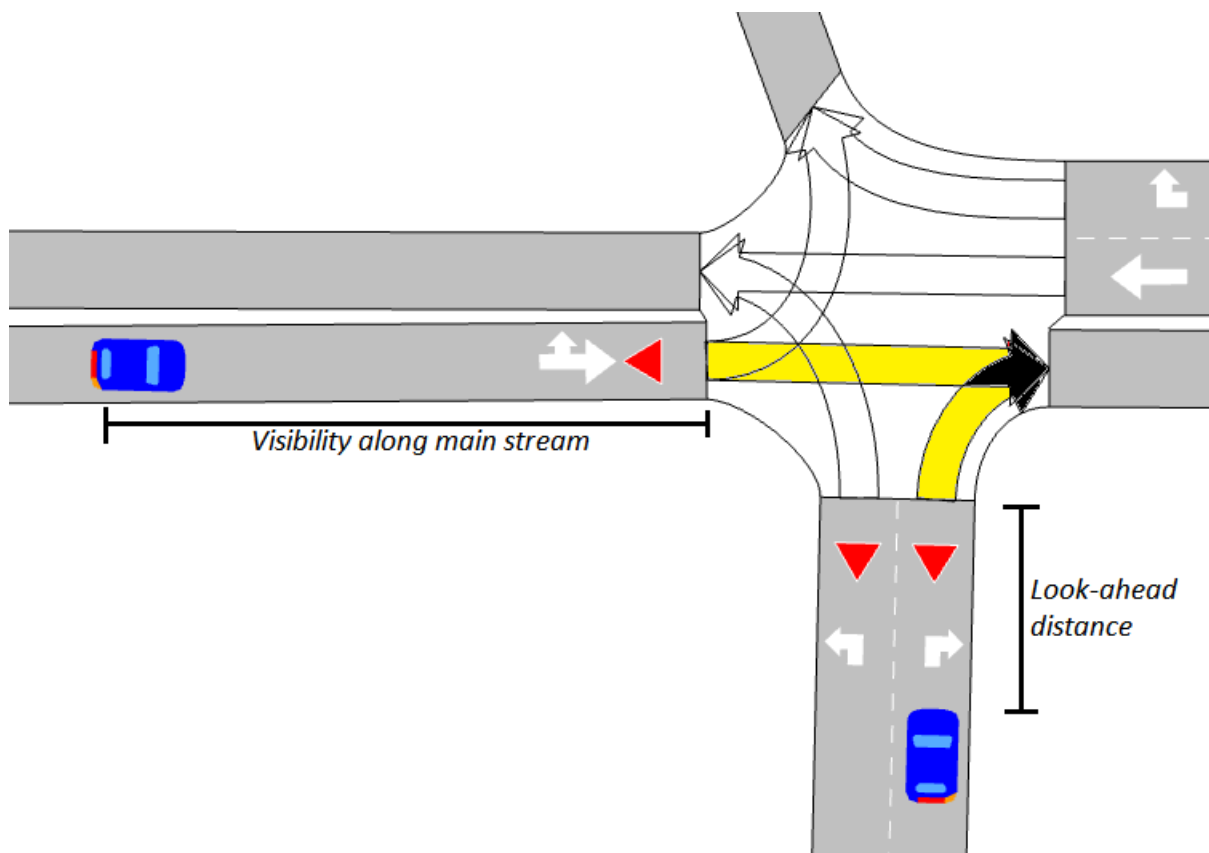
De to viktigste målene for tidsluker er kritisk tidsluke (t_c) og følgetid (t_f). Troutbeck & Brilon (1997) beskriver flere ulike definisjoner av kritisk tidsluke, men den vanligste å bruke er at kritisk tidsluke er et mål på den minste tidsluken en gjennomsnittsjåfør vil akseptere (Aakre, A., 2015). Følgetid brukes for å ta hensyn til at flere kjøretøy kan benytte samme luke i prioritert trafikstrøm hvis den er stor nok. Hvis dette skjer vil den kritiske tidsluken til kjøretøy nummer to og videre reduseres og defineres som følgetid. Følgetiden kan estimeres ved bruk av metoden presentert i kapittel 2.3. Videre kan kritisk tidsluke estimeres ut fra følgetid på flere forskjellige måter, men som erfaringstall er følgetiden typisk 60 % av kritisk tidsluke (Aakre, A., 2015).

Fordelingen av luker i prioritetsstrømmen har stor betydning for tidslukeanalyser. For vanlige trafikksituasjoner brukes oftest eksponentiellfordeling som også er standard i Aimsun (TSS, 2015). Ulike trafikksituasjoner påvirker fordelingen av tidslukene i trafikstrømmen og det kan også brukes for eksempel konstant eller uniform fordeling eller andre fordelinger der dette passer.

3.5 Mesoskopisk gap-acceptance model i Aimsun

Vikepliktsituasjoner i Aimsun modelleres etter adferdsmodellen *gap-acceptance model*. For mesoskopisk modellering benyttes denne adferdsmodellen for det fremste kjøretøyet inn mot et kryss som har vikeplikt for strømmer i konflikt. Ciuffo et al. (2013) beskriver *gap-acceptance model* som en beslutningsmodell som avgjør om vikende kjøretøy kan krysse konflikterende trafikkstrømmer basert på beregnet reisetid til konfliktpunktet for de ulike kjøretøyene. Beregnet reisetid til konfliktpunktet vil gi en tidsluke mellom kjøretøyene som modellen enten aksepterer eller forkaster basert på parametrene for sikkerhetsmargin som er satt for denne adferdsmodellen.

Brukermanualen (TSS, 2015) beskriver at reisetiden til konfliktpunktet blir beregnet når et kjøretøy med vikeplikt nærmer seg et kryss innenfor avstanden *look-ahead distance*. *Gap-acceptance model* søker deretter oppstrøms for kjøretøy med forkjørsrett foran kjøretøyet med vikeplikt over en lengde *visibility along main stream*. Dette er illustrert i figur 8. For kjøretøyene som finnes oppstrøms beregnes reisetiden til konfliktpunktet og ut i fra dette beregnes tidsluken.

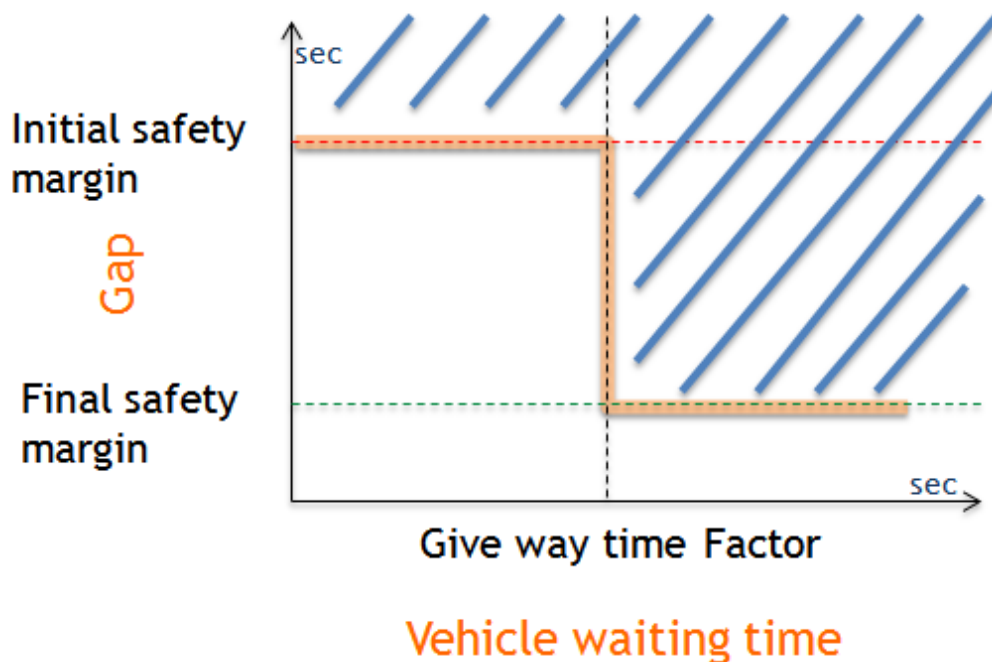


Figur 8 - Illustrasjon av situasjon i gap-acceptance model fra Aimsun 8.1.3

Det er en viktig forskjell mellom *gap-acceptance model* i mikromodellen og mesomodellen til Aimsun. For mikromodellen brukes *initial* og *final safety margin* som sikkerhetsmarginer, men i mesomodellen simuleres kryssenes annerledes og *initial* og *final safety margin* brukes tilnærmet likt som den målbare verdien kritisk tidsluke presentert i forrige delkapittel (Aakre, E. H. 2015).

Gap-acceptance model i Aimsun har også en adferdsjustering som oppstår etter en definert tid for å modellere utålmodighet hos sjåførene. Denne justeringen gjør at sjåføren aksepterer en mindre tidsluke enn tidligere og er illustrert i figur 9 hentet fra Aimsuns brukermanual (Transport Simulation Systems, 2016). Denne adferdsjusteringen tas ikke hensyn til i modeller med kritisk tidsluke og følgetid, men viser seg ofte å stemme med adferden til trafikanter.

Som vist i figur 9 endres sikkerhetsmarginen fra *initial safety margin* til *final safety margin* i mesosimulering direkte uten noe mellomsteg. Dette er en forenkling fra mikrosimuleringen hvor endringen skjer gradvis over tid (Transport Simulation Systems, 2015).



Figur 9 - Illustrasjon over sikkerhetsmargin for tidsluke som endres over tid. Hentet fra Transport Simulation Systems (2016)

3.6 Parametre som bestemmer forsinkelse

De ulike parametrene som er beskrevet i dette kapittelet kan deles inn i to hovedkategorier avhengig av hvordan de påvirker nettverket. Den ene kategorien er de globale parametrene som påvirker hele nettverket dermed alle kjøretøyene på det. Den andre kategorien er lokale parametre som kan brukes på enkeltelementer i nettverket for å kalibrere enkelte kryss eller enkelte svingebevegelser riktig. Under følger en liste over parametrene som analyseres i denne oppgaven delt inn i de to kategoriene beskrevet over.

Globale parametre

- *Reaction time*
- *Reaction time at traffic light*
- *Maximum give-way time*

Lokale parametre

- *Initial safety margin*
- *Final safety margin*
- *Give-way time factor*
- *Reaction time factor*
- *Jam density*

De globale parametrene defineres for hver enkelt kjøretøyklasse i Aimsun og påvirker forsinkelse gjennom alle nettverkets elementer. *Reaction time* er et mål på reaksjonstid og brukes for alle adferdsmodellene for å beregne hvor lang tid sjåføren av kjøretøyet bruker på å oppfatte endringer eller ta beslutninger. En sensitivitetsanalyse utført av Ciuffo et al. (2013) med mesomodellen til Aimsun viser at nesten 90 % av variasjonen i reisetid kom ut i fra den generelle parameteren reaksjonstid noe som viser den store viktigheten av denne globale parameteren.

Reaction time for front vehicle at traffic light er en parameter som brukes for første kjøretøy i køen ved et signalanlegg for å ta hensyn til den ekstra tiden som brukes for å oppfatte endring i trafikksignalet. Denne parameteren brukes bare ved signalanlegg og bare for første kjøretøy i køen. *Maximum give-way time* er et mål på hvor lenge kjøretøyet må være i en vikepliktsituasjon før sjåføren blir utålmodig og aksepterer en lavere kritisk i *gap-acceptance*

model. *Maximum give-way time* er utgangspunktet til denne beregningen som er satt til hver enkelt kjøretøyklasse. Denne tiden kan også justeres lokalt med *give-way time factor* som vist på figur 9 tidligere.

Lokale parametre defineres enten for bestemte strekninger eller svingebevegelser i kryss og er kun gjeldende for kjøretøyene så lenge de er i det bestemte området. *Initial safety margin* er et mål på hvilken tidsluke vikende kjøretøy vil akseptere i *gap-acceptance model* før *maximum give-way time* er nådd. *Final safety margin* er et mål på den mindre tidsluken vikende kjøretøy vil akseptere etter å ha ventet lengre enn *maximum give-way time*. Begge disse sikkerhetsmarginene defineres for en gitt svingebevegelse i et kryss. *Give-way time factor* er en faktor som brukes til å justere *maximum give-way time* for alle kjøretøyklasser i en lokal definert svingebevegelse.

Reaction time factor defineres for en gitt strekning og er en faktor som justerer den generelle reaksjonstiden opp eller ned. *Jam density* er et mål for kjøretøytetthet som måles i kjøretøy per kilometer for et felt. Denne parameteren bestemmer hvor mange kjøretøy det er plass til i et felt ved en gitt lengde hvor det bygges opp kø.

Parametre som ikke er tatt med i oppgaven, men som også er med på å regne ut forsinkelsen er beskrevet i dette avsnittet. *Vehicle length* beskriver lengden på kjøretøyene for en gitt kjøretøyklasse. Denne kan settes til en verdi ut i fra observasjoner eller generell data om bilparken. *Look-ahead distance* og *visibility along main stream* er to parametre som brukes av *gap-acceptance model* for å vite når beregningen for reisetid til konfliktpunktet skal begynne og for hvor langt oppstrøm forkjørsretning den skal søke etter kjøretøy med forkjørsrett.

Grunnen til å ekskludere disse parametrene fra analysen er at *vehicle length* er en målbar parameter som defineres for kjøretøyklasse og at de derfor kan fastsettes ved kvantifiserte målinger. Det er derfor hensiktsmessig å fastsette disse på bakgrunn av lokale målinger og bruke disse verdiene istedenfor å inkludere i de parameteranalysen. *Look-ahead distance* og *visibility along main stream* er ikke tatt med for å begrense omfanget av oppgaven. Disse parametrene justeres for lokale forhold der sikten påvirker krysset i stor grad.

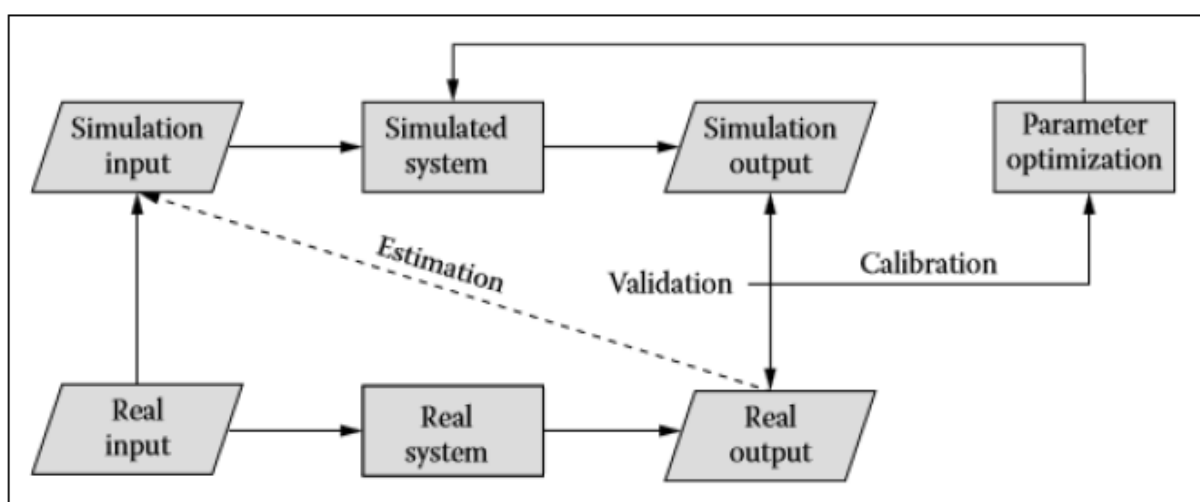
Videre følger tabell 2 over de aktuelle parametrene som inngår i problemstillingen til oppgaven med informasjon om standardverdiene for mesonivået i Aimsun 8.1.3.

Tabell 2 - Oversikt over parametre som inngår i kalibreringsanalysen med standardverdier i meso-modellen

Parameter	Enhet	Standardverdi	Deviation	Min	Max
<i>Reaction time</i>	Sekunder	1,2	-	-	-
<i>Reaction time at traffic light</i>	Sekunder	1,6	-	-	-
<i>Maximum give-way time (car)</i>	Sekunder	10,0	2,5	5,0	15,0
<i>Maximum give-way time (truck)</i>	Sekunder	35,0	10,0	20,0	60,0
<i>Initial safety margin</i>	Sekunder	6,0	-	-	-
<i>Final safety margin</i>	Sekunder	2,0	-	-	-
<i>Give-way time factor</i>	-	1,0	-	-	-
<i>Reaction time factor</i>	-	1,0	-	-	-
<i>Jam density</i>	Kjøretøy per kilometer	200	-	-	-

3.7 Kalibrering og validering

Kalibrering og validering av trafikkm modeller er helt nødvendig for å sikre at modellen representerer virkeligheten på en tilstrekkelig måte og at den skal ha troverdighet. Kalibrering er i følge Casas et al. (2010, s. 212) en øvelse i å endre modellparametrene for å oppnå samsvar mellom simuleringsresultatet og virkelig data. Validering er å sammenligne simulerte resultater mot et annet uavhengig datasett enn det ble kalibrert mot. Figur 10 vist under illustrerer kalibrering- og valideringsprosessen med et generelt simulert og et virkelig system.



Figur 10 - Kalibrering- og valideringsprosess hentet fra Daamen et al. (2014)

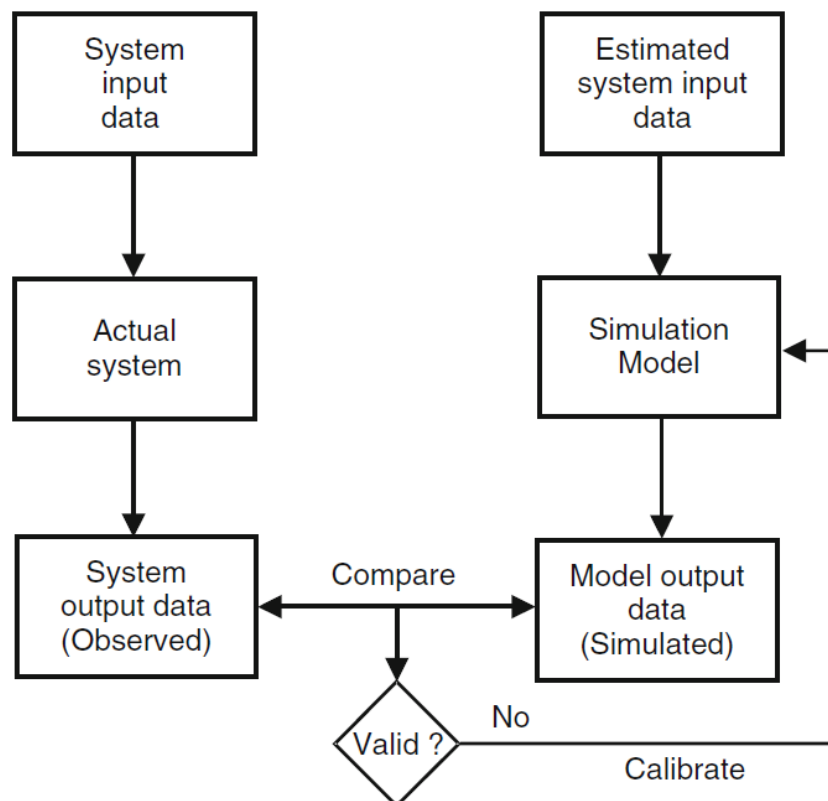
Fra figur 10 over er det en stiplet linje fra *real output* til *simulation input* som representerer en estimering av inn-parametre ut i fra virkelig trafikk. For en del parametre er dette mulig ved å observere kjøreadferd i virkelig trafikk og bruke verdier som er like som inn-parametre. Det er derimot flere parametre i Aimsun som er vanskelig å måle direkte ut i fra virkelig trafikk. Spesielt reaksjonstid og flere av parametrene som inngår i *gap-acceptance model* brukes ikke på samme måte i simuleringen i Aimsun som det er mulig å observere i virkelig trafikk. Dette gjør at disse parametrene må estimeres gjennom simuleringsresultatene slik som det er planlagt i denne oppgaven. Andre parametre som *jam density* og kjøretøyspesifikke parametre som *vehicle length* og *maximum acceleration* er mulig å måle ut i fra virkelig trafikk og kan dermed estimeres for å oppnå en god verdi før kalibreringsprosessen av andre parametre går videre.

Rammeverket til Buisson et al. (2014) for å kalibrere et simulert system går ut på å minimere en valgt feilfunksjon av et eller flere forhåndsbestemte ut-data som er målbare både fra det

simulerte og det virkelige systemet. Videre velges en optimaliseringsalgoritme for å kalibrere de valgte parametrene for å minimere den valgte feilfunksjonen.

Casas et al. (2010) påpeker at trafikkmodeller oftest kalibreres etter data som er lett tilgjengelig. Denne type data er oftest detektordata som fart og antall kjøretøy over et gitt snitt på viktige strekninger i nettverket. I tillegg brukes ofte målinger på reisetid for gitte strekninger gjennom modellområdet enten som kalibrering eller validering. Forfatterne nevner videre at det er mer nøyaktig å kalibrere de ulike adferdsmodellene som f.eks. *car-following model* og *gap-acceptance model*, men at dette ofte tar for lang tid og dermed er for kostbart til å gjøres i profesjonell sammenheng.

Kalibreringsprosessen lagt fram av Casas et al (2010) foreslår å starte med de globale parametrene som første steg. Neste steg er å kalibrere de lokale parametrene og deretter starte på kalibrering av den dynamiske trafikkfordelingen. Dette skal gjentas til det er tilstrekkelig samsvar mellom virkelig og simulert data som vist i figur 11 under.



Figur 11 - Iterativ kalibreringsprosess hentet fra Casas et al (2010)

For validering av trafikkmodeller settes det statistiske krav til variasjon mellom simulerte resultater og virkelige datasett. For trafikkvolum på vegstrekninger settes det ofte krav til en GEH-verdi under en definert verdi for en stor prosentandel for målepunktene. GEH-verdien beregnes ved å sammenligne simulerte og virkelig resultater for trafikkvolum gjennom følgende formel hentet fra Buisson et al (2014)

$$GEH - verdi = \sqrt{2 \frac{(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}}$$

Det er vanlig å sette krav til en GEH-verdi under 5 for et visst antall av målepunktene som observeres (Buisson et al., 2014). I konkurransegrunnlaget skrevet av Statens Vegvesen (2016) for etablering av Aimsun-modell for Trondheim kreves det for eksempel at minst 85 % av alle tellepunktene skal ha en GEH-verdi under 5.

4. Planlegging og gjennomføring av datainnsamling

Følgende kapittel omhandler prosessen med datainnsamling. Prosessen startet med å identifisere aktuelle kryss, videre med en utvelgelse ut fra egnethet og fram til avslutning med å registrere utvalgte kryss med videobilder. Først i kapittelet er det et delkapittel som beskriver hvilke egenskaper det ble fokusert på gjennom utvelgelsesprosessen, samt begrunnelse på hvorfor de gitte kravene ble satt. Kapittelet avslutter med informasjon om de tre utvalgte kryssene samt grunnene til at disse ble valgt.

4.1 Krav til kryss som skulle observeres

Kravene til kryssene som observeres i oppgaven tar utgangspunkt i den definerte problemstillingen. Det viktigste fra problemstillingen i denne prosessen er at simuleringene skal vurderes opp mot observert data med data om målt forsinkelse. Dette betyr at det er vesentlig at kryssene som skal observeres har en forsinkelse som er mulig å måle for valgt svingebevegelse i valgt observasjonsperiode.

Planlagt metode for å måle observert forsinkelse i vikeplikt-krysset og rundkjøringen er å registrere kølengde over tid for å så benytte «Little's Law». Denne loven brukes innenfor køteori til å beskrive sammenhengen mellom ventetid, antall enheter i kø og frekvensen av ankomster (Little & Graves, 2008). Med denne metoden må kølengden kunne observeres for å kunne estimere ventetiden eller forsinkelsen. Derfor var det viktig at disse kryssene ikke bare hadde forsinkelse knyttet til svingebevegelsene som skulle observeres, men også at hele kølengden kunne måles ut i fra videobilder og ikke ble påvirket av andre kryss.

For å estimere forsinkelse i signalanlegget er det planlagt å måle avviklingen av køen som oppstår på rødt signal. For at denne skal bli målt riktig er det viktig at filmingen gir god oversikt over køen. Svingebevegelsen burde være rett fram uten noen fotgjengere eller andre kryss som påvirker avviklingen eller oppbyggingen av køen bak stopplinjen. Det burde også være tilnærmet flatt eller jevn helning slik at det kan måles og simuleres riktig i Aimsun. Faste fasetider er også en fordel for å enkelt kunne simulere signalanlegget. Videre er det også ønskelig med et signalanlegg som helst samler opp over ti biler per omløp og som ikke er nær eller over kapasiteten sin.

Det er også et krav at svingebevegelsene som blir studert ikke er påvirket av andre kryss direkte oppstrøms eller nedstrøms. Påvirkning av nedstrøms trafikk vil kunne påvirke avviklingsgraden og gi feil data. Påvirkning oppstrøms vil kunne endre ankomstene fra å være eksponentielle til å ha en annen fordeling. Det er ønskelig å anta eksponentielle ankomster både for beregning av kritisk tidsluke og fordi dette er standard innstilling i Aimsun.

Videre i problemstillingen er det definert at det fokuseres på generelle svingebevegelser. Målet med dette er at parametrene som kalibreres skal kunne være gyldige for andre kryss med samme svingebevegelser og oppbygning. Derfor er det ønskelig at kryssene som observeres har standard geometri og svingebevegelser som er felles med flertallet av kryss av samme type.

Til slutt stiller også det at simuleringen skjer gjennom Aimsuns mesoskopiske modell noen krav til kryssene som observeres. For trafikk i kryss er det konfliktpunkt mellom ulike trafikkstrømmer som skaper forsinkelser. Disse konfliktene blir løst enten ved vikepliktsregler eller signalanlegg. For rundkjøringer og vikeplikt kryss benytter Aimsun samme *gap-acceptance model* for å modellere kjøretøy på mesoskopisk nivå i konflikt med hverandre. Oppgaven har fokus på kjøretøy i vegbanen og det er derfor vesentlig at forsinkelsen som oppstår kommer av andre kjøretøy og ikke fotgjengere eller andre faktorer for å kunne kalibrere Aimsuns *gap-acceptance model* riktig.

Oppsummert gir det følgende krav til kryssene som skal registreres:

- Minst en svingebevegelse i krysset må ha observerbar kø gjennom registreringsperioden som er forårsaket av konflikter med andre kjøretøystrømmer.
- Krysset må være uavhengig av andre kryss slik at kølengden fra andre kryss ikke påvirker det aktuelle krysset og en kan anta eksponentielle ankomster, samtidig som kølengden til det aktuelle krysset ikke påvirker andre kryss.
- Krysset må ha en standard geometrisk oppbygging og kjøretøyadferd slik at det blir sammenlignbart med hoveddelen av lignende kryss.

4.2 Identifisering av aktuelle kryss

Første steg i prosessen var å samle en liste med aktuelle kryss som skulle bestå av vikeplikt kryss, rundkjøringer og signalanlegg i Trondheimsområdet. Kravene var i første omgang at kryssene skulle ha perioder med kø og at de ikke ble tilbakeblokkert av nærliggende kryss eller signalanlegg. I denne fasen av arbeidet ble det rådført med veileder Arvid Aakre, Phd-stipendiat Erlend Hoksrud Aakre, samt trafikkgruppen ved Asplan Viak i Trondheim. I tillegg var flere medstudenter hjelpelige med tips om andre kryss som kunne passe kriteriene. Dette arbeidet resulterte til slutt i en liste på 20 ulike kryss som skulle studeres nærmere.

For å studere kryssene nærmere ble først verktøyet Google Traffic gjennom Google Maps brukt. Dette verktøyet samler inn GPS-posisjoner fra et stort antall mobilbrukere på vegnettet for å kunne gi informasjon om gjennomsnittsfart i forhold til fartsgrensen. Verktøyet kan aktiveres gjennom Google Maps og ble brukt til å finne ut om det var forsinkelse knyttet til kryssene og når disse forsinkelsene oppsto.

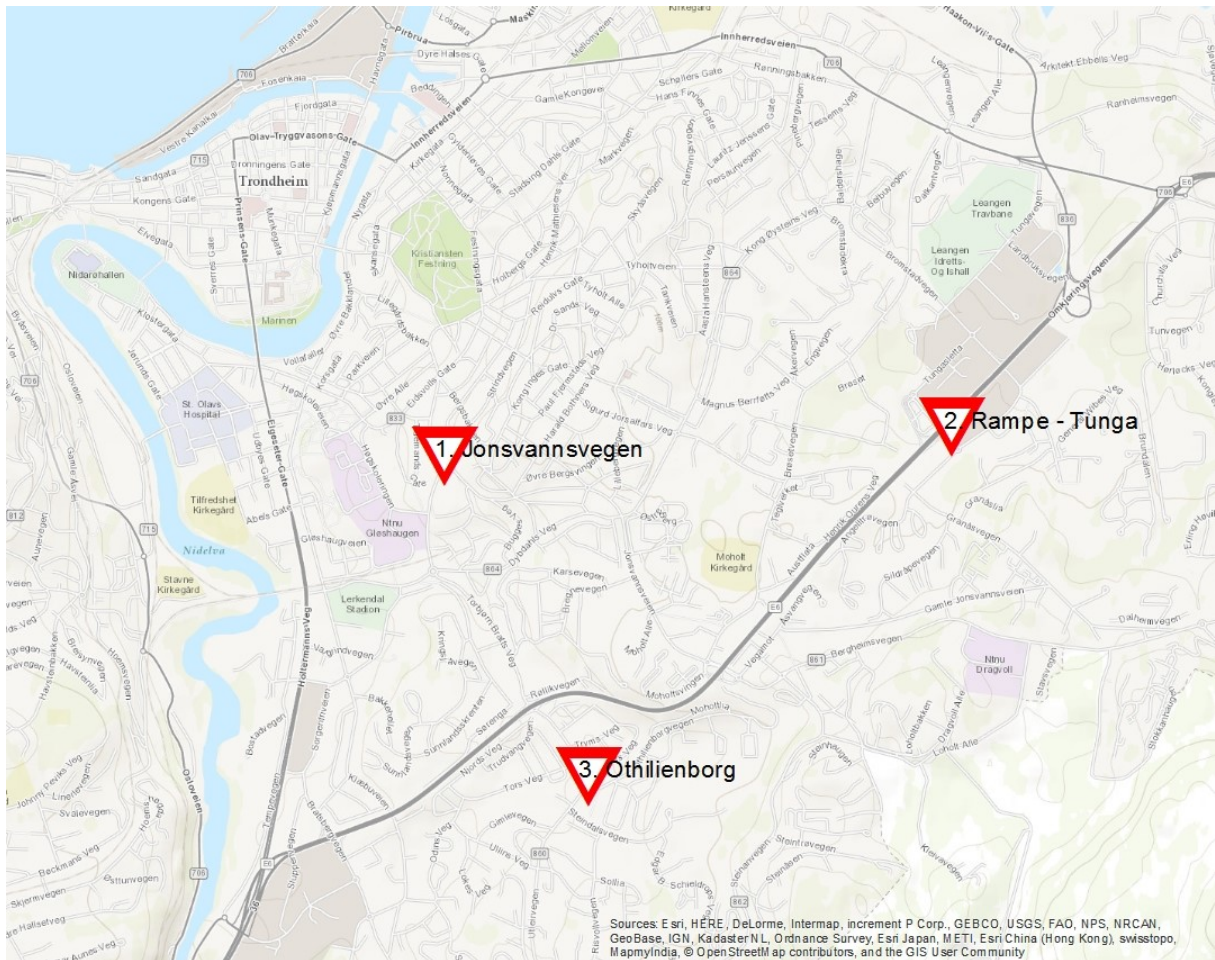
I tillegg ble også Google Street View brukt for å se på de aktuelle kryssene og finne ut hvordan de var bygget opp geometrisk og om de kunne være påvirket av nærliggende kryss. Gjennom de tilgjengelige bildene var det også mulig å se hvor fotgjengerfelt var plassert og hvordan disse kunne påvirket trafikken.

Gjennom disse stegene ble en del kryss uten vesentlige forsinkelser og kryss som var mindre passende til analysen på grunn av lite passende geometri eller stor fotgjengertrafikk eliminert. Videre til neste steg var listen med aktuelle kryss redusert til 10 kryss som skulle observeres før det ble valgt et signalanlegg, en rundkjøring og et vikeplikt kryss som det skulle innhentes trafikkdata fra.

Neste steg var å observere trafikken ved de aktuelle kryssene. Her var det fokus på å se på hvordan kølengdene utviklet seg i rushtid for å kunne se om det var noen passende kameraposisjoner som kunne få med seg hele krysset sammen med tilhørende kølengde på en svingebevegelse. I tillegg var det viktig å se hvorvidt krysset enten påvirket eller ble påvirket av nærliggende kryss eller andre eksterne faktorer. Hvis det var fotgjengertrafikk i tilknytning til krysset ble også denne observert for å se i hvor stor grad dette kunne skape forsinkelsen. For signalanleggene var det også viktig at å observere hvordan omløpstiden var bygget opp. Ønsket var en fast grønn- og rødtid som ga en konstant omløpstid som ville gjøre det lettere å simulere forsinkelsen i signalanlegget i Aimsun.

4.3 Vikeplikt kryss

Det var tre ulike vikeplikt kryss som ble observert for å bestemme hvilket som var mest egnet til registrering. Det første krysset var et høyreregulert X-kryss mellom Jonsvannsvegen og Strindvegen. Det andre krysset var vikepliktregulerte av- og påkjøringsramper fra Omkjøringsvegen over Tunga. Det tredje krysset var et T-kryss mellom Othilienborgvegen og Utleirvegen. Vikeplikt kryssenes plassering er vist i figur 12 under.

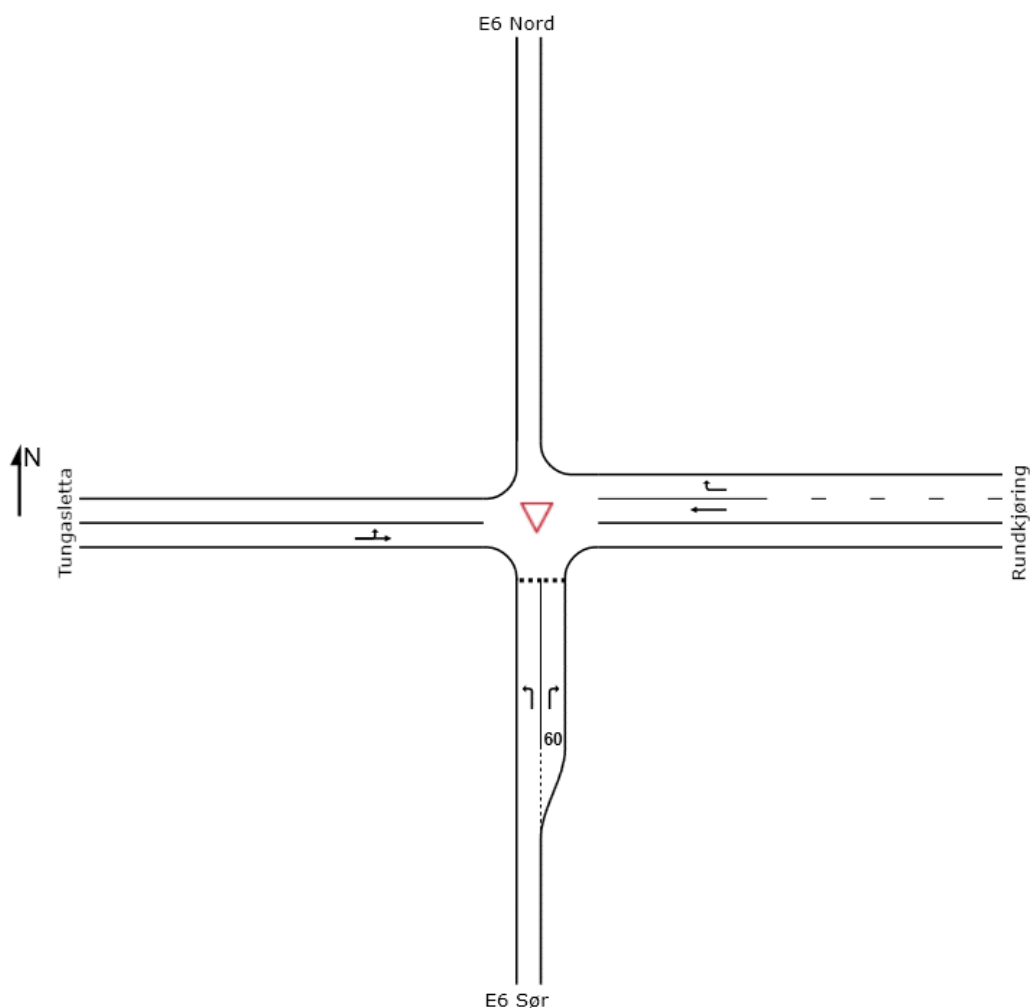


Figur 12 - Illustrasjon fra ArcMap over plasseringen til de observerte vikeplikt kryssene i Trondheim. Målestokk 1:50 000

Gjennom observasjonene av de tre ulike vikeplikt kryssene kom det fram store ulemper med det første krysset ved Jonsvannsvegen og det tredje krysset ved Othilienborg. Ulempen med krysset mellom Jonsvannsvegen og Strindvegen var at høyrereguleringen ikke alltid ble fulgt. I tillegg var det ganske store stigninger på vegene i krysset og armene møttes ikke 90 grader på hverandre, noe som gjorde at geometrien ikke var som ønskelig. Krysset ved Othilienborg ble

påvirket av en signalisert fotgjengerovergang i nærheten med stor gangtrafikk. I tillegg hadde den geometri med avskilte felt for høyresving ut og inn av krysset.

Valget falt på vikepliktkrysset ved avkjøringsrampa fra Omkjøringsvegen på Tunga. Fordelen her var et det var et enkelt kryss med en forkjøringsveg med relativt stor trafikk og envegskjørte ramper av og på Omkjøringsvegen. Det er et fotgjengerfelt over avkjøringsrampen fra E6 sør, men observasjonene viste at det var svært lite fotgjengertrafikk over denne og at den derfor ikke skapte forsinkelsen. Dette krysset hadde også fordelen med at venstresving og høyresving opp fra rampa var adskilt i hvert sitt felt 60 meter framfor vikelinjen. Det var også enkelt å fange opp hele kølengden ved å filme køen opp rampa fra broa over Omkjøringsvegen. Den eneste ulempen med dette krysset var at høyresvingen fra avkjøringsrampen ofte fikk dårlig sikt til forkjøringsvegen på grunn av kø som dannet seg i feltet for venstresving. Det valgte vikepliktkrysset på Tunga er illustrert i figur 13 under.



Figur 13 - Illustrasjon av valgt X-kryss på Tunga fra SIDRA INTERSECTION 6.1

Det er til sammen tre svingbevegelser som har vikeplikt i krysset. Det er venstre- og høyresving fra E6 Sør, også er det venstresving til nordgående påkjøringsrampe fra Tungasletta. Registrering av kølengde og forsinkelse ble valgt å gjøres på venstre- og høyresving fra E6 sør. Videokamera 1 ble plassert på broen ved Tungasletta for å kunne observere kølengden og et kamera 2 ble plassert mellom nordlig rampe og østlig arm for å observere svingbevegelser i krysset.

Observasjoner og data fra Google Traffic viste at det var mest forsinkelser i morgenerushet, så valget av registreringstidspunktet falt på mellom 07:00 og 09:00 på en hverdag. Under er bildet fra de to kameraposisjonene som ble valgt illustrert i figur 14.



Figur 14 - Bilder fra de to ulike kameraposisjonene på Tunga

4.4 Rundkjøring

Det var tre rundkjøringer som ble observert for å finne ut hvilken som var mest egnet til å registreres. Den første rundkjøringen er i Ila der Marienborgtunnelen møter Nordre avlastningsveg og Fylkesveg 715. Rundkjøring nummer to er på Munkvoll der Bøckmanns veg møter Byåsvegen. Den tredje aktuelle rundkjøringen er ved utkjørselen fra Sjetnemarka til Tiller og ramper til E6. Rundkjøringenes plassering er illustrert i figur 15 under.

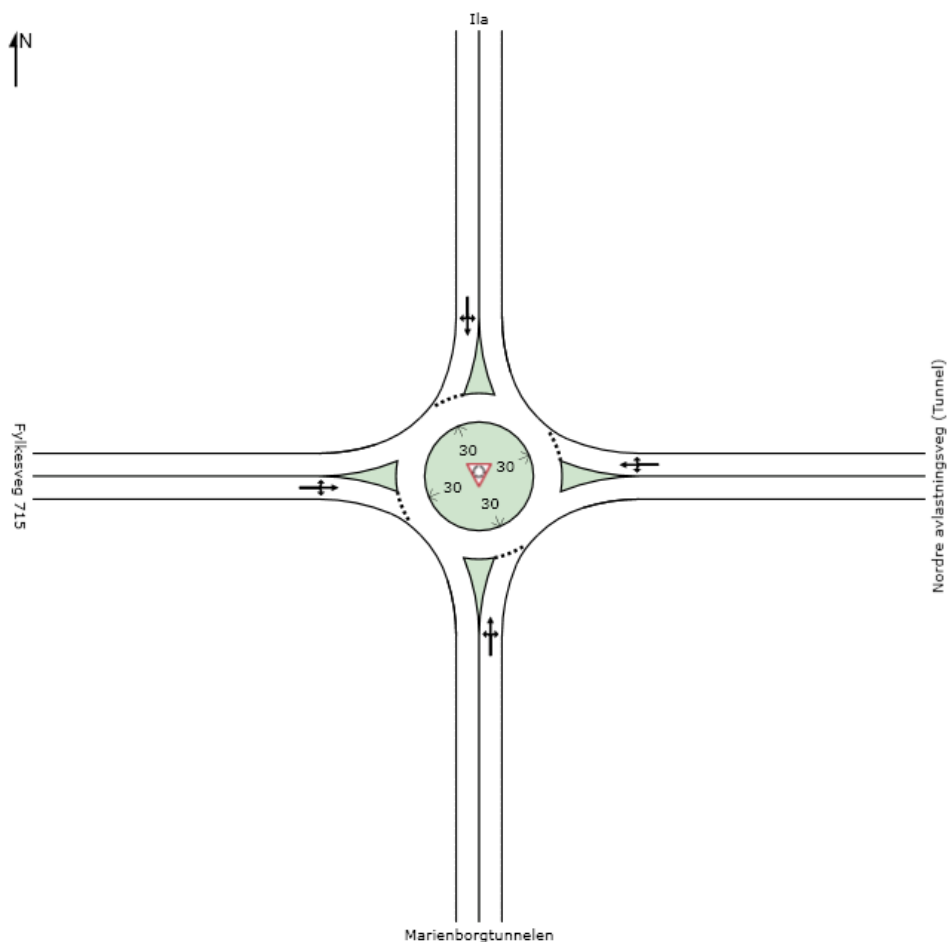


Figur 15 - Illustrasjon fra ArcMap over plasseringen til de observerte rundkjøringene i Trondheim. Målestokk 1:100 000

Rundkjøringen på Munkvoll ble først eliminert. Den var påvirket av en signalisert fotgjengerovergang i forbindelse med Byåsen Skole som hadde stor fotgjengertrafikk. I tillegg hadde den en utvidet sentraløy med brostein som gjorde sentraløyen oval for å senke farten til enkelte svingebevegelser. Rundkjøringen på Sjetnemarka hadde ønsket geometri med sirkulær sentraløy og et enkelt sirkuleringsfelt med ingen fotgjengeroverganger i nærheten. Det var også åpne områder rundt som gjorde det mulig å observere kølengden til de ulike armene.

Observasjoner viste at nærliggende vikeplikt-kryss ved utkjøringen fra Sjetnemarka og signalanlegg 200 meter sør for rundkjøringen påvirket trafikken ved rushtiden, noe som gjorde at denne rundkjøringen ikke ble valgt.

Rundkjøringen i Ila ble valgt fordi den har stor trafikk og kun et enkelt sirkulasjonsfelt som gir klare og enkle vikepliktsituasjoner. Kun en av de fire armene har fotgjengerovergang og det er til gjengjeld den med minst trafikk. Ulempen med denne rundkjøringen var at to av armene kom ut fra tunnel som gjorde at Fylkesveg 715 var eneste arm med mye trafikk som kunne observeres for kølengde. Fylkesveg 715 har også ekstra trafikk omtrent en gang i halvtimen i rushtider på hverdagen som følge av ferjetrafikk. Dette er både en fordel med at det gir ekstra kjøppbygning, men det må tas hensyn til i simuleringen siden trafikken ikke ankommer eksponentielt fordelt. Rundkjøringen hadde også den fordelen at den var plassert lavt i terrenget som muliggjorde en kameraplassering som fikk med seg hele rundkjøringen samt kølengden på fylkesveg 715. Den valgte rundkjøringen i Ila er skissert i figur 16 under.



Figur 16 - Illustrasjon av valgt rundkjøring i Ila fra SIDRA INTERSECTION 6.1

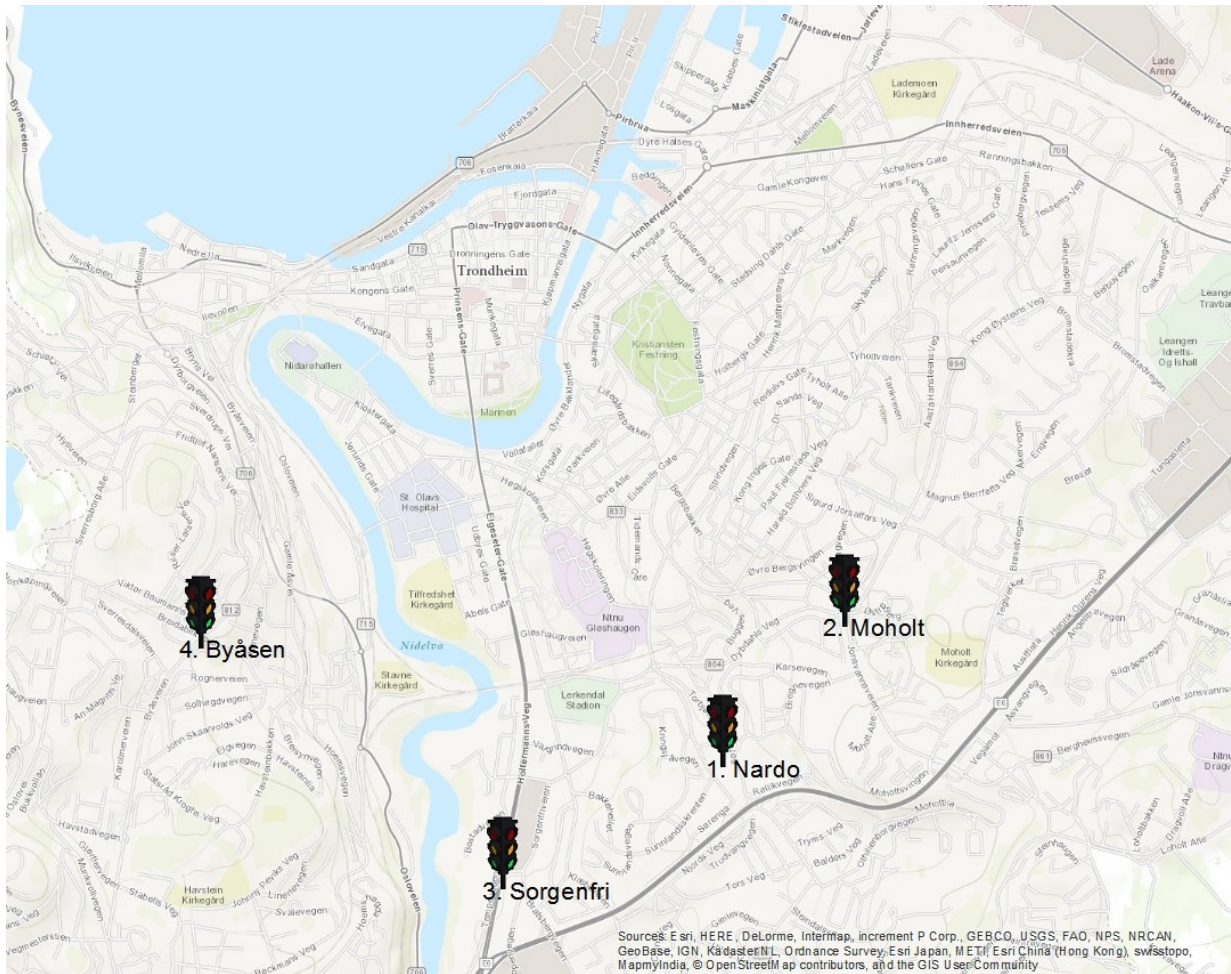
Rundkjøringen i Ila har kun et sirkulasjonsfelt og kun et oppstillingsfelt i alle armene. På ettermiddagen ble det observert lengst kølengde på fylkesveg 715. Dette kommer av at hovedvekten av trafikken fra Nordre avlastningsveg skal til Marienborgtunnelen og dermed har forkjøringsrett foran Fylkesveg 715. Ettermiddagen mellom klokken 15:00 og 17:00 en hverdag ble derfor valgt registreringsperiode. Kameraplasseringen ble gjort på en høyde mellom Marienborgtunnelen og tunnelen ved Nordre Avlastningsveg. Bildet fra denne plasseringen er vist i figur 17 under.



Figur 17 - Kameraplassering ved rundkjøring i Ila

4.5 Signalanlegg

Det var til sammen fire ulike signalanlegg som ble observert for å finne ut hvilket som var mest egnet til å registreres. Illustrasjon over plasseringen til de ulike lyskryssene er vist i figur 18. Det første signalanlegget var T-krysset på Nardo hvor Torbjørn Bratts veg møter Nardobakken. Det andre krysset var X-krysset på Moholt der Jonsvannsvegen møter Kong Øysteins veg. Det tredje krysset var det siste lyskrysset ved Sorgenfri på Holtermanns veg ut av byen før den møter E6. Det fjerde og siste krysset var X-krysset mellom Byåsvegen og Breidablikkvegen.

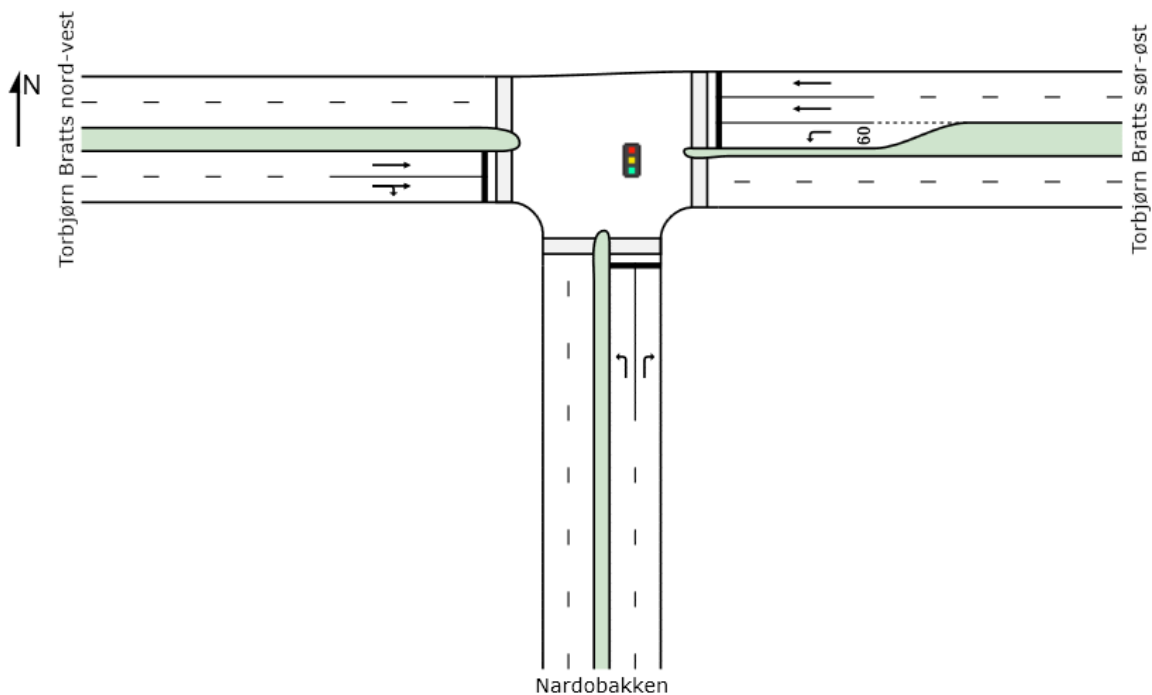


Figur 18 - Illustrasjon fra ArcMap over plasseringen til de observerte signalanleggene i Trondheim. Målestokk 1:50 000

Av disse fire signalanleggene var det til slutt T-krysset på Nardo som ble valgt til å gjøre registreringer. Lyskrysset på Moholt hadde den fordel at det var fast omløpstid, men ble eliminert på grunn av at kjøretøy som skulle til høyre og rett fram brukte samme felt. I tillegg hadde fotgjengere som høyresvingene hadde vikeplikt for grønt signal samtidig noe som førte til at køavviklingen ikke ville gi et godt estimat for forsinkelse.

Lyskrysset på Byåsen hadde også mye fotgjengertrafikk sammen med stor variasjon i omløpstiden noe som gjorde at dette ble valgt bort. Lyskrysset ved Sorgenfri hadde også stor variasjon i omløpstid og grøntid, men relativt liten fotgjengertrafikk. Signalanlegget på Nardo ble til slutt valgt fordi den hadde en liten variasjon i omløpstid ved rushtider samtidig med at gående hadde kryssing i annet plan for svingebevegelsen som skulle registreres.

Den eneste ulempen med dette krysset var at kølengden på ettermiddagen ut fra byen kunne bli så lang at den gikk tilbake til rundkjøringen ved Strindvegen. På grunn av dette ble det valgt registreringstidspunkt tidlig på ettermiddagen før kapasiteten til signalanlegget ble nådd.



Figur 19 - Illustrasjon av valgt signalanlegg på Nardo fra SIDRA INTERSECTION 6.1

I figur 19 over er en illustrasjon av signalanlegget på Nardo. Det er svingebevegelsen rett fram fra Torbjørn Bratts veg nord-vest som skal registreres for å estimere forsinkelse ut i fra køavvikling. For å kunne bruke metoden presentert i kapittel 2.2 må tidsluken mellom kjøretøy i den mettede trafikkstrømmen kunne måles for å finne kapasitet og metningsgrad. I tillegg må omløpstid, grøntid og rødtid registreres for å kunne beregne estimert forsinkelse.

Kameraet ble plassert mellom Nardobakken og Torbjørn Bratts veg nord-vest for å få med så mye av kølengden som mulig som vist i figur 20 på neste side. Registreringstidspunktet ble valgt å være tidlig ettermiddag en hverdag. For å få inn nok data til å gi en god gjennomsnittsverdi burde observasjonene vare minst 10-15 omløp.



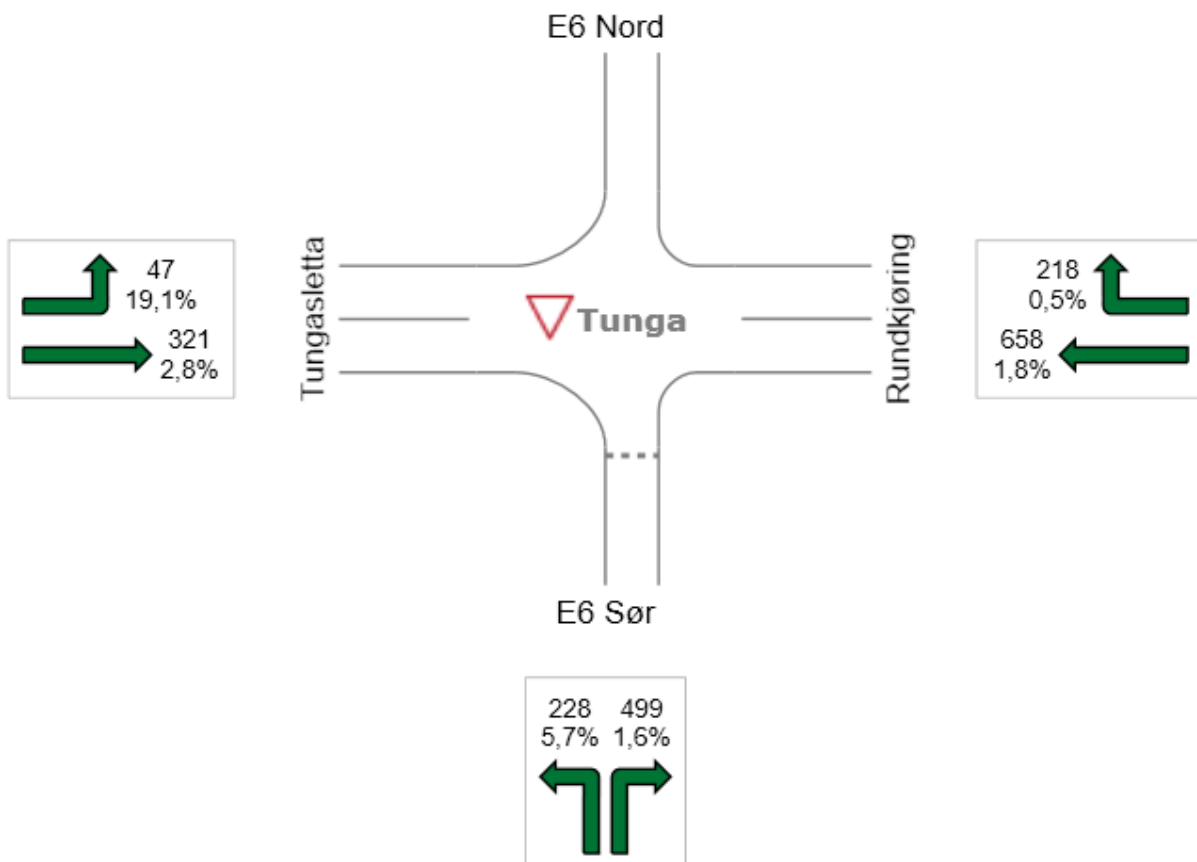
Figur 20 - Kameraplassering ved signalanlegg på Nardo

5. Resultater fra innsamlet data

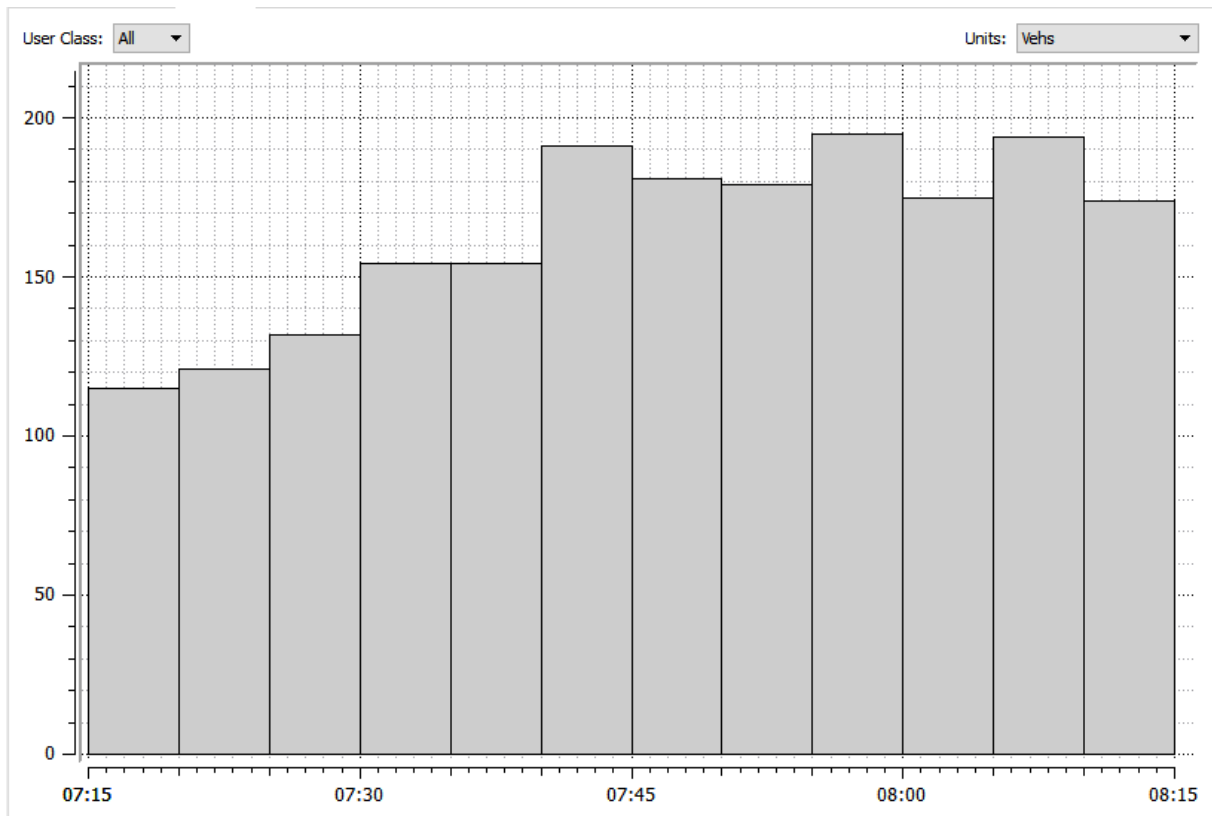
Dette kapittelet inneholder informasjon om videomaterialet som ble hentet inn ved de tre ulike krysstypene og hvordan det ble analysert for å få trafikkdata, følgetid og en estimert forsinkelse. Data for hver av de ulike krysstypene blir presentert i hvert sitt delkapittel.

5.1 Data fra vikeplikt-kryss på Tunga

Vikeplikt-krysset på Tunga ble registrert morgenen 14. mars 2016 i tidsrommet 07:15 til 08:15 for å få med de største rushtoppene. Først ble denne timen med trafikk analysert for å finne ut antall kjøretøy per svingebevegelse. For å få tilstrekkelig nøyaktighet i trafikkfordelingen ble det valgt å dele den registrerte timen i tolv 5-minutters intervaller. Det ble også skilt mellom tunge og lette kjøretøy innenfor hvert intervall. Fotgjengertrafikken var så liten at den ikke ble analysert siden den ikke hadde noen merkbar virkning på forsinkelsen. Dette ga følgende trafikkvolum med andel tunge kjøretøy i prosent for den fulle timen vist i figur 21 og følgende totale trafikkfordeling som vist i figur 22.



Figur 21 - Trafikkvolum på Tunga fra SIDRA INTERSECTION 6.1



Figur 22 - Samlet trafikkfordeling for alle svingebevegelser på Tunga fra Aimsun 8.1.3

Videre ble kølengden til både venstre- og høyresvingen fra sydlig rampe analysert for å finne kølengden over tid. Her ble det valgt å registrere kølengde hvert femte sekund for begge svingebevegelesene gjennom den observerte timen. Dette gir til sammen 720 observasjonspunkt for begge svingebevegelesene og skulle dermed gi en god sammenheng mellom kølengde og tid med tilstrekkelig oppløsning for å finne gjennomsnittlig forsinkelse.

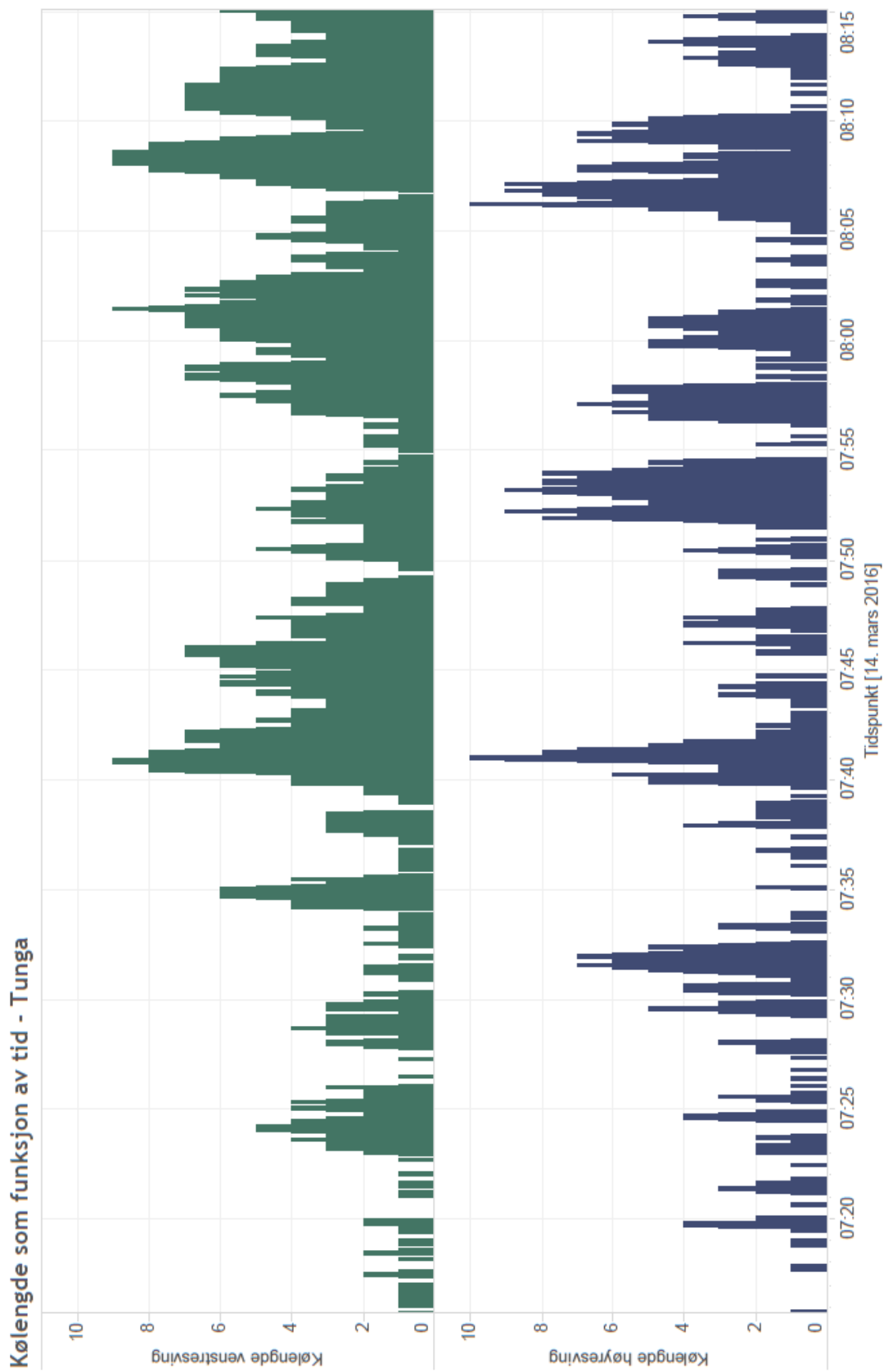
Den totale trafikkfordelingen er delt inn i vikende og prioriterte strømmer for venstresvingen i de observerte 5-minutters intervallene og illustrert i vedlegg 3.

Figur 23 på neste side viser kølengden til venstre- og høyresving plottet mot tid i datavisualiseringsprogrammet Tableau Desktop.

Utregning viser at gjennomsnittskølengden over den observerte timen er som følger:

$$\text{Gjennomsnittlig kølengde venstresving} = 3,07 \text{ kjøretøy}$$

$$\text{Gjennomsnittlig kølengde høyresving} = 1,94 \text{ kjøretøy}$$



Antall kjøretøy i kø for venstresving og høyresving gjennom en times observasjoner mellom 07:15 og 08:15

Figur 23 - Kølengde for venstre- og høyresving ved vikeplikkryss på Tunga

Videre brukes trafikkteilingene vist på figur 21 til å finne gjennomsnittlig ankomst per tidsenhet som brukes i «Little's Law» sammen med gjennomsnitt antall kjøretøy i kø for å gi en estimert forsinkelse per kjøretøy for hver svingebevegelse. Formel og tabell 3 for utregning følger under.

$$W = \frac{L}{\lambda}$$

Tabell 3 - Forsinkelse i vikeplikt kryss for venstre- og høyresving

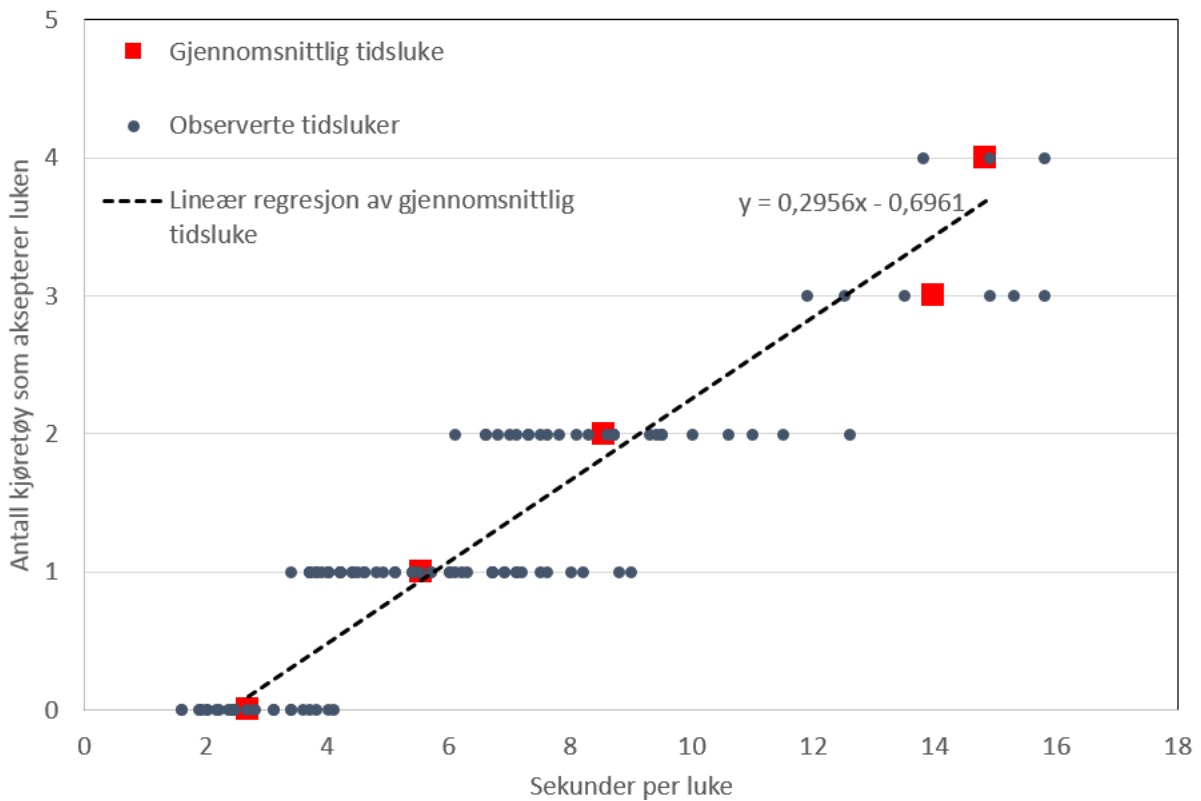
Svingebevegelse	L - Gjennomsnittlig kølengde	λ – Gjennomsnitt av ankomster per sekund	W – Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy i sekunder
Venstresving	3,07 kjt	$\frac{228 \text{ kjt}}{3600 \text{ s}} = 0,0633 \text{ kjt/s}$	$\frac{3,07 \text{ kjt}}{0,0633 \text{ kjt/s}} = 48,5 \text{ s}$
Høyresving	1,94 kjt	$\frac{499 \text{ kjt}}{3600 \text{ s}} = 0,1386 \text{ kjt/s}$	$\frac{1,94 \text{ kjt}}{0,1386 \text{ kjt/s}} = 14,0 \text{ s}$

Maksimal tetthet ble registrert for venstre- og høyresving når kølengden var på sitt lengste. For begge svingebevegelser ble maksimal tetthet registrert til 120 – 130 kjøretøy per kilometer.

Videre analyse og simulering er gjort på venstresvingen. Begrunnelsen til dette er at venstresvingen har den høyeste forsinkelsen. I tillegg var det mye kø i venstre svingefelt gjennom hele registreringsperioden som hindret høyresvingen fritt synsfelt til kjøretøy med forkjørsrett fra venstre. Dette kan ha ført til en ekstra forsinkelse da kjøretøy som svingte til høyre måtte stoppe som første kjøretøy i køen for å se om det var klart fra venstre. Disse to faktorene til sammen gjorde at venstresvingen ble valgt å fokusere på.

Det ble gjort over 100 observasjoner av tidsluker da det var kø i venstresvingen i løpet av observasjonsperioden. Dataen er presentert i figur 24 og inneholder også gjennomsnittet av tidslukene samt en lineær regresjon av disse til bruk i henhold til Sieglocks metode for å finne kritisk tidsluke og følgetid som er vist i tabell 4. Tidslukene er lagt ved som vedlegg 5.

Estimering av kritisk tidsluke og følgetid - Venstresving vikepliktkruss



Figur 24 - Estimering av kritisk tidsluke og følgetid for venstresving ut på hovedveg i vikepliktkruset

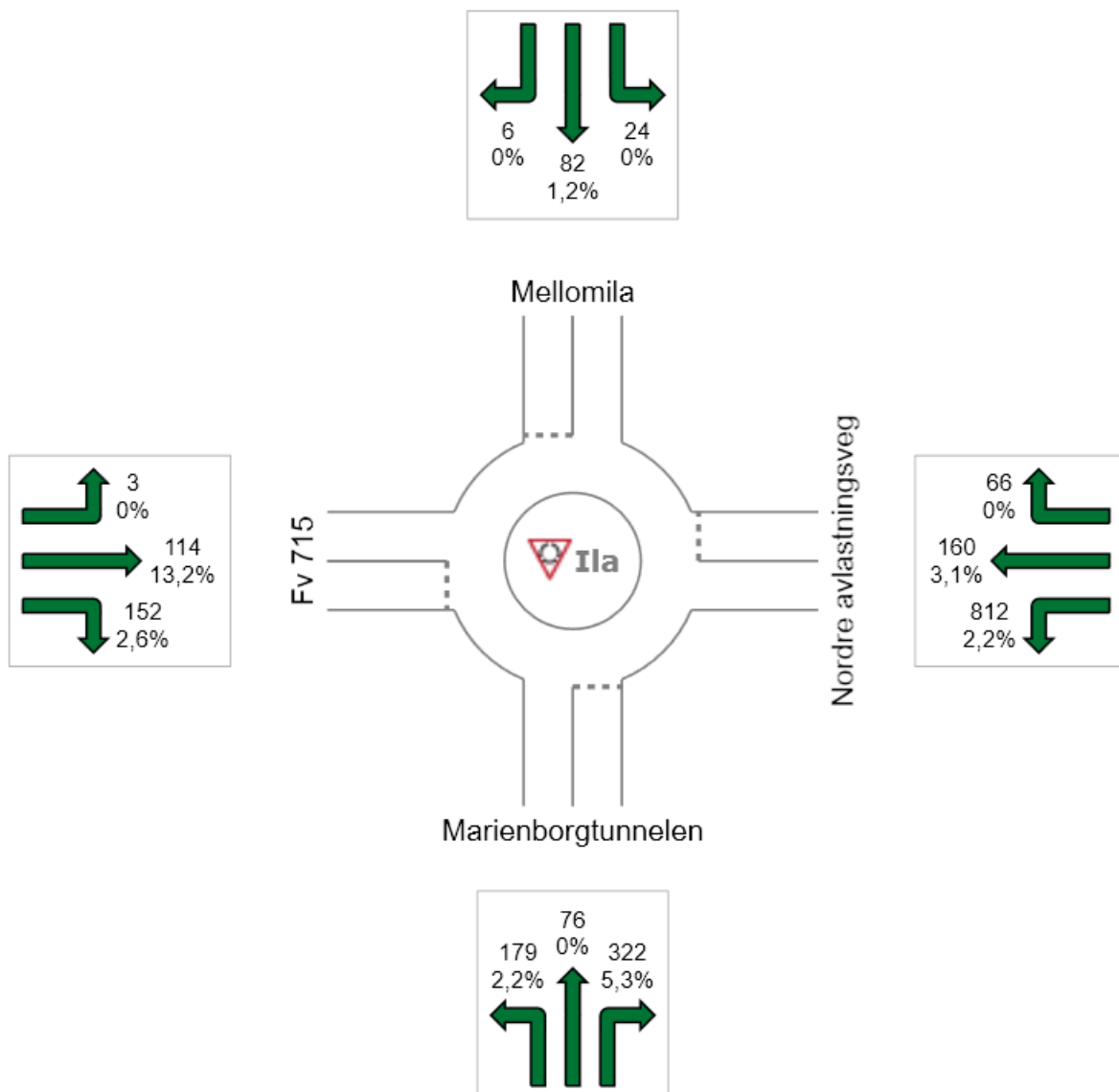
Ut fra regresjonslinjen på figur 24 gir det følgende kritisk tidsluke og følgetid:

Tabell 4 - Kritisk tidsluke og følgetid for venstresving i vikepliktkruss

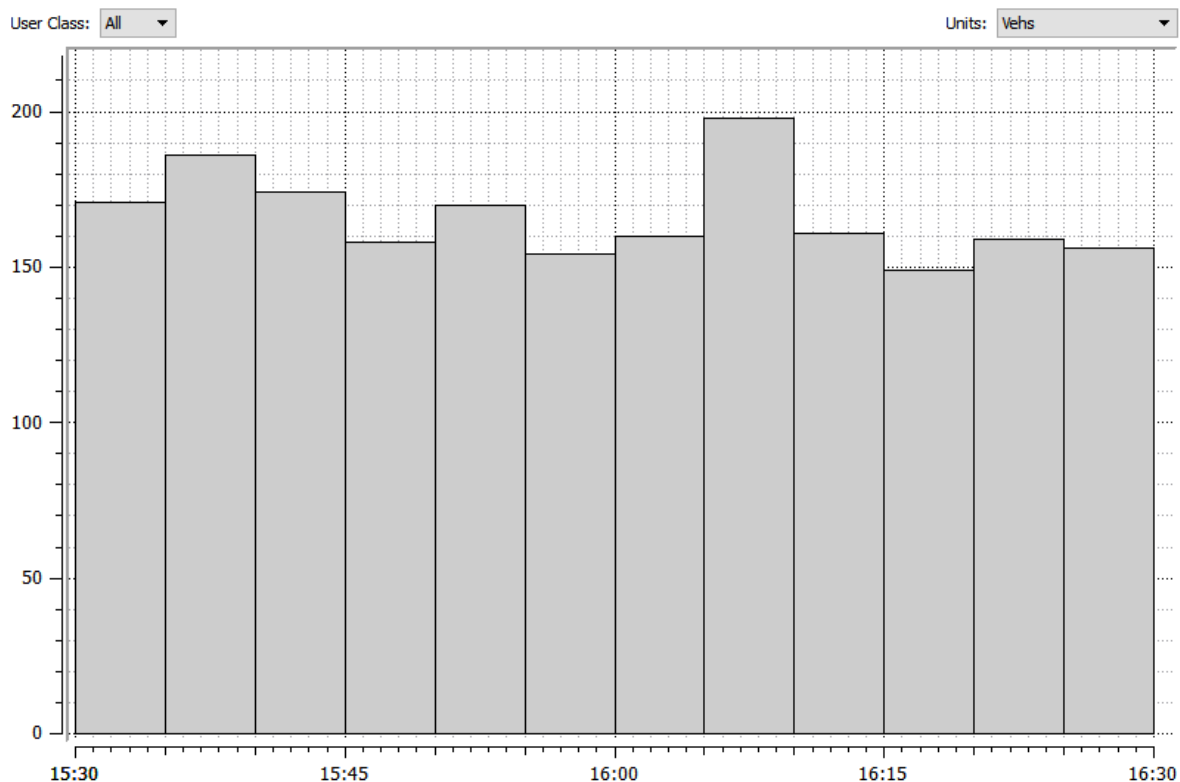
Følgetid	$\frac{1}{0,2956} = 3,4 \text{ sekunder}$
Kritisk tidsluke	$\frac{0,6961}{0,2956} + 3,4/2 = 4,1 \text{ sekunder}$

5.2 Data fra rundkjøring i Ila

Rundkjøringen i Ila ble registrert i ettermiddagsrushet fra klokken 15:30 til 16:30 den 15. mars 2016. Først ble denne timen med trafikk analysert for å finne trafikkvolum for hver svingebevegelse. For å få tilstrekkelig nøyaktighet i trafikkfordelingen ble det valgt å dele den registrerte timen i tolv 5-minutters intervaller. Det ble også skilt mellom tunge og lette kjøretøy innenfor hvert intervall. Det var ingen fotgjengertrafikk i armen ved Fylkesveg 715 som skulle analyseres for forsinkelse. Dette ga følgende trafikkvolum med andel tunge kjøretøy i prosent for den fulle timen vist i figur 25 og følgende totale trafikkfordeling som vist i figur 26.



Figur 25 - Trafikkvolum fordelt på svingebevegelser i Ila fra SIDRA INTERSECTION 6.1



Figur 26 - Samlet trafikkfordelingen for alle svingebevegelser i Ila fra Aimsun 8.1.3

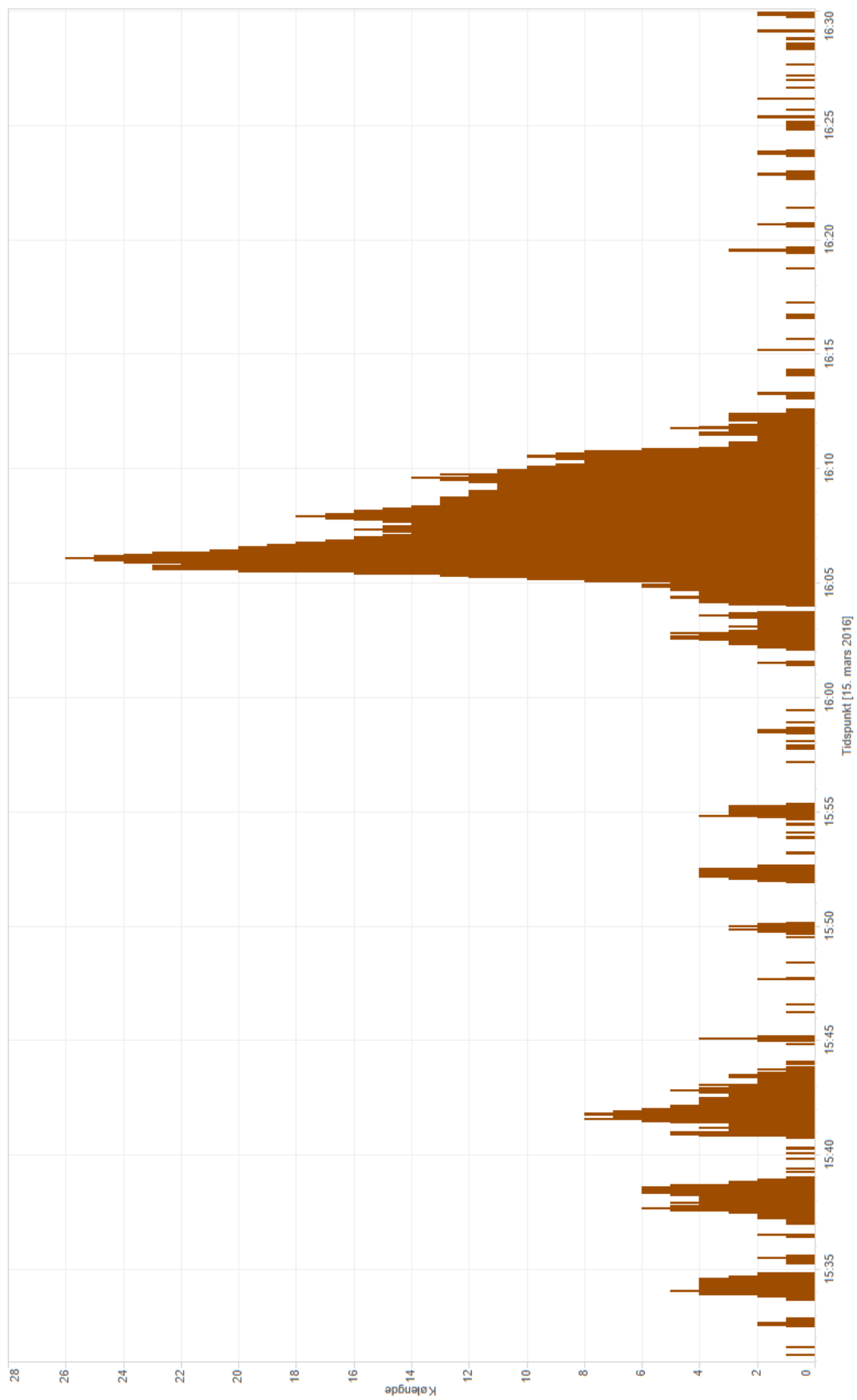
Videre ble kølengden til den vestlige armen på Fylkesveg 715 analysert for å finne kølengden over tid. Også her ble det valgt å registrere kølengde hvert femte sekund for Fylkesveg 715 gjennom den observerte timen. Dette gir til sammen 720 observasjonspunkt og skulle dermed gi en god sammenheng mellom kølengde og tid med tilstrekkelig oppløsning for å finne gjennomsnittlig forsinkelse.

Den totale trafikkfordelingen er delt inn i vikende og prioriterte strømmer for den studerte svingebevegelsen i de observerte 5-minutters intervallene og illustrert i vedlegg 3.

Figur 27 på neste side vises kølengden til vestre arm, Fylkesveg 715, plottet mot tid i datavisualiseringsprogrammet Tableau Desktop.

Utregning viser at gjennomsnittskølengden over den observerte timen er som følger:

$$\text{Gjennomsnittlig kølengde Fylkesveg 715} = 2,39 \text{ kjøretøy}$$



Figur 27 - Kølengde over tid for Fylkesveg 715 ved rundkjøring i Ila

Som for vikeplikt-krysset på Tunga brukes trafikk-tellingene vist på figur 25 til å finne gjennomsnittlig ankomst per tidsenhet som brukes i «Little's Law» sammen med gjennomsnitt antall kjøretøy i kø for å gi en estimert forsinkelse per kjøretøy for den aktuelle svinge-bevegelsen. Tabell 5 for utregning følger under.

Tabell 5 - Forsinkelse i rundkjøring

Svingebeve- gelse	L - Gjennomsnittlig antall kjøretøy i kø	λ – Gjennomsnitt av ankomster per sekund	W – Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy i sekunder
Fylkesveg 715	2,39 kjt	$\frac{269 \text{ kjt}}{3600 \text{ s}} = 0,0747 \text{ kjt/s}$	$\frac{2,39 \text{ kjt}}{0,0747 \text{ kjt/s}} = \mathbf{32,0 \text{ s}}$

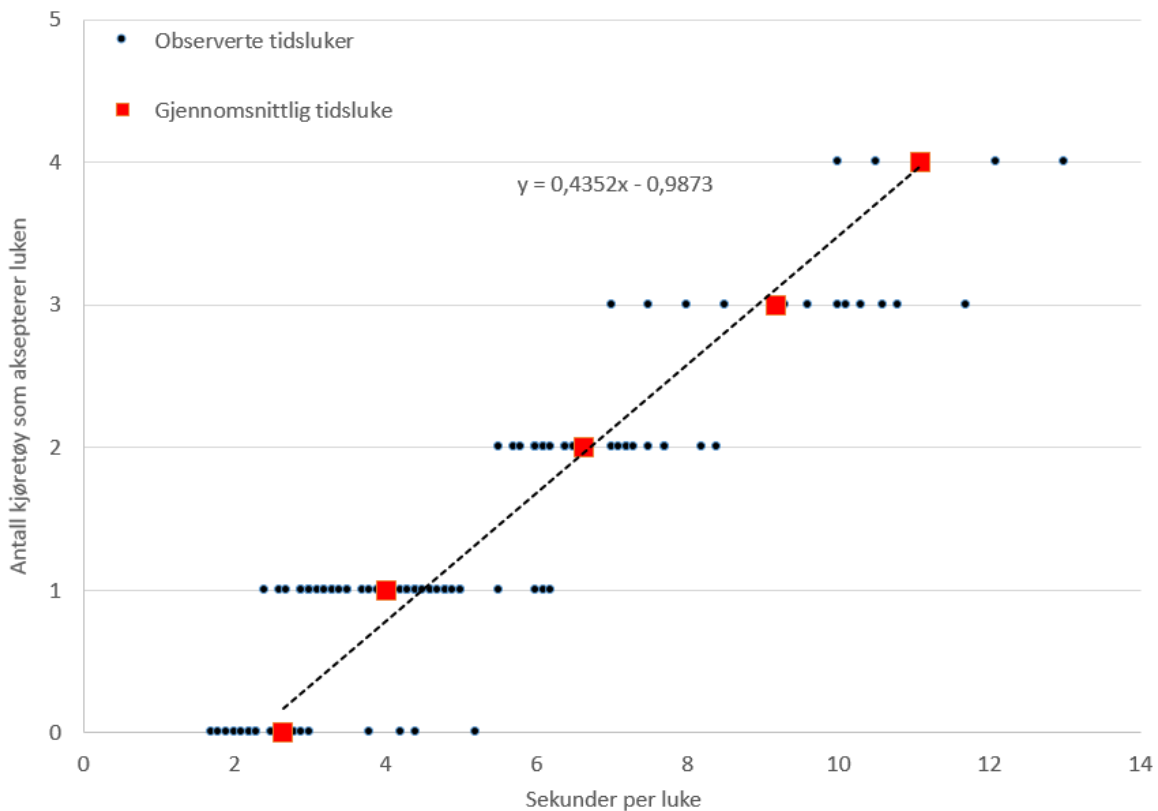
Maksimal tetthet for svingebevegelsen fra Fylkesveg 715 ble registrert til 135 kjøretøy per kilometer ved den lengste kølengden mellom 16:05 og 16:10.

Det ble gjort over 100 observasjoner av tidsluker da det var kø i vestre arm i løpet av observasjonsperioden. Dataen er presentert i figur 28 på neste side og inneholder også gjennomsnittet av tidslukene samt en lineær regresjon av disse til bruk i henhold til Sieglochs metode for å finne kritisk tidsluke og følgetid. Resultatene av Sieglochs metode er presentert i tabell 6.

Tabell 6 - Kritisk tidsluke og følgetid i rundkjøringen

Følgetid	$\frac{1}{0,4352} = \mathbf{2,3 \text{ sekunder}}$
Kritisk tidsluke	$\frac{0,9873}{0,4352} + 2,3/2 = \mathbf{3,4 \text{ sekunder}}$

Estimering av kritisk tidsluke og følgetid - Rundkjøring



Figur 28 - Estimering av kritisk tidsluke og følgetid for studert svingebevegelse i rundkjøring

5.3 Data fra signalanlegg på Nardo

Signalanlegget på Nardo ble registrert den 16. mars mellom 15:00 og 16:00. De 20 første omløpene av signalanlegget ble valgt til å regne ut en gjennomsnittlig verdi for omløpstid, grøntid, rødtid samt finne antall kjøretøy. Det var kun svingebevegelsen rett fram fra Torbjørn Bratts veg nord-vest som ble registrert og analysert.

For alle omløpene ble omløpstiden, grøntiden og rødtiden registrert for å finne gjennomsnittsverdier til å bruke både i simuleringen og estimeringen av forsinkelsen. Antall kjøretøy ble summert opp for alle de 20 omløpene. Gjennomsnittlig tidsluke er for alle bilene i den mettede køen ved de ti omløpene med lengste mettet køen og inkluderer dermed tapt tid for signalanlegget (Highway Capacity Manual s. 7-8, 2010). På grunn av at tapt tid ved oppstart er inkludert i gjennomsnittlig tidsluke er gultiden valgt å inkluderes i målingen av grøntid. Tabell 7 under presenterer resultatene fra registreringen listet opp.

Tabell 7 - Data fra signalanlegget på Nardo

Mål	Registrert verdi
C - Gjennomsnittlig omløpstid	98 sekunder
g _i - Gjennomsnittlig effektiv grøntid	47 sekunder
r _i - Gjennomsnittlig effektiv rødtid	51 sekunder
Antall kjøretøy	351 personbiler, 6 tunge kjøretøy
h - Gjennomsnittlig tidsluke for mettet kø	2,15 sekunder per kjøretøy

Videre brukes metoden presentert i kapittel 2.2 for estimeringen av forsinkelsen i signalanlegget. Først beregnes metningsvolum, grøntidsandel, kapasitet og metningsgrad ut fra definisjonene satt i Highway Capacity Manual (2010) som vist i tabell 8. Data om tidslukene er presentert i vedlegg 4.

Tabell 8 - Metningsgrad og kapasitet for signalanlegg

Mål	Utrekning	Resultat
<i>s</i> – Metningsvolum per time	$\frac{3600 \text{ kjt/s}}{2,15 \text{ s}}$	1674 kjt/t
<i>u</i> - Grøntidsandel	$\frac{47\text{s}}{98\text{s}}$	0,48
<i>Q</i> – Kapasitet per time	$s * u = 1667 \frac{\text{kJt}}{\text{t}} * 0,48$	804 kjt/t
<i>x</i> - Metningsgrad	$x = \frac{\text{Volum}}{Q} = \frac{(351 + 6) * \frac{3600\text{s}}{20 * 98\text{s}}}{804}$	0,816

Disse verdiene brukes videre i formelen fra Akçelik (1988) med kalibreringsparametre i tråd med den amerikanske «Highway Capacity Manual».

$$d = \frac{0,5 c (1 - u)^2}{1 - u x} + 900 T x^n \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{m(x - x_0)}{Q T}} \right]$$

Tabell 9 - Estimert forsinkelse i signalanlegg

d	Gjennomsnittlig forsinkelse i sekunder per kjøretøy.
	Estimert til 27,3 sekunder
c	98 sekunder
u	0,48
x	0,816
T (10 omløp)	0,272 timer
n	2
m	4
Q	804 kjt/t
x ₀	0

Innsatt i formelen over gir dette en samlet gjennomsnittlig forsinkelse på 27,3 sekunder per kjøretøy som også er vist i tabell 9 over. Maksimal tetthet ble observert til å være 130 kjøretøy per kilometer ved slutten av rødtiden.

Den tapte tiden i signalanlegget ble funnet ved å regne ut gjennomsnittlig tidsluke mellom kjøretøy nummer 1-4 og 5-N i den mettede køen i signalanlegget for alle 20 omløpene. Forskjellen mellom disse to viste at kjøretøy 1-4 hadde en gjennomsnittlig tidsluke som var 0,243 sekunder lengre enn kjøretøy 5-N noe som tilsvarer en tapt tid rundet opp til 1,0 sekund. Data om tidslukene og tapt tid er presentert i vedlegg 4.

6. Kalibreringsprosess og simuleringresultater

Dette kapittelet benytter metodene beskrevet i kapittel 2.4 til å kalibrere de utvalgte parametrene for å oppnå samsvar mellom observert forsinkelse og simulert forsinkelse i Aimsun. Første delkapittel inneholder også dokumentasjon av modellen og simuleringene som ble kjørt. I dette delkapittelet er alle andre forhold og faktorer som påvirker simuleringene beskrevet slik at simuleringene er etterprøvbare.

6.1 Dokumentasjon av modell

Dette delkapittelet beskriver oppbyggingen av modellene i detaljgrad slik at de kan gjenskapes. Alle andre parametre enn de som inngår i problemstillingen er valgt til å beholde standardverdien satt i Aimsuns mesomodell. For parametrene *look-ahead distance* og *visibility along main stream* er standardverdiene valgt for vegtypen *arterial*. Dette gir en *look-ahead distance* på 300,0 meter og *visibility along main stream* på 60,0 meter.

Det er brukt to forskjellige kjøretøyklasser i simuleringene som er definert av *TSS 01 – Template*. De brukte kjøretøyklassene er *car* som definerer alle kjøretøy som ikke er definert som tunge kjøretøy og *truck* som er brukt for tunge kjøretøy inkludert busser. Simuleringene som er gjort er gjort med *fixed reaction time settings* som betyr at alle kjøretøytypene har samme reaksjonstid. Standardverdiene for kjøretøyklassene *car* og *truck* er vist i tabell 10 og tabell 11.

Tabell 10 - Standardverdier for kjøretøyklassen *car*

Car	Gjennomsnitt	Avvik	Minimum	Maksimum
Lengde	4,00 m	0,50 m	3,50 m	4,50 m
Bredde	2,00 m	0,00 m	2,00 m	2,00 m
<i>Max Desired Speed [km/h]</i>	110,00	10,00	80,00	150,00

Tabell 11 - Standardverdier for kjøretøyklassen truck

Truck	Gjennomsnitt	Avvik	Minimum	Maksimum
Lengde	8,00 m	2,00 m	6,00 m	10,00 m
Bredde	2,25 m	0,20 m	2,00 m	2,80 m
<i>Max Desired Speed [km/h]</i>	85,00	10,00	70,00	100,00

Sensitivitetsanalysen gjort på Aimsuns meso-modell av Ciuffo et al (2013) tilsier at kjøretøylengden påvirker resultatet for både rundkjøring, signalanlegg og vikeplikt kryss. En standardverdi på 4,00 meter for en personbil er mindre enn gjennomsnittet og det er derfor brukt data fra Opplysningsrådet for Veitrafikken AS (Jakobsen, 2015) om de mest solgte bilene 2014 for å gi et bedre estimat på gjennomsnittlig kjøretøylengde av den norske bilparken. For å finne et estimat ble det brukt salgstall for de 20 mest solgte bilene i 2014 i vedlegg 6 sammen med kjøretøylengden for å finne en gjennomsnittsverdi. Denne ble på tilnærmet 4,40 meter som burde gi et bedre grunnlag for å beskrive simulert forsinkelse for norske forhold. Dette estimatet har mange feilkilder siden det kun tar med salg for ett år og bilparken i Norge er gjennomsnittlig mer enn ti år gammel. Likevel gir det et bedre estimat enn standardverdiene i Aimsun og velges derfor å bruke gjennomsnittslengde på 4,40 meter videre med følgende parametre i tabell 12.

Tabell 12 - Tilpasset kjøretøylengde norske forhold for klassen car

Car	Gjennomsnitt	Avvik	Minimum	Maksimum
Lengde	4,40 m	0,50 m	3,90 m	4,90 m
Bredde	2,00 m	0,00 m	2,00 m	2,00 m
<i>Max Desired Speed [km/h]</i>	110,00	10,00	80,00	150,00

Geometrisk er modellene av de ulike kryssene bygget opp etter kartdata og flyfoto for å sikre riktig lengde på ulike strekninger og sentraløy for rundkjøringen. Det er tatt med et område rundt de aktuelle kryssene som er stort nok til å få med seg all kjøppbygging, men ikke mer for å hindre lang reisetid til krysset der trafikken ble registrert. Modellene er bygget i 2D og inkluderer ingen positiv eller negativ helning. Fartsgrensene på strekningene er satt i henhold til fartsregulering på stedet eller hentet fra Norsk Vegdatabase.

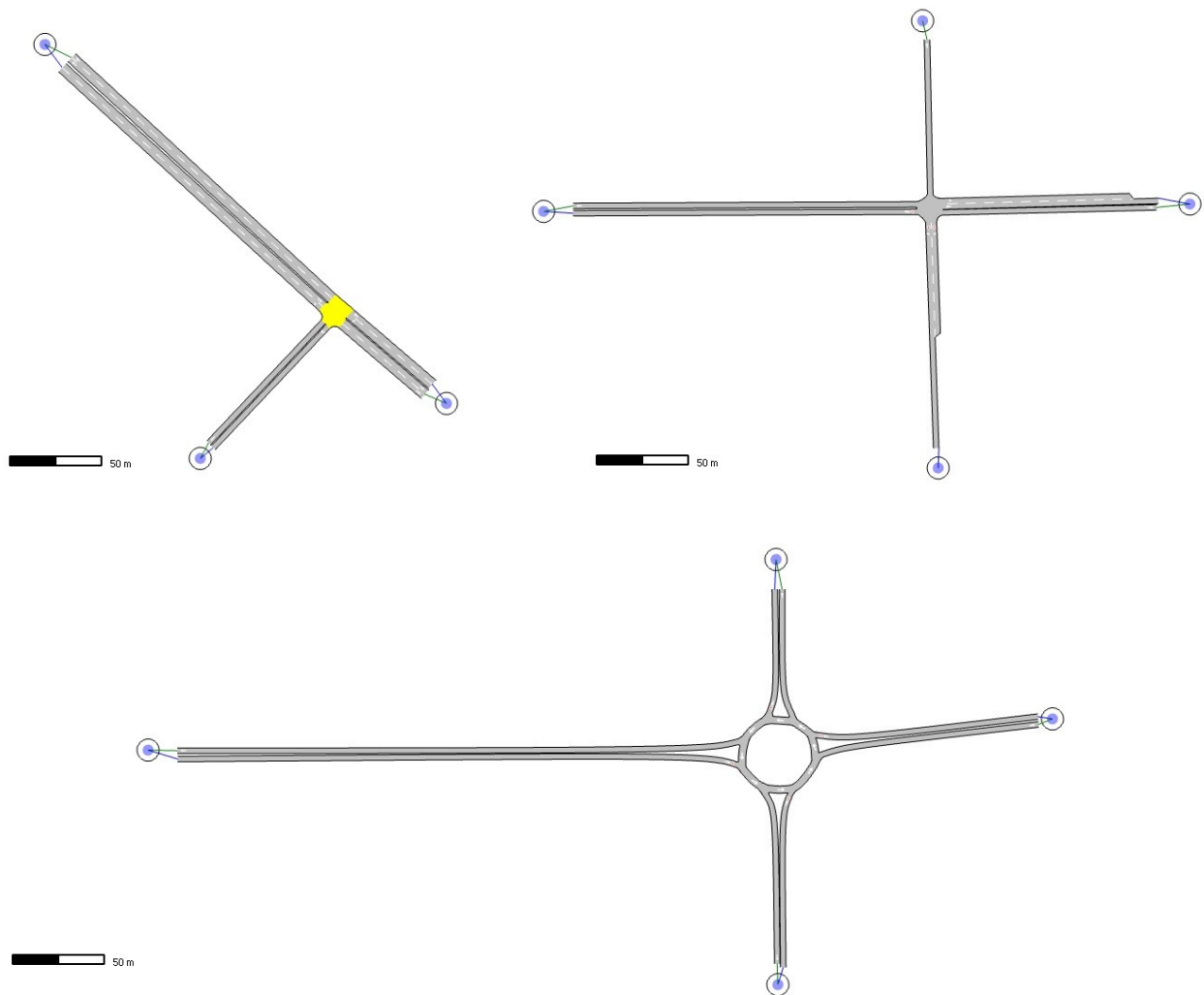
Trafikkfordelingen for modellen av rundkjøringen og vikeplikt-krysset er delt opp i 5-minutters intervaller for både personbiler og tyngre kjøretøy. Trafikkmatrisene til disse to kryssene er vedlagt som vedlegg 2. For rundkjøringen ble det ene 5-minutter intervallet mellom 16:05 og 16:10 delt opp i to mindre intervaller. Dette ble gjort for å fange opp kjøretøyene som kom samlet inn i køen på fylkesveg 715 mellom 16:05 og 16:07. For kjøretøy fra Flakk ble disse telt opp i dette intervallet. Fra de andre retningene ble det antatt en konstant fordeling av trafikken slik at 60 % av 5-minutters matrisen gikk til 3-minutters intervallet, og resterende 40 % gikk til 2-minutters intervallet.

Trafikkfordelingen for signalanlegget er lagt inn i to matriser, en for personbiler og en for tyngre kjøretøy over de 20 omløpene som til sammen varer i 32 minutter og 40 sekunder. I tillegg er det lagt til en tom trafikkmatrise på 1 minutt og 20 sekunder slik at signalanlegget tømmes før simuleringen er ferdig. Dette gir en simulering på til sammen 34 minutter for signalanlegget.

Signalplanen for lyskrysset er satt til gjennomsnittsverdiene oppgitt i kapittel 5.3. Det er ikke satt opp noe gultid i simuleringen. Til sammen gir dette en omløpstid på 98 sekunder hvor 47 sekunder er grøntid og 51 sekunder er rødtid. Signalanlegget ble også markert som *yellow box*.

Aimsunfilene som er brukt til simuleringene er lastet opp som digitalt vedlegg ved innlevering av oppgaven gjennom DAIM.

Videre følger figur 29 som illustrerer den geometriske oppbyggingen til de tre ulike krysstypene som ble brukt til simulering i Aimsun.



Figur 29 - Illustrasjon av geometrisk oppbygging av de ulike kryssene i Aimsun 8.1.3

Data fra de simulerte replikasjonene er definert til å hentes ut hvert minutt og det er de beregnede gjennomsnittsverdiene fra replikasjonene i Aimsun som brukes. Data hentes ut fra strekningene som tilhører den analyserte svingebevegelser der køen bygges opp.

Som *warm-up* er den definerte trafikkmatrisen, *scenario demand*, kjørt i 15 minutter for å fylle opp nettverket for alle de aktuelle kryssene.

6.2 Fastsette antall simuleringer

For å gi en simulert forsinkelse som er statistisk signifikant på ønsket nivå benyttes metoden til Buisson et al. (2014) beskrevet i kapittel 2.3. For å finne et minimum antall simuleringer (R_i) brukes følgende formel.

$$R_i = \left(\frac{S_{R_0}(Y_i) t_{\alpha/2}}{d_i} \right)^2$$

Videre er det valgt at akseptabel feil i simulert forsinkelse (d_i) skal være maksimalt 1,00 sekund. Kritisk t-verdi er satt på bakgrunn av et ønsket signifikansnivå på 95 % og R_0 som er 5 replikasjoner og frihetsgrader gir at $t_{0,025} = 2,571$ fra Blakstad (1995). De simulerte forsinkelsene er gjort på de aktuelle strekningene med standardverdier for alle parametre for å bestemme standardavviket og er vist i tabell 13 under.

Tabell 13 - Standardavvik i simulert forsinkelse

Kryss	Gjennomsnittlig standardavvik for forsinkelse med fem replikasjoner
Rundkjøring	1,97 sekunder
Vikeplikt	0,87 sekunder
Signalanlegg	1,18 sekunder

Ut fra tabell 13 over er det rundkjøringen som har størst standardavvik i forsinkelsen og det er denne forsinkelsen som brukes videre til å regne ut minimum antall replikasjoner for alle kryssene.

$$R_i = \left(\frac{1,97 * 2,571}{1} \right)^2 = 25,65 \approx 26$$

Dermed vil 26 replikasjoner i følge Buisson (2014) sikre at gjennomsnittsforsinkelsen er med ett sekunds nøyaktighet med 95 % signifikans for alle de aktuelle kryssene.

6.3 Maksimal tetthet i køsituasjon

Ut fra videoregistreringer ble tettheten til køen målt i de forskjellige kryssene de gangene køen var opp mot sitt lengste. Det er flere forhold som påvirker den maksimale tettheten (*jam density*). Aakre, E. H. (2015) skriver at observasjoner i felt og undersøkelser av flyfoto i Trondheim viser at maksimal tetthet er rundt 110 til 140 kjøretøy per kilometer. Videre påpeker han at forhold som høy andel tunge kjøretøy, positiv helning på strekningen og enten kort omløpstid eller kontinuerlig avvikling trekker ned den maksimale tettheten. Spesielt andelen tunge kjøretøy er en viktig faktor for tettheten i strekningene i denne analysen. Registrert maksimal tetthet for kryssene er oppsummert i tabell 14 under.

Tabell 14 - Maksimal tetthet observert for de ulikekryssene

Kryss	Maksimal tetthet [kjøretøy per kilometer]
Vikeplikt kryss	120 - 130
Rundkjøring	135
Signalanlegg	130

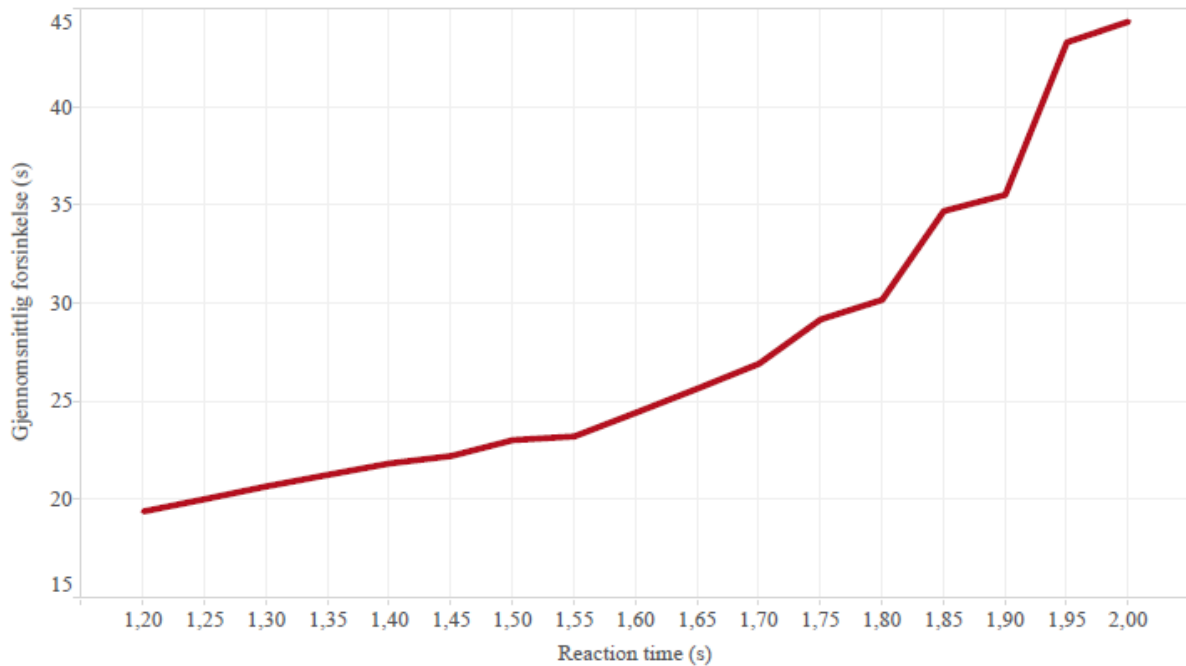
Disse registreringene stemmer godt overens med undersøkelsene til Aakre, E. H. (2015). Rundkjøringen har den største tettheten og det er heller ikke uventet tatt i betraktning den lange kølengden som er over 25 kjøretøy på sitt lengste. For videre simulering er det valgt å sette maksimal tetthet til det høyeste observert over tidsperioden det ble gjort registreringer. Dette betyr at tilfarten til signalanlegget og vikeplikt krysset har satt maksimal tetthet til 130 kjt/km og for rundkjøringen er det satt til 135 kjt/km.

6.4 Reaksjonstidsparametre

Det er to ulike reaksjonstidsparametre som skal bestemmes i dette kapitlet. Den første er *reaction time* som er en generell reaksjonstid som har innvirkning på alle kryssene. Den andre er *reaction time at traffic light* som skal fange opp den tapte tiden første kjøretøy har ved signalbytte i et lyskryss. Den estimerte observerte forsinkelsen er målt til 27,3 sekunder. Den tapte tiden for første kjøretøy ble målt til 1,0 sekund.

Ved standardverdiene på 1,2 sekunder i *reaction time* og 1,6 sekunder i *reaction time at traffic light* ble den simulerte forsinkelsen 18,73 sekunder.

For videre simulering ble *reaction time at traffic light* satt 1,0 sekund over *reaction time* for å få med den tapte tiden for det første kjøretøyet. For hver simulering ble *reaction time* og *reaction time at traffic light* endret med 0,05 sekunder for å tilnærme simulert forsinkelse til observert forsinkelse. Resultatene fra disse simuleringene er presentert i figur 30 under.



Figur 30 - Gjennomsnittlig forsinkelse som funksjon av reaksjonstid i signalanlegg

Ut fra figur 30 over ser en at økningen i *reaction time* og *reaction time at traffic light* øker forsinkelsen med relativ liten stigningsgrad fram til rundt 1,80 sekunder. Da øker forsinkelsen eksponentielt noe som tyder på at signalanlegget nærmer seg sin metningsgrad ved reaksjonstider for 1,80 sekunder og over. Den simulerte forsinkelsen ved *reaction time* på 1,70 sekunder og *reaction time at traffic light* på 2,70 sekunder var 26,9 sekunder og dermed nærmest den estimerte forsinkelse. Ved disse reaksjonstidene er også den simulerte forsinkelsen innenfor et sekunds feilmargin for den estimerte observerte forsinkelsen. Det er denne reaksjonstiden som blir brukt videre for å kalibrere vikeplikt krysset og rundkjøringen for å oppnå riktige parametre i *gap-acceptance model*.

6.5 Parametre i gap-acceptance model

For kalibreringen av *gap-acceptance model* i rundkjøringen og vikeplikt-krysset brukes parametrene som allerede er definert tidligere i kapittel 6. Resten av parametrene som ikke er nevnt er ikke endret og har dermed standardverdier satt av TSS. Tabell 15 under oppsummerer hvilke parametre som brukes ved kalibreringen.

Tabell 15 - Definerte parametre til kalibrering av *gap-acceptance model*

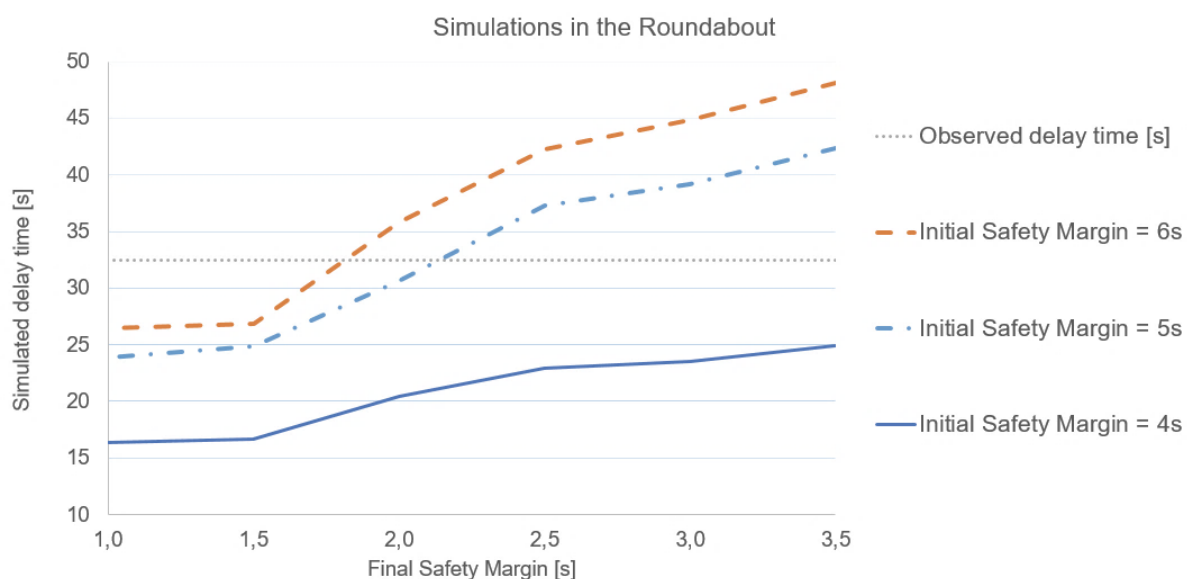
Parameter	Enhet	Verdi	Deviation	Min	Max
<i>Reaction time</i>	Sekunder	1,7	-	-	-
<i>Reaction time at traffic light</i>	Sekunder	2,7	-	-	-
<i>Jam density - Rundkjøring</i>	Kjt/km	135	-	-	-
<i>Jam density - Vikeplikt-kryss</i>	Kjt/km	130	-	-	-
<i>Vehicle length (car)</i>	Meter	4,4	0,5	3,9	4,9
<i>Initial safety margin</i>	Sekunder	2,0	-	-	-
<i>Final safety margin</i>	Sekunder	6,0	-	-	-
<i>Maximum give-way time (car)</i>	Sekunder	10,0	2,5	5,0	15,0
<i>Maximum give-way time (truck)</i>	Sekunder	35,0	10,0	20,0	60,0

Ved kalibreringen i rundkjøringen ble alle svingebevegelesene i krysset justert samtidig gjennom definerte verdier i *Road Type*. Dette ble gjort fordi de den studerte svingebevegelesen er avhengig av tidslukene i den sirkulerende strømmen og dermed sikkerhetsmarginene for de andre armene. I vikeplikt-krysset ble kun den analyserte svingebevegelesen endret.

Rundkjøring

Med parametrene i tabell 15 ble først rundkjøringen simulert med ulike verdier av *initial* og *final safety margin*. Ved simulering av rundkjøringen med parametrene som er definert i tabell 15 over ble gjennomsnittsforsinkelsen 35,8 sekunder. Den estimerte observerte forsinkelsen er 32,0 sekunder.

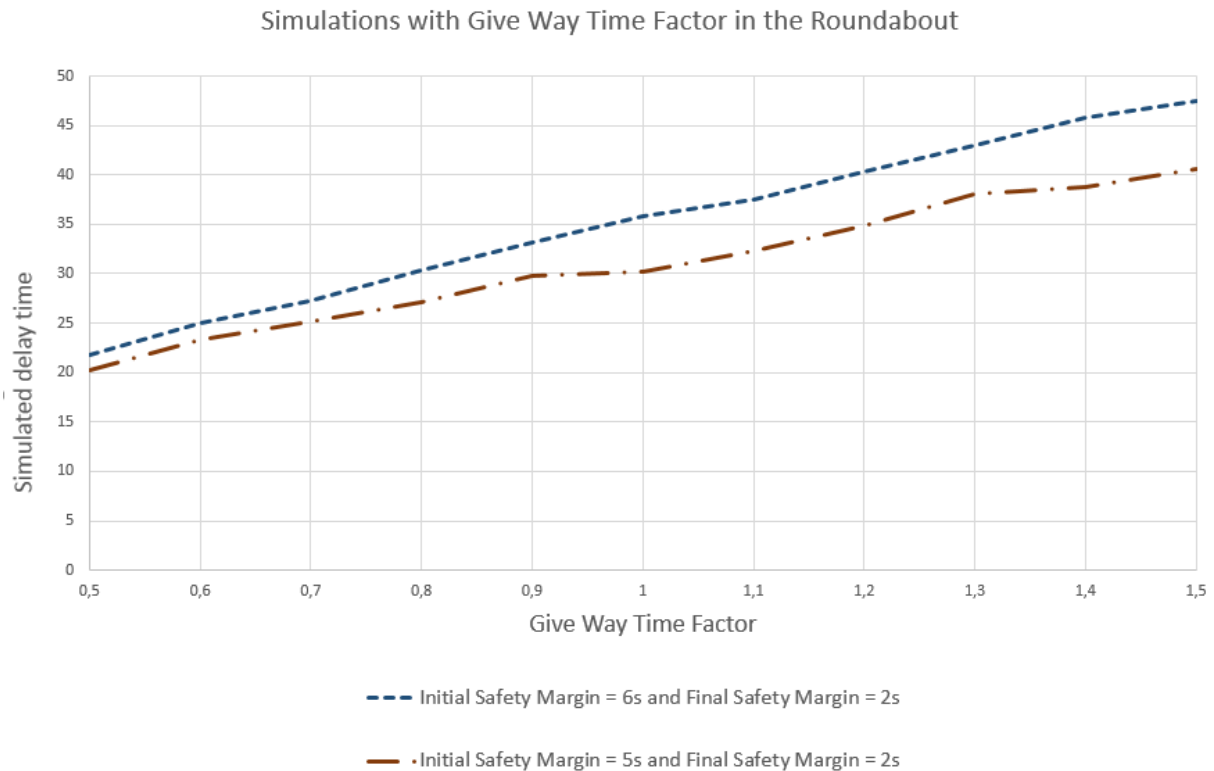
For å se hvordan endring i de ulike parametrene som inngår i *gap-acceptance model* påvirker den simulerte forsinkelsen ble det foretatt simuleringer der en og en av parametrene ble endret. Først ble forholdet mellom *initial safety margin* og *final safety margin* analysert for rundkjøringen. Målte verdier for kritisk tidsluke ble brukt som grunnlag for sikkerhetsmarginene. *Final safety margin* ble justert fra 1,0 sekund til 3,5 sekunder med 0,5 sekunder intervall for *initial safety margin* på 4, 5 og 6 sekunder som vist under i figur 31.



Figur 31 - Simulert forsinkelse for studert svingebevegelesen i rundkjøringen som funksjon av *final safety margin*

Ut i fra figur 31 over gir standardverdien på 2,0 sekunder for *final safety margin* og 5,0 eller 6,0 sekunder for *initial safety margin* gode tilnærmelser til den observerte forsinkelsen. Disse to kombinasjonene ble videre analysert for å se effekten av å endre *maximum give way time*

gjennom *give way time factor*. Her ble faktoren endret for å få samme prosentvis endring for både kjøretøysklassen *car* og *truck*, som begge brukes i simuleringene. Give Way Time Factor ble justert fra 0,5 til 1,5 for de to kombinasjonene av sikkerhetsfaktorer nevnt tidligere i figur 31.



Figur 32 - Simulert forsinkelse i rundkjøringen med varierende *give way time factor*

Figur 32 viser at den simulerte forsinkelsen er tilnærmet lik ved lav *give way time factor* på 0,5. Stigningsgraden er større der differansen mellom *initial* og *final safety margin* også er større. Dette er som forventet siden kjøretøyene da vil vente lengre med en høyere sikkerhetsfaktor før den reduseres.

Stigningen av kurvene er relativt konstant og gjør det enkelt å bruke *give way time factor* til å kalibrere forsinkelsen etter at fornuftige verdier for *initial* og *final safety margin* er satt. Dette er viktig siden forsinkelse i en arm av en rundkjøring er avhengig av tidslukene i den sirkulerende strømmen og dermed sikkerhetsmarginene som er satt for alle svingebevegelesene. I figur 31 illustreres dette ved at den simulerte forsinkelsen i den studerte armen er mer variabel ved endring av sikkerhetsmarginene siden dette påvirker alle armene og dermed det tidslukende i den sirkulerende strømmen.

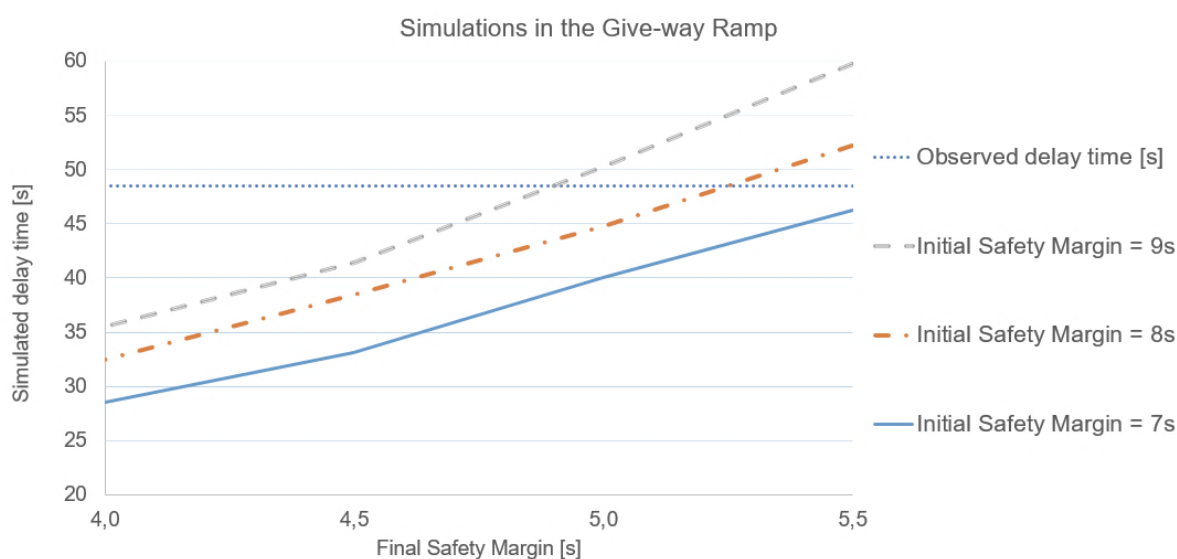
Kalibreringer i rundkjøringen viser at flere kombinasjoner av *initial* og *final safety margin* sammen med *give way time factor* gir riktig simulert forsinkelse. Avslutningsvis er de to kombinasjonene som er vist i figur 31 og figur 32 oppsummert i tabell 16.

Tabell 16 - Kalibrerte verdier for rundkjøringen

<i>Initial safety margin</i>	<i>Final safety margin</i>	<i>Give way time factor</i>	Simulert forsinkelse
5,0 sekunder	2,0 sekunder	1,10	32,2 sekunder
6,0 sekunder	2,0 sekunder	0,85	32,2 sekunder

Vikeplikt kryss

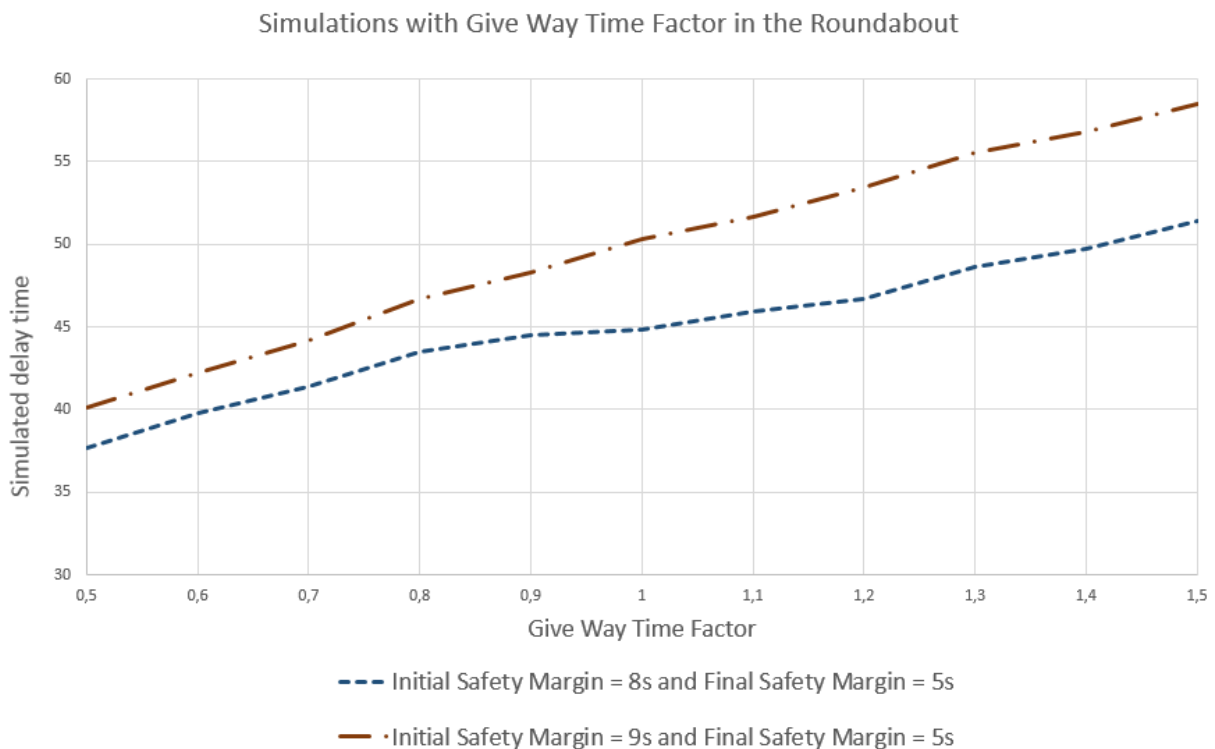
Med parametrene i tabell 15 ble vikeplikt krysset simulert med ulike verdier av *initial* og *final safety margin* samt *maximum give way time* på samme måte som rundkjøringen. Ved simulering av vikeplikt krysset med disse parametrene ble gjennomsnittsforsinkelsen 12,4 sekunder sammenlignet med den observerte forsinkelsen på 48,5 sekunder. Simuleringer med 7,0, 8,0 og 9,0 sekunders *initial safety margin* med varierende *final safety margin* fra 4,0 til 5,5 ble gjennomført. Disse verdiene ble valgt fordi de er rundt den målte kritiske tidsluken og viste seg å gi gode tilnærminger til observert forsinkelse. Resultatene fra disse simuleringene er vist i figur 33.



Figur 33 - Simulert forsinkelse for venstresvingen i vikeplikt krysset som funksjon av *final safety margin*

Figur 33 illustrerer simulert forsinkelse for de ulike kombinasjonene av *initial* og *final safety margin*. Ut fra resultatene er det kombinasjonene med 5,0 sekunder *final safety margin* og 8,0 eller 9,0 sekunders *initial safety margin* som gir resultater tette opp til observert forsinkelse.

Disse to kombinasjonene ble brukt videre for å se på hvordan de ble påvirket av ulik *give way time factor*. Her ble *give way time factor* variert fra 0,5 til 1,5 for å se effekten på den simulerte forsinkelsen. Resultatene er illustrert i figur 34.



Figur 34 - Simulert forsinkelse i vikeplikt-krysset med varierende *give way time factor*

Effekten av *give way time factor* på simulert forsinkelse i vikeplikt-krysset er lik som i rundkjøringen. Det er en relativ jevnt stigning for begge kombinasjonene, men høyere stigningsgrad for kombinasjonen med størst differanse mellom sikkerhetsmarginene som i rundkjøringen i figur 32.

Kalibreringer i vikeplikt-krysset viser som i rundkjøringen at flere kombinasjoner av *initial* og *final safety margin* sammen med *give way time factor* gir riktig simulert forsinkelse. Avslutningsvis er de to kombinasjonene som er vist i figur 33 og figur 34 oppsummert i tabell 17.

Tabell 17 - Kalibrerte verdier for venstresvingen i vikeplikkrysset

<i>Initial safety margin</i>	<i>Final safety margin</i>	<i>Give way time factor</i>	Simulert forsinkelse
8,0 sekunder	5,0 sekunder	1,30	48,6 sekunder
9,0 sekunder	5,0 sekunder	0,90	48,3 sekunder

7. Diskusjon

Dette kapittelet tar for seg diskusjon av resultatene fra kapittel 5 og 6. Resultatene vil bli sammenlignet med lignende undersøkelser gjort nasjonalt og internasjonalt. Videre vil simuleringsresultatene fra Aimsuns mesomodell bli sammenlignet med SIDRA INTERSECTION 6.1 fra SIDRA SOLUTIONS. Svakheter ved datagrunnlaget og analysen vil også bli diskutert sammen med begrensningene til simuleringsverktøyene som er brukt i diskusjonen.

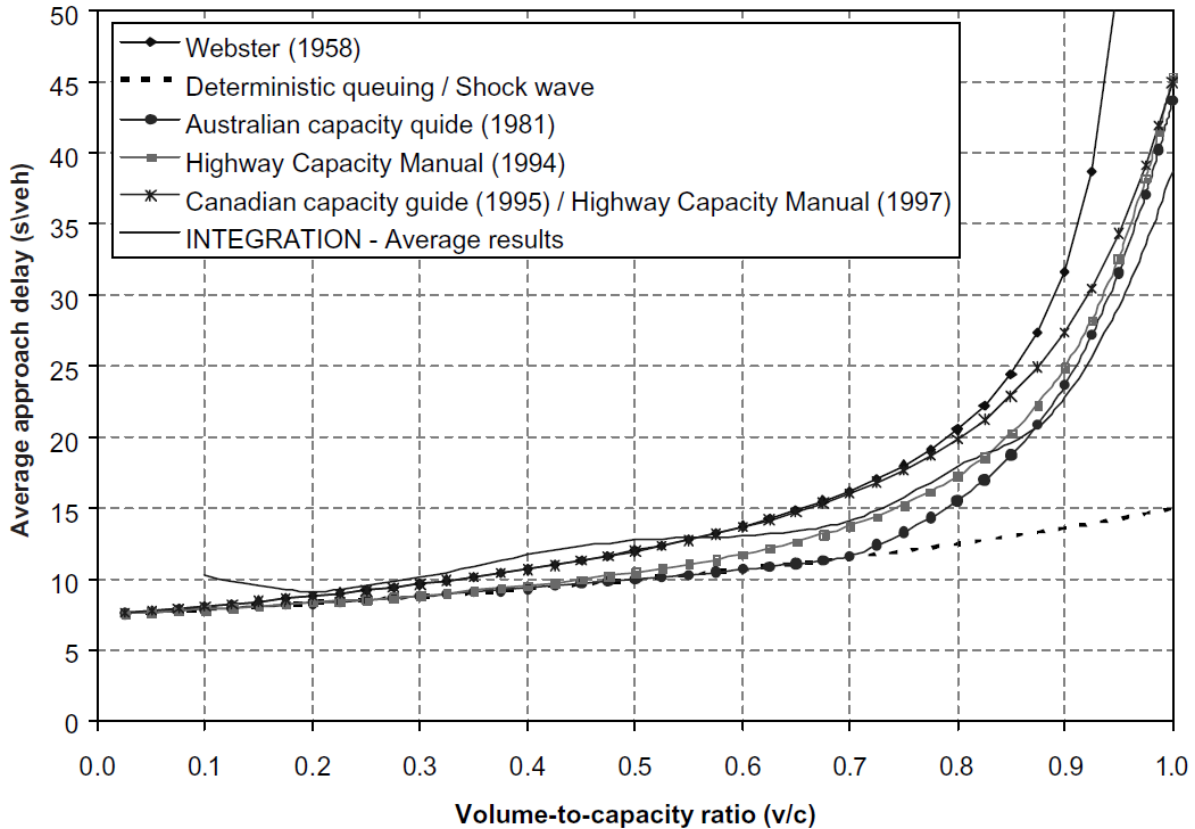
7.1 Sammenligning med litteratur og undersøkelser

Datagrunnlaget hentet fra signalanlegget viste en tidsluke for den mettede køen på 2,15 sekunder inkludert en tapt tid på 1,0 sekunder for de første fire kjøretøyene. Dette gir et metningsvolum på 1644 kjøretøy i timen. Dette resultatet er innenfor, men helt klart på den nedre delen av skalaen, ved sammenligning med internasjonal litteratur som Highway Capacity Manual (2010), Shao & Liu (2012) og Jie et al (2012). Nasjonalt samsvarer resultatet godt med undersøkelser presentert av Aakre, E. H. (2015).

Videre ble den observerte forsinkelsen estimert til 27,3 sekunder i signalanlegget. Den simulerte forsinkelsen samsvarte med dette ved en reaction time på 1,70 sekunder som er innenfor det intervallet på 1,2 til 1,8 sekunder som av Aakre, E. H. (2015) blir sagt å passe best med observasjoner i Norge. Simuleringsresultatet fra figur 30, side 57, ser også ut til å stemme godt overens med figur 35 på neste side som viser forsinkelse som funksjon av metningsgrad.

En *reaction time* på 1,70 sekunder viste seg å gi en god tilnærming til forsinkelsen i rundkjøringen før kalibrering av *gap-acceptance model*. Dette indikerer at denne parametren også burde kunne gi riktig forsinkelse i vikeplikt-krysset ved kalibrering av *gap-acceptance* parametrene.

For rundkjøringen ble det funnet en kritisk tidsluke på 3,4 sekunder og en følgetid på 2,4 sekunder. Dette viser seg å stemme godt overens med undersøkelser gjort på andre rundkjøringer i Norge (Alstad, 2012 og Myre, 2010), og indikerer at trafikkavviklingen i den registrerte rundkjøringen er som forventet. Highway Capacity Manual (2010) har en oppgitt basisverdi på 4,1 til 4,6 sekunder som kritisk tidsluke i rundkjøring.



Figur 35 - Forsinkelse i signalanlegg som funksjon av metningsgrad. Hentet fra Dion et al (2004)

For vikeplikt-krysset ble det registrert en forsinkelse på 48,5 sekunder i gjennomsnitt for venstresvingen. Dette er en høy forsinkelse som tyder på at denne svingebevegelsen er helt opp mot kapasitetsgrensen. Simuleringer i Aimsuns mesomodell ga en forsinkelse på 12,4 sekunder med definert *reaction time* på 1,70 sekunder og standardverdier for *gap-acceptance model*. Selv med reaksjonstidsparametre som beskriver riktig forsinkelse i signalanlegget er dette langt fra den observerte forsinkelsen for venstresvingen i vikeplikt-krysset.

Følgetiden i vikeplikt-krysset ble beregnet til 3,4 sekunder og kritisk tidsluke til 4,1 sekunder med Sieglochs metode. Den beregnede kritiske tidsluken med Sieglochs metode er her noe lavere enn 5,5 sekunder som brukes som standard for venstresving inn på hovedveg fra Statens Vegvesen (1985). Brukes derimot tommelfingerregelen om at følgetiden er rundt 60 % av den kritiske tidsluken vil dette gi en kritisk tidsluke på omtrent 5,7 sekunder ut i fra beregnet følgetid. Dette stemmer veldig godt med standardverdiene brukt av Statens Vegvesen (1985). Den amerikanske Highway Capacity Manual (National Research Board, 2010) opererer med en kritisk tidsluke på 7,1 sekunder som basis for venstresving ut på hovedveg før videre korreksjoner kan påføres.

Disse anbefalte basisverdiene fra Highway Capacity Manual og Statens Vegvesen sammen med de målte verdiene for kritisk tidsluke med 60 % av følgeriden er alle innenfor intervallet laget av *initial* og *final safety margin*. Tabell 18 viser de målte kritiske tidslukene og basisverdier eller annet sammenligningsgrunnlag for de ulike svingebevegelsene. Målingene fra Myre (2010) er brukt til å lage et intervall for kritisk tidsluke i rundkjøring siden dette ikke oppgis i håndbok 127 fra Statens Vegvesen (1985)

Tabell 18 - Sammenligning av initial og final safety margin med ulike målinger for kritisk tidsluke

Krysstype og svingebevegelse	Intervall mellom <i>initial</i> og <i>final safety margin</i> [s]	Oppgitte verdier fra Highway Capacity Manual (2010) [s]	Norske verdier fra Statens Vegvesen (1985) og Myre (2010) [s]
Venstresving inn på hovedveg	[5,0 – 9,0]	7,1	5,5
Rundkjøring	[2,0 – 6,0]	[4,1 – 4,6]	[3,1 – 3,8]

7.2 Sammenligning med SIDRA INTERSECTION 6.1

SIDRA INTERSECTION 6.1 er et analytisk beregningsprogram for enkeltkryss, eller små nettverk av trafikkkryss. For kryss med definert vikeplikt er det flere ulike vikepliktmodeller å velge mellom, men alle baserer seg på teori om kritisk tidsluke og følgerid (Akçelik, 2007). For beregningene i SIDRA INTERSECTION 6.1 ble de ulike kryssene bygget opp geometrisk riktig og med inngangsdata basert på observasjoner der det var mulig.

Den beregnede forsinkelsen i signalanlegget ble 24,8 sekunder. Her var signalanlegget bygget opp med samme signalplan som i virkeligheten og Aimsun. I tillegg var volumet definert over den observerte perioden med en *peak flow factor* på 95 % og en *peak flow period* på 5 minutter.

For rundkjøringen ble *peak flow factor* satt til 75 % for den studerte svingebevegelsen og 95 % for de andre svingebevegelsene. *Peak flow period* på 5 minutter ble satt for alle svingebevegelsene. Dette ble gjort for prøve å få med den store variasjonen i ankomster for den

studerte svingebevegelsen. *Environment factor* ble satt til 1,10 som er anbefalt for norske rundkjøringer. Med videre standard parametre og innstillinger for *gap-acceptance model* ble forsinkelsen beregnet til 33,8 sekunder som også inkluderer geometrisk forsinkelse. Med den observerte følgetiden og kritisk tidsluken ble den beregnede forsinkelsen litt lavere med 26,7 sekunder inkludert geometrisk forsinkelse.

For vikeplikt-krysset ble *peak flow factor* satt til 95 % og en *peak flow period* på 15 minutter for å replisere trafikkfordelingen over observasjonsperioden. Med standardinnstillingene for *gap-acceptance* og *TWSC-calibration* ga dette overmetning i venstresvingen og en forsinkelse på over fem minutter. Med den observerte følgetiden på 3,4 sekunder og tommelfingerregelen som gir kritisk tidsluke på 5,7 sekunder gir dette med ellers samme innstillinger også overmetting og en forsinkelse på rett over fire minutter.

Ut fra disse resultatene ser en at SIDRA INTERSECTION 6.1 beregner svært høy forsinkelse i venstresvingen ut på hovedveg i vikeplikt-krysset. Dette er motsatt fra Aimsuns mesomodell som beregner en veldig lav forsinkelse for samme svingebevegelse med sine standardparametre. Dette indikerer videre at Aimsuns mesomodell simulerer for kort forsinkelse for denne typen svingebevegelser som har en lang kritisk tidsluke. Resultatene fra SIDRA INTERSECTION 6.1 peker på at denne svingebevegelsen er svært nær en metningsgrad på 1,0 og en økt trafikk vil trolig påvirke forsinkelsen betraktlig.

7.3 Svakheter og begrensninger

Den største svakheten med analysen er det begrensede datagrunnlaget. Det er kun analysert en enkelt type av de ulike kryssene i makstimen for en enkelt dag. Grunnen til dette er tidsbegrensning da det tar lang tid å både samle inn data, men spesielt å redigere og analysere datagrunnlaget. Med ubegrenset tid ville det vært hensiktsmessig å ta med flere vikeplikt-kryss og rundkjøringer for å ha et større datagrunnlag å bygge kalibreringsprosessen og parameterstudiet på. Flere ulike signalanlegg på ulike tidspunkt kunne også gitt en bedre gjennomsnittsverdi for metningsvolum som igjen kunne gitt et bedre datagrunnlag å bestemme reaksjonstidene ut i fra.

Videre er hele datagrunnlaget innsamlet i Trondheim, noe som gjør at det er vanskelig å generalisere resultatene fra analysene til å gjelde for andre områder. Erfaring tilsier at det er stor forskjell i trafikkadferd mellom ulike geografiske steder og med kun lokale data kan ikke analysene gjøre annet enn å indikere hvilke parametre som passer best for de forholdene som

faktisk er observert. Likevel er det verdt å merke seg at forskjellen mellom kjøreadferd i Spania og resten av Norge nok er mye større enn Trondheim og resten av Norge.

Ved å kun studere og analysere en enkelt av hver krysstype vil også spesielle forhold med det observerte krysset påvirke resultatet i stor grad. Ved utvelgelsen av kryssene ble det satt flere kriterier for å unngå mange spesielle forhold, men ingen kryss er helt like og det er også flere elementer i trafikknnettverket i nærheten til kryssene som påvirker. Alt fra geometrisk oppbygging, siktforhold og værforhold under registreringsperioden påvirker trafikken og dermed analysene som er gjort i denne oppgaven.

For vikeplikt-krysset er det et fotgjengerfelt over rampen som går inn på hovedvegen. Fotgjengertrafikken var svært liten og hadde trolig ikke stor betydning for forsinkelsen, men observasjoner viste at bilistene varierte med å stille seg over fotgjengerfeltet og bak fotgjengerfeltet da de ventet på en akseptbar luke i trafikkstrømmene med forkjøringsrett. Dette er et lokalt forhold som er spesielt for dette vikeplikt-krysset og kan påvirke kalibreringen av parametrene siden kjøretøyene hadde ulik avstand til stopplinjen. For kjøretøy som skulle til venstre i dette krysset var det også en alternativ mulighet å svinge til høyre og snu i en rundkjøring ikke langt unna. Dette gjorde at enkelte av de som visste om denne muligheten skiftet felt ut fra køen i venstrefeltet etter en tidsperiode for å ta den lengre vegen, men som mest sannsynlig ville ta mindre tid på grunn av kø i venstre svingefelt. Dette påvirket registreringen av kølengden, men var begrenset til et lavt antall kjøretøy.

I rundkjøringen var det et par kjøretøy inne i sirkuleringsområdet som valgte å vike for å slippe inn kjøretøy fra den studerte svingebevegelsen fra Fylkesveg 715 da køen her var på sitt lengste. Dette gjorde at det i enkelte situasjoner ble et samarbeid mellom bilistene og at ikke vanlige trafikkregler ble fulgt. Dette var kun i svært begrensede tidsperioder og var kun for å slippe ut 3-4 kjøretøy, men vil fortsatt påvirke den totale trafikkavviklingen. Dette er et eksempel på lokale forhold som er svært vanskelig å simulere siden det ikke følger de definerte trafikkreglene. Rundkjøringen hadde også den svakheten at to av armene gikk i tunnel. På grunn av dette var det ikke mulig å observere kølengde i disse armene og den mest trafikkerte armen uten tunnel ble valgt til objekt i analysen. Hvis flere av armene der det oppsto kø var observerbare ville det vært mulig å hente inn data om forsinkelse også på disse for å bruke til kalibrering og dermed øke datagrunnlaget uten å registrere flere rundkjøringer.

Signalanlegget som ble studert var kjøretøystyrt, noe som betyr at det ikke hadde fast omløpstid eller fasetid. På grunn av dette ble gjennomsnittsverdier brukt til å estimere forsinkelsen. Videre ble det kun brukt 10 omløp til å bestemme mange av parametrene til å estimere forsinkelsen. Håndbøker som Highway Capacity Manual (2010) anbefaler dette til et estimat, men flere omløp vil gi bedre og mer nøyaktige resultater. Det finnes også mange forskjellige metoder til å beregne forsinkelse i signalanlegg. I denne oppgaven ble Akçelik (1988) sin generaliserte metode valgt. Det finnes flere ulike metoder, også formler som ikke tar med *overflow delay* som ville gitt en mindre forsinkelse. Grunnen til at *overflow delay* ble tatt med her var at metningsgraden på signalanlegget var over 0,8 gjennom registreringsperioden.

En begrensning ved analysene gjort i denne oppgaven er at det ikke er tatt hensyn til siktparametrene i Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model*. Det er kun brukt standardinnstillingene for disse parametrene. Siktparametrene *look-ahead distance* og *visibility along main stream* bestemmer henholdsvis hvor tidlig *gap-acceptance model* skal begynne å søke etter kjøretøy med forkjørsrett og hvor langt oppstrøms det skal søkes i strømmen med kjøretøy med forkjørsrett. Dette er parametre som påvirker forsinkelsen til en viss grad og det er derfor viktig å påpeke at analysen er begrenset siden siktparametrene ikke er tatt med.

Antall simuleringsreplikasjoner ble satt på bakgrunn på simuleringsresultater med standardparametrene som utgangspunkt. Gjennom kalibreringen ble disse parametrene kalibrert slik at den simulerte forsinkelsen økte. Med økt gjennomsnittsverdi for simulert forsinkelse kan det også forventes en økning i standardavviket på denne målingen. Det kan derfor ikke med 95 % eller større sikkerhet slås fast at resultatet for simulert gjennomsnittsforsinkelsen har en mindre feil enn 1,0 sekund for alle gjennomsnittresultatene.

I forrige delkapittel ble resultatene sammenlignet med det analytiske beregningsprogrammet SIDRA INTERSECTION 6.1. Den største begrensningen i dette programmet sett i forhold til meso-simulering i Aimsun er hvordan trafikken varierer over tid. Trafikken i SIDRA er satt for hele tidsperioden som konstant og varierer med *peak flow period* og *peak flow factor* som lager en fordeling i trafikken med en topp. Dette gir oftest veldig gode tilnærminger for beregning, men for spesielle situasjoner som i rundkjøringen der ferjetrafikken på nesten 30 kjøretøy kom over en 2-minutters periode gir ikke denne metoden gode nok tilnærminger. Dette er en av forskjellene som gjør at sammenligning mellom de to programmene kan være preget av begrensninger og ikke alltid være riktig.

8. Konklusjon, anbefalinger og videre arbeid

Dette kapittelet oppsummerer resultatene sammen med diskusjonen og sammenligningene gjort i forrige kapittel. Problemstillingen definert i rapportens formål vil besvares på grunnlag av simuleringresultatene fra parameterstudien og det vil gis noen anbefalinger basert på indikasjoner fra studien. Avslutningsvis diskuteres det videre arbeid som er interessant å gjøre innenfor *gap-acceptance model* og kalibrering i Aimsuns mesomodell.

8.1 Oppsummering og konklusjon

Analysen av innsamlet data viste at det var en målbar gjennomsnittlig forsinkelse i alle de studerte svingebevegelsene. Resultatene for mettet tidsluke og metningsvolum fra disse analysene viste seg å stemme godt med andre undersøkelser som diskutert i forrige kapittel. Simuleringen av signalanlegget ga også en *reaction time* som var innenfor det forventede området. Alt dette tyder på at de utvalgte svingebevegelsene og kryssene de er en del av oppfyller kriteriene som var satt som krav i kapittel 4.

Simuleringen av rundkjøringen med den definerte *reaction time* ga simulert forsinkelse som kun var rundt 4 sekunder lengre enn observert forsinkelse før kalibrering av *gap-acceptance model*. Kalibreringen av parametrene i *gap-acceptance model* viste at *final safety margin* på 2,0 sekunder med *initial safety margin* på 5,0 eller 6,0 ga gode tilnærminger til den observerte forsinkelsen. Videre kunne begge disse kombinasjonene finjusteres til å samsvare med observert forsinkelse ved bruk av *give way time factor*.

For vikeplikt-krysset ga mesosimuleringen en forsinkelse som var over 35 sekunder kortere enn den observerte forsinkelsen med den definerte *reaction time* for signalanlegget. Kalibrering av *gap-acceptance model* viste at både *initial* og *final safety margin* måtte oppjusteres i tråd med verdien målt for kritisk tidsluke for å oppnå virkelighetsnær forsinkelse. Verdier på 8,0 og 9,0 sekunder for *initial safety margin* med *final safety margin* på 5,0 sekunder ga gode tilnærminger som kunne enkelt finjusteres til å samsvare med observert forsinkelse gjennom *give way time factor*.

Det ble ikke funnet et enkelt parametersett som beskriver riktig forsinkelse i de ulike svingebevegelsene. Standardverdiene for *maximum give way time* og *give way time factor* er gode utgangspunkt til videre kalibrering, men sammen med *initial* og *final safety margin* kan ikke ett sett med disse parametrene beskrive riktig forsinkelse i de ulike svingebevegelsene som

er undersøkt. Resultatene peker på at dette er på grunn at de ulike svingebevegelsene som er studert har stor forskjell i målt kritisk tidsluke.

8.2 Anbefalinger

Med bakgrunn i dette og sammenligningene gjort i forrige kapittel indikerer resultatene fra venstresvingen ut på hovedveg i vikeplikt-krysset at standardverdiene i Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model* ikke produserer simulerte resultater som er i samsvar med virkeligheten for denne typen svingebevegelser. Parameterstudien peker på at verdiene for *initial* og *final safety margin* i Aimsuns mesomodell burde settes rundt en målt eller estimert kritisk tidsluke for svingebevegelsen som vist i tabell 18.

På bakgrunn av egne undersøkelser om kritisk tidsluke, lignende målinger (Myre, 2010 og Alstad, 2012) og retningslinjer (National Research Board, 2010 og Statens Vegvesen 1985) kan følgende verdier for *initial* og *final safety margin* i tabell 19 gi en bedre tilnærming til simulert forsinkelse for norske forhold enn standardverdiene i mesomodellen til Aimsun. Merk at det er kun svingebevegelse for rundkjøring og venstresving ut på hovedvei som er studert i analysen, men at indikasjonen på at verdier av *initial* og *final safety margin* rundt en estimert kritisk tidsluke vil gi en god tilnærming til simulert forsinkelse brukes for høyresving ut på hovedveg og venstresving av hovedveg. Disse verdiene burde justeres opp ved høyere hastigheter enn 50 km/t og for veger med flere felt som det også gjøres i Håndbok 127 (Statens Vegvesen, 1985)

Tabell 19 - Anbefaling til *initial* og *final safety margin*

Svingebevegelse	<i>Initial safety margin [s]</i>	<i>Final safety margin [s]</i>
<i>Rundkjøring</i>	6,0	2,0
<i>Venstresving ut på hovedveg</i>	8,0	5,0
<i>Høyresving ut på hovedveg</i>	7,0	4,0
<i>Venstresving av hovedveg</i>	6,0	2,0

8.3 Videre arbeid

Videre undersøkelser må gjennomføres for å bekrefte indikasjonene og anbefalingene gitt i forrige kapittel. Det er spesielt et interessant problem for Aimsuns dynamiske rutevalg, da store mesomodeller oftest kalibreres kun med globale parametre og med trafikkvolum som viktigste trafikkdata. Uten å kalibrere de lokale parametre for ulike svingebevegelser i kryss med vikeplikt indikerer resultatene fra parameterstudiet at svingebevegelser med høy kritisk tidsluke vil få for lav simulert forsinkelse og dermed påvirke rutevalget.

Svingebevegelser som ikke er studert, høyresving inn på hovedveg og venstresving av hovedveg, kan det også gjøres videre arbeid på for å se om indikasjonene fra analysen av de studerte svingebevegelserne også gjelder for disse andre. Det ville da vært interessant å se om de anbefalte verdiene for *initial* og *final safety margin* gir en bedre tilnærming enn standardverdiene for et større datasett med alle de ulike typene svingebevegelserne.

Det hadde også vært interessant å se på automatisk måte å justere *initial* og *final safety margin* ut i fra svingebevegelsernes egenskaper. I et stort nettverk vil det være flere tusen svingebevegelser og lite hensiktsmessig å endre alle manuelt til anbefalte verdier. Anbefalingene som de står nå er nok mer aktuelle å bruke på viktige vikeplikt-kryss som en vet opplever kø for venstresving inn på hovedveg.

SIDRA INTERSECTION 6.1 bruker en utviklet metode, «Two-Way Sign Control Calibration», til å estimere en kritisk tidsluke og følgetid basert på blant annet kryssets og svingebevegelsernes geometri og regulering. En lignende funksjon i Aimsun ville gjort det mulig å bestemme bedre standardverdier for ulike svingebevegelser basert på blant annet lengden på svingebevegelse, kryssets geometri, samt antall og fartsgrense på kryssende trafikkstrømmer. Dette vil i følge resultatene fra denne parameterstudien gi en bedre tilnærming til simulert forsinkelse enn standardparametrene. Videre arbeid på en slik funksjon, muligens gjennom et Python-script, ville det vært interessant å sett på mulighetene for å utarbeide.

9. Avslutning

Dette kapittelet inneholder personlige erfaringer med arbeidet med masteroppgaven gjennom prosessrapporten og den vitenskapelige artikkelen. Kapittelet omhandler kun arbeidsprosessen og ikke faglig innhold.

Jeg bestemte meg allerede ved oppstart av masteroppgaven å skrive en to-delt oppgave med både prosessrapport og artikkel. Med støtte i arbeidet som ble gjennomført i prosjektoppgaven i høstsemesteret 2015 var bakgrunnen og delvis formålet med oppgaven allerede definert. Dette gjorde det lettere å vite omfanget av oppgaven på et tidlig stadium og dermed muliggjorde det planlegging av de ulike arbeidsoppgavene som skulle gjennomføres. Prosessen med å skrive en vitenskapelig artikkel til Aimsuns brukerkonferanse var både motiverende og interessant.

Datainnsamlingen ble litt forsinket i forhold til den opprinnelig planen på grunn av en snørik vinter og kalde perioder ut over tidlig vår som gjorde at snøen lå lenge. Video-opptak ble gjort i midten av mars etter flere uker med observasjoner rundt aktuelle kryss i Trondheimsområdet. Tiden før dette brukte jeg på å videreføre litteraturstudiet og planlegge de ulike estimeringsmetodene for forsinkelse.

Gjennom arbeidet med masteroppgaven fikk jeg lenge urealistiske simuleringsresultater i vikepliktkrysset på grunn av en feil som er rettet opp i nyeste versjon av Aimsun. Dette førte til at simuleringsresultatene, diskusjonen og konklusjonen måtte revideres mot slutten av oppgaven for å få inn de riktige simuleringsresultatene fra den nyeste versjonen av Aimsun.

Jeg var forberedt for at analysen av innsamlet data ville ta lang tid siden det skulle gjøres manuelt. Spesielt tidkrevende var registrering av kølengde og data om tidsluker til estimering av kritisk tidsluke og følgetid. Jeg mener analysen ville vært bedre med et større datagrunnlag fra flere ulike svingebevegelser både i rundkjøring og fra vikepliktkryss. Det var dessverre en tidsbegrensning som gjorde at dette ble vanskelig med den sene oppstarten av datainnsamlingen. Jeg er takknemlig for råd fra Arvid Aakre og Erlend Hoksrud Aakre om å begrense oppgaven til å studere generelle svingebevegelser og dermed ta en av hver type. Dersom jeg skulle gjennomført datainnsamlingen på nytt ville jeg forsøkt å gjøre deler av datainnsamlingen på høsten slik at vintermånedene kunne bli brukt til å analysere en større mengde data til parameterstudien.

10. Referanser

- AAKRE, A. 2015. PowerPoint Presentation: Priority Intersections. Traffic Engineering Research Centre: Norwegian University of Science and Technology.
- AAKRE, E. H. 2015. AIMSUN - samling av forskningsnotater fra Trafikkteknisk senter i 2015. Mesomodellering i Aimsun. NTNU Traffic Engineering Research Centre.
- AKÇELIK, R. 1988. The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections. *ITE journal*, 58, 23-27.
- AKÇELIK, R. A review of gap-acceptance capacity models. 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR), University of South Australia, Adelaide, Australia, 2007.
- ALSTAD, S. R. A. 2012. *Modellering av rundkjøringer i AIMSUN*. Masteroppgave, Norwegian University of Science and Technology.
- BARCELÓ, J. 2010. *Fundamentals of Traffic Simulation*, Springer New York.
- BLAKSTAD, F. 1995. Anvendt statistikk for trafikkingeniører.
- BUISSON, C., DAAMEN, W., PUNZO, V., WAGNER, P., MONTANINO, M. & CIUFFO, B. 2014. Calibration and validation principles. *Traffic Simulation and Data*. CRC Press.
- CASAS, J., FERRER, J., GARCIA, D., PERARNAU, J. & TORDAY, A. 2010. Traffic Simulation with Aimsun. In: BARCELÓ, J. (ed.) *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer New York.
- CASAS, J., PERARNAU, J. & TORDAY, A. 2011. The need to combine different traffic modelling levels for effectively tackling large-scale projects adding a hybrid meso/micro approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 251-262.
- CIUFFO, B., CASAS, J., MONTANINO, M., PERARNAU, J. & PUNZO, V. 2013. Gaussian Process Metamodels for Sensitivity Analysis of Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2390, 87-98.
- DAAMEN, W., BUISSON, C. & HOOGENDOORN, S. 2014. Introduction. *Traffic Simulation and Data*. CRC Press.
- DION, F., RAKHA, H. & KANG, Y.-S. 2004. Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38, 99-122.
- FANG, F. C. & ELEFTERIADOU, L. 2005. Some guidelines for selecting microsimulation models for interchange traffic operational analysis. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 131, 535-543.
- GAZIS, D. C. 2002. *Traffic Theory*, Secaucus, NJ, USA, Kluwer Academic Publishers.

- GIPPS, P. G. 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15, 105-111.
- GIPPS, P. G. 1986. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20, 403-414.
- INSTITUTT FOR BYGG ANLEGG OG TRANSPORT 2013. Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved Institutt for bygg, anlegg og transport.
- JAKOBSEN, Ø. 2015. *Norges mest solgte biler* [Online]. Available: <http://www.klikk.no/motor/article1503725.ece> [Accessed 13. mai 2015].
- JIE, L., VAN-ZUYLEN, H. J., CHEN, Y. S. & LU, R. 2012. Comparison of driver behaviour and saturation flow in China and the Netherlands. *ET Intelligent Transport Systems*, 6, 318 - 327.
- LITTLE, J. D. C. & GRAVES, S. C. 2008. Little's Law. In: CHHAJED, D. & LOWE, T. J. (eds.) *Building Intuition*. Springer US.
- MYRE, H. K. 2010. *Praktisk uttesting av SIDRA for å vurdere kapasitets- og avviklingsforhold i rundkjøringer*. Norwegian University of Science and Technology.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL & TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2010. HCM 2010 : Highway Capacity Manual.
- SHAO, C.-Q. & LIU, X.-M. 2012. Estimation of Saturation Flow Rates at Signalized Intersections. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 9.
- STATENS VEGVESEN 1985. Kapasitet i kryss: Beregningsmetoder for ikke signalregulert kryss. In: VEGDIREKTORATET (ed.). Oslo, Norway.
- STATENS VEGVESEN 2007. *Handbook V322: Trafikksignalanlegg: Planlegging, drift og vedlikehold*, Norway, Vegdirektoratet.
- STATENS VEGVESEN 2016. Konkurransgrunnlag: Kjøp av konsulenttenester for etablering av Aimsun-modell for Trondheim. Doffin.
- TROUTBECK, R. & BRILON, W. 1997. Unsignalized intersection theory. *Traffic Flow Theory, TRB*, Revised Monograph on Traffic Flow Theory.
- TSS - TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS 2015. Aimsun 8.1 User's Manual. Barcelona, Spain.
- VEJDIREKTORATET 2010. *Trafikteknik: Anvendelse af mikro-simuleringsmodeller*, Denmark, Vejreglerådet.
- WINNIE, D., CHRISTINE, B. & SERGE, H. 2014. Introduction. *Traffic Simulation and Data*. CRC Press.

DEL II:
VITENSKAPELIG ARTIKKEL

CALIBRATION OF AIMSUN'S MESOSCOPIC GAP-ACCEPTANCE MODEL WITH DELAY TIME AS MEASURE OF PERFORMANCE

Torbjørn Hogstad Birkeland and Arvid Aakre
NTNU – Department of Civil and Transport Engineering

Abstract

Experience with mesoscopic traffic models in Norway suggests that the behaviour models used need to be calibrated in order to achieve a correct traffic assignment. This study gathered data from three separate intersections in Trondheim, Norway; a signalized intersection, a roundabout and a give-way ramp, in order to calibrate Aimsun's mesoscopic gap-acceptance model. Delay time was used as the measure of performance because of its importance in Aimsun's dynamic traffic assignment. The signalized intersection was used to find a global value for the Reaction Time that gave compliance with the estimated delay and saturation flow rate. This Reaction Time was then used as a basis when calibrating the gap-acceptance parameters in the roundabout and give-way ramp. The analysis suggests that the default gap-acceptance parameters simulate delay times very close to the observed values in the roundabout when the Reaction Time was defined. However, in the left turning in the give-way ramp with a larger measured critical gap, the default values for the Initial and Final Safety Margins simulated a too low delay time suggesting that these parameters should be set higher for turnings with a high estimated critical gap.

Keywords: Aimsun, Mesoscopic, Gap-acceptance model, Calibration, Delay time

1. INTRODUCTION

Mesoscopic traffic models are widely used to model large traffic networks with the advantage of a lower computation time compared to microscopic traffic models. This advantage is essential when several different route choices are available for each vehicle and the route choice is decided through an iterative dynamic traffic assignment, which is the case for Aimsun.

Experience from traffic models and literature such as Fang & Elefteriadou (2005), Casas et al (2010) and the Danish Road Administration (2010) establishes that traffic models must be calibrated for local traffic conditions and local driver behavior to produce useful simulation results. In 2010 the Norwegian Public Road Administration chose Aimsun from Transport Simulation Systems to be the main tool for mesoscopic traffic simulation in Norway. Tests and experience from Norway indicate that the standard parameters used in Aimsun's mesoscopic model need to be calibrated to produce correct route choices.

The most used measures of performance when calibrating traffic models are easily available traffic data such as traffic counts and speed measurements, in addition to data about traffic density (Buisson et al., 2014). Casas et al. (2010) states that the most exact calibration procedure is to calibrate the different behavior models, such as the gap-acceptance model, with accurate field data. However, this method is seldom conducted because it is time consuming and expensive, according to Casas et al. (2010).

The dynamic traffic assignment in Aimsun uses travel time as the main criteria when assigning routes to each vehicle. Travel time through a network are composed of two parts; travel time under free-flow conditions and delay time where vehicles are in queue or driving under the speed limit (Transport Simulation Systems, 2015). Most of this delay time are caused by intersections where vehicles of opposing traffic streams meet. These intersections are in Aimsun's mesoscopic model modeled either through the gap-acceptance model or with a signalized intersection. To be able to assign the correct route choice it is essential that the simulated delay time in intersections comply with observed values.

In this paper selected parameters of the behavior model, Aimsun 8.1.3's mesoscopic gap-acceptance model, will be calibrated using field data from three different intersections in Trondheim, Norway. The goal is to produce a set of parameters that accurately describe correct delay in the different types of turnings in the intersections. The measure of performance is the delay time for each studied turning movement. The three intersections studied are a signalized intersection, a roundabout and a ramp with defined give-way behavior.

2. METHODOLOGY

The methodology in this study is based on the calibration framework from Buisson et al. (2014) with delay time as the defined measure of performance. The goodness of fit measure is mean square error. The study limited itself to the following parameters affecting delay time in three studied intersections.

- Reaction Time and Reaction Time at Traffic Light
- Initial and Final Safety Margin
- Maximum Give-Way Time through Maximum Give Way Factor

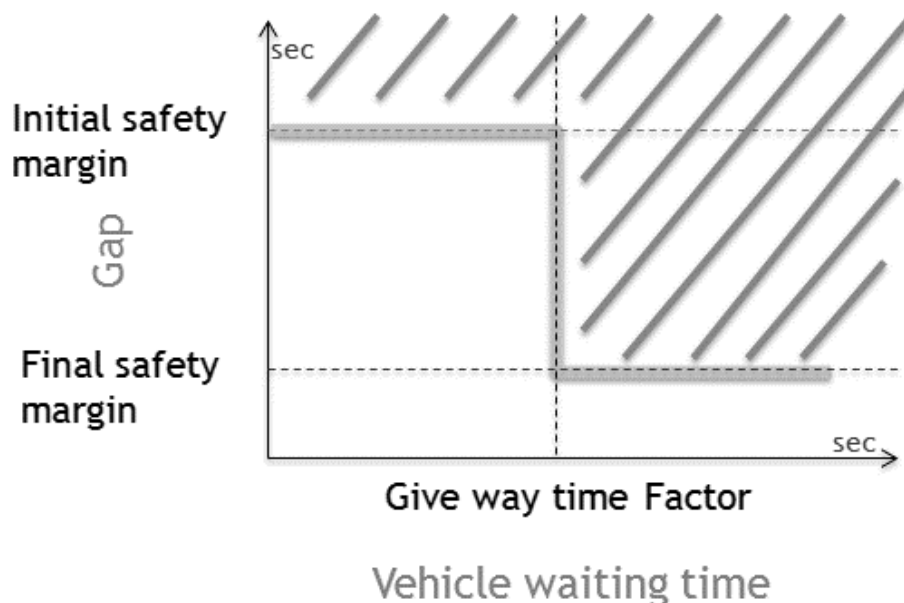


Figure 1 - Relationship between Initial and Final Safety Margin with Give-Way Time Factor from Transport Simulation Systems (2015)

The relationship between the Initial and Final Safety Margin with Give-Way Time is described in figure 1 from TSS (2015). Here the mesoscopic gap-acceptance model shows when the vehicles go from accepting an Initial Safety Margin to a Final Safety Margin. The safety margins used in the mesoscopic gap-acceptance model are relatable to the critical gap (t_c), as distinct from Aimsun’s microscopic gap-acceptance model (Aakre, E. H., 2015).

In addition to the parameters listed, Jam Density and Vehicle Length were modified to correspond with observed values. This was following the results of a sensitivity analysis by Cuiffo et al. (2013) that identified these two parameters as affecting simulation results. The study was further divided into the following four parts.

The first part consisted of data collection described in the following chapter. Secondly, the collected data was used to estimate the observed delay for the three studied turning movements in two different ways.

Little’s Law from Little & Graves (2008) was used to estimate an average delay time per vehicle in the roundabout and give-way ramp using the mean queue length and mean rate of arrival over the registration time period. The delay time in the signalized intersection was estimated with a generalized formula from Akçelik (1988), shown below with parameters in table 1. The calibration parameters were taken from the Highway Capacity Manual (2010). This method includes both the uniform delay and the overflow delay caused by random arrivals at the signalized intersection.

$$d = \frac{0,5 c (1 - u)^2}{1 - u x} + 900 T x^n \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{m(x - x_0)}{Q T}} \right]$$

Table 1 - Input parameters to Akcelic's (1988) generalized formula for delay time

d	Average overall delay
c	Cycle time
u	Ratio of effective green time to cycle time
x	Degree of saturation
T	Flow period in hours
n, m and x_0	Calibration parameters (2,4 and 0)
Q	Capacity in vehicles per hour

Siegloch’s method was used when estimating the follow-up time using the linear regression method described by Troutbeck & Brilon (1997). Only gaps where at least one vehicle was in queue for the studied turning were used in this estimation.

Thirdly, the number of simulations was decided through the framework of Buisson (2014). One second was the accepted error in the simulated delay and 5 % was the

significance level. The average of the calculated number of simulations would then have a 95 % probability of being within one second of the correct simulated delay. The highest number of simulations required to achieve this accuracy is used in all three studied intersections.

Lastly, the parameters were optimized through the following three-step algorithm suggested by Aakre E. H. (2015). The first step defined the measurable input-parameters, such as Vehicle Length and Jam Density, through observed values from the field. The second step calibrated the reaction time parameters in the signalized intersection through observed data to achieve compliance between simulated and observed delay. The last step was to use the already defined parameters in step one and two on the roundabout and give-way ramp to calibrate the Safety Margins and Maximum Give Way Time with the measured critical gap as a starting point.

3. DATA COLLECTION

The data was collected through video film from three intersections in Trondheim, Norway. The estimated delay, follow-up time and input parameters in the model are based on this collected data. The studied intersections, the turnings and registration period were chosen based on the following criteria to ensure applicable data to use in the calibration of the gap-acceptance model.

- At least one turning movement in the intersection must have an observable queue length caused by conflicting traffic streams.
- Queue from different intersection must not interfere with the traffic in the studied intersection, and the queue from the studied intersection must not interfere with other intersections.
- The intersection must have a standard geometry that makes it comparable to different intersections and turnings of the same type.

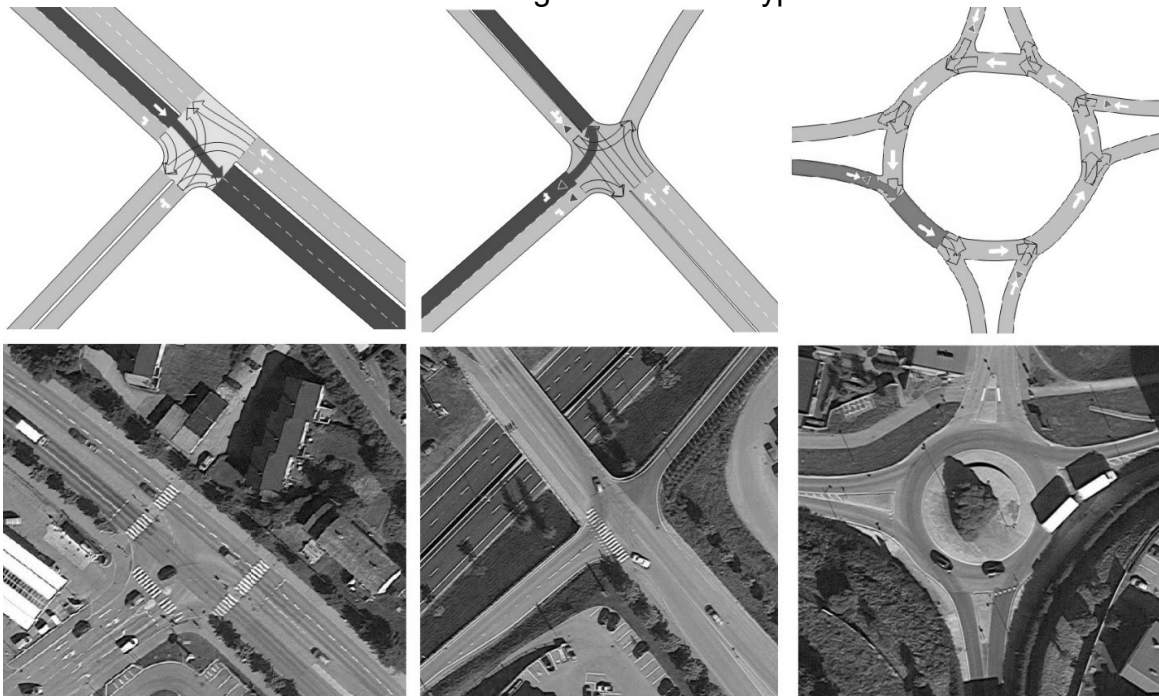


Figure 2 - Studied turning movements from the left: signalized intersection, give-way ramp and roundabout from Aimsun 8.1.3 and Google Earth.

In the signalized intersection the studied turning movement was the straight through movement from north-west to south-east. The observations were done in the afternoon during rush-hour to estimate the delay using data about the saturated time headway. This basic turning movement were chosen because it had consistent queues without being over-saturated during the observation period.

The studied turning in the give-ramp is the left turn from the south-west ramp onto the major road in north-west direction. This movement was chosen because observations showed consistent queues during the morning rush-hour without significant pedestrian influence and no interaction with queues from other nearby intersections. The traffic counts and traffic distribution in the give-way ramp is shown in figure 3.

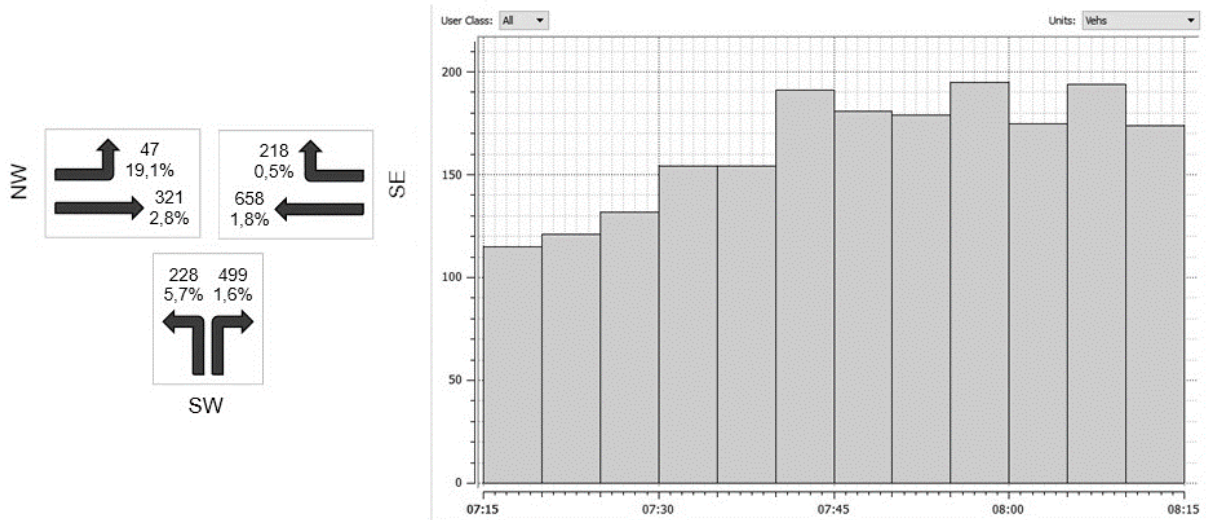


Figure 3 - Traffic counts and distribution for the observed hour in the give-way ramp

The west approach in the roundabout was studied in the afternoon rush-hour. The intersection was chosen because it had no pedestrian influence and a single circulation lane which simplified the gap-acceptance properties. The west arm is subject to platoons of a vehicles arriving from a nearby ferry landing. This property caused periodically large queues that formed and dissolved in the studied turning movement. The traffic counts and total traffic distribution are shown in figure 4.

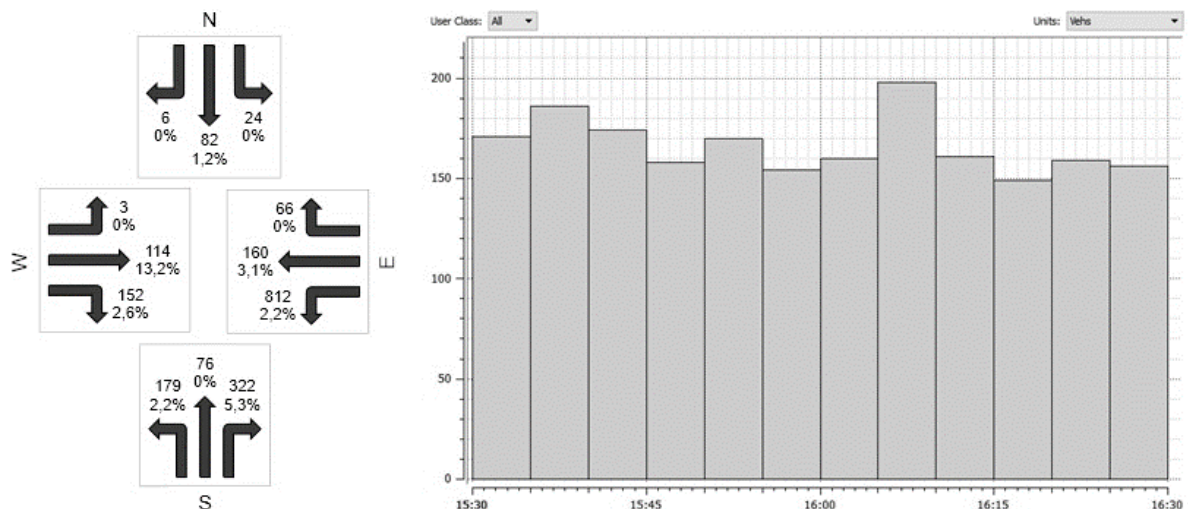


Figure 4 - Traffic counts and distribution for the observed hour in the roundabout

One hour of traffic data was registered at the roundabout and the give-way ramp. Traffic counts were done for all turning movements in five-minute intervals to ensure an accurate traffic distribution. In the roundabout, intervals down to two minutes were used to accurately describe platoons arriving from a nearby ferry dock. The queue lengths were registered each fifth second for the studied turn movements to give detailed data of the queue length over time. The follow up times were estimated using Siegloch's method described in Trout and Brilon (1997) when the studied turning had at least one vehicle in queue.

The observation time in the signalized intersection was twenty cycles with a mean cycle time of 98 seconds. The twenty cycles were used to estimate a lost time in the signalized intersection. The ten cycles with the longest saturated queues were used to find the degree of saturation following the method in the Highway Capacity Manual (2010). The observed data from the signalized intersection are found in table 3.

Table 2 - Observed phasing data and vehicle count in the signalized intersection

Measurement	Observed value
C – Mean cycle time	98 seconds
g_i – Mean effective green time	47 seconds
r_i – Mean effective red time	51 seconds
Number of light vehicles	351 vehicles
Number of heavy vehicles	6 vehicles

4. RESULTS

In the signalized intersection observations showed an average saturated time headway (h) of 2.15 seconds which equals a saturation volume of 1674 vehicles per hour. The average saturated time headway (h) includes all vehicles in the saturated queue from 1 to N, which includes lost time. These results gave an estimated delay time of 27.3 seconds using Akçelik's (1988) generalized formula. The lost time was estimated to approximately 1.0 second using the difference in average time headway for vehicle 1-4 and 5-N in the saturated queue. The maximum density registered in the studied turning movement in the signalized intersection was 130 vehicles/km.

Siegloch's method was used on over 100 observed gaps in each of the give-way turnings to estimate a follow up time. The critical gap was estimated through the approximation that the follow-up time is 60 % of the critical gap. This resulted in the following estimations of critical gap and follow-up times in table 3.

Table 3 - Critical gap and follow-up time for the give-way turnings

Intersection	Follow-up time (t_f)	Critical gap (t_c)
Give-way ramp	3.4 seconds	5.7 seconds
Roundabout	2.3 seconds	3.8 seconds

The queue lengths used to estimate the delay time from the give-way ramp and roundabout for the one-hour registration period are shown below in figure 5 and figure 6, respectively.

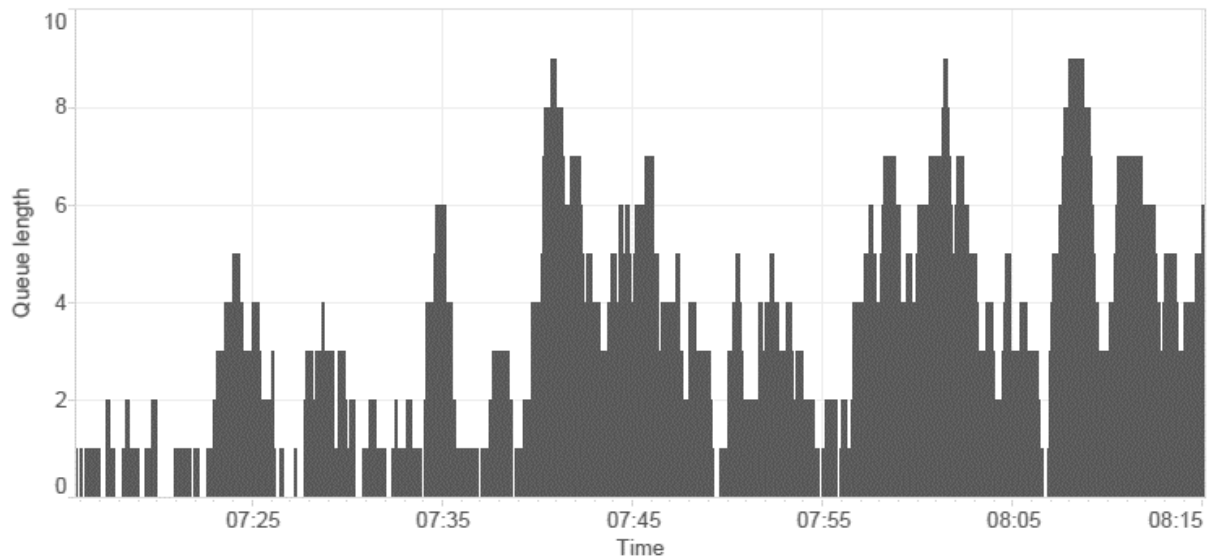


Figure 5 - Queue length over time in the studied turning movement in the give-way ramp

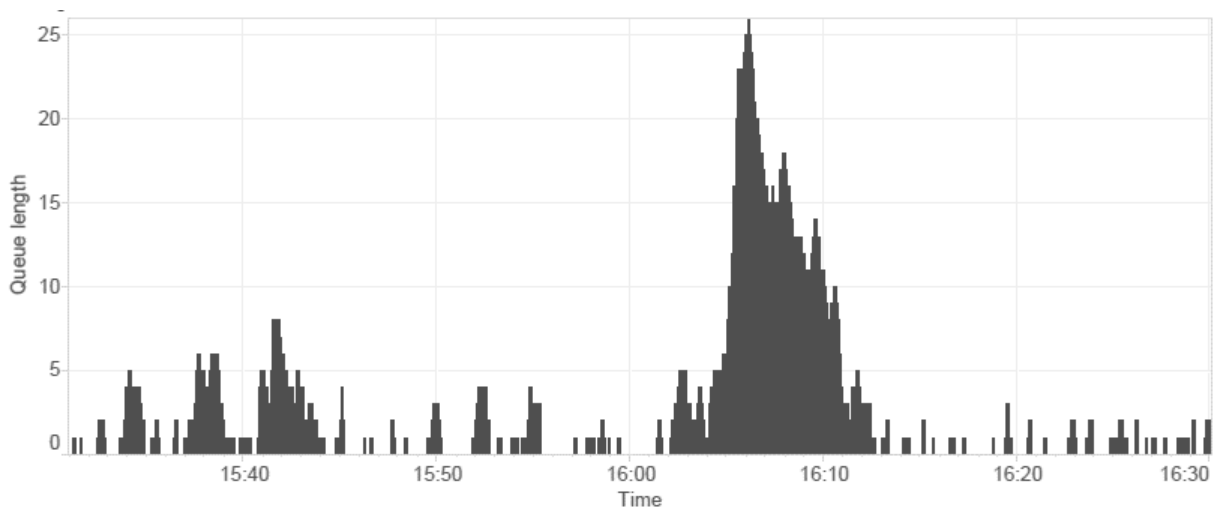


Figure 6 - Queue length over time in the studied turning movement in the roundabout

The mean queue length together with the mean rate of arrival for each turning gave 48.5 seconds average delay time in the give-way ramp and 32.0 seconds average delay time in the roundabout. The maximum observed density in the sections connected to the turnings were 130 veh/km on the give-way ramp and 135 veh/km into the roundabout. The observed maximum density was used as the jam density parameter on the section connected to the studied turning. The vehicle length was set to 4.4 meter with the default deviations to more accurately describe the Norwegian car fleet.

Using the framework from Buisson (2014) the results would be accurate within a 1.0 second error with 95 % probability with using the average of 26 simulations. This number of replications were used in all three intersections.

First the reaction times were decided by achieving similar observed delay and simulated delay in the signalized intersection. Reaction Time was changed by 0.05 second increments and Reaction Time at Traffic Light were Reaction Time plus 1.0 second to accurately describe the observed lost time. These simulations produced the following average simulated delay times shown in figure 7.

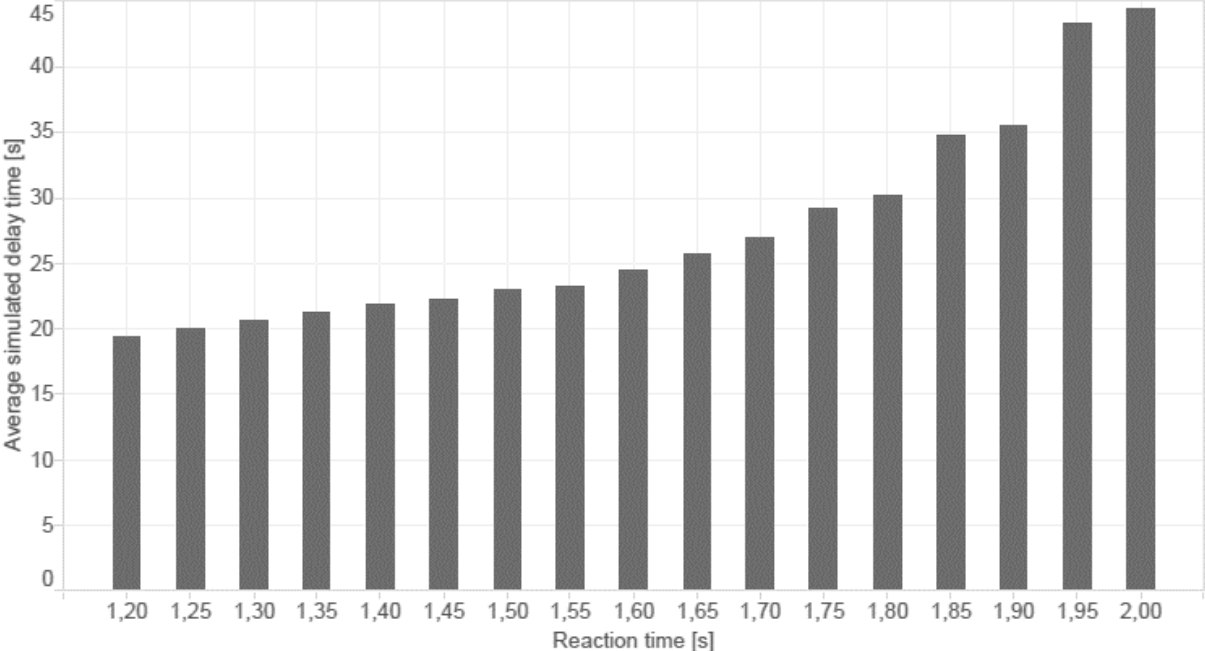


Figure 7 - Simulated delay time in the signalized intersection as a function of Reaction Time

The best compliance between simulated delay time and observed delay time was achieved with a Reaction Time of 1.70 seconds, where the simulated delay was 26.9 seconds compared to the observed 27.3 seconds. This reaction time value was used further on in the calibration of the gap-acceptance model in the give-way ramp and roundabout.

A mean simulated delay time of 35.8 seconds was produced in the roundabout with a Reaction Time of 1.70 seconds and default values in the gap-acceptance model. This is close to the observed delay of 32.0 seconds, but shows that calibration of the gap-acceptance model will generally produce a more accurate result. In the give-way ramp the same parameters gave a simulated delay of 12.4 seconds, which is much lower than the observed delay of 48.5 seconds.

In the give-way ramp simulations with the default Initial Safety Margin of 6.0 seconds gave delay times up to 40 seconds with Final Safety Margin also set to 6.0 seconds. The critical gap was measured to 5.7 seconds for this turning movement, which indicates that the Initial Safety Margin should be a bit higher to simulate the correct delay time. The Final Safety Margin was varied lower than the estimated critical gap and the Initial Safety Margin varied for values above the estimated critical gap to try to simulate a delay time that complied with the observed delay time. The Maximum Give Way Time was held constant and the results are illustrated in figure 8.

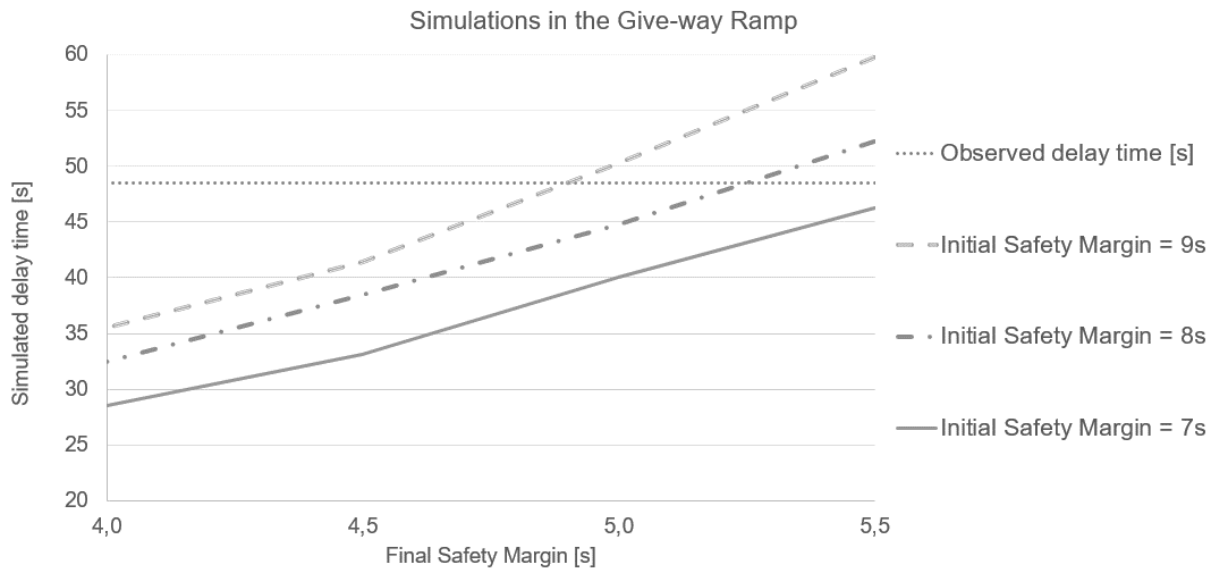


Figure 8 - Simulated delay time in the give-way ramp as a function of Final Safety Margin.

The simulated delay times in figure 8 suggests that a Final Safety Margin of approximately 5.0 seconds will give compliance with the observed delay by calibrating the Give Way Time Factor, using an Initial Safety Margin of 8.0 or 9.0 seconds.

In the roundabout the same analysis of the Initial and Final Safety Margin were done with base in the estimated critical gap. When calibrating the roundabout all turnings were adjusted simultaneously through assigning the parameters to the defined Road Type in the model. This was done because the circulation traffic stream is dependent on all of the turnings in to the roundabout. The Maximum Give Way Time was held constant, and the results are shown in figure 9.

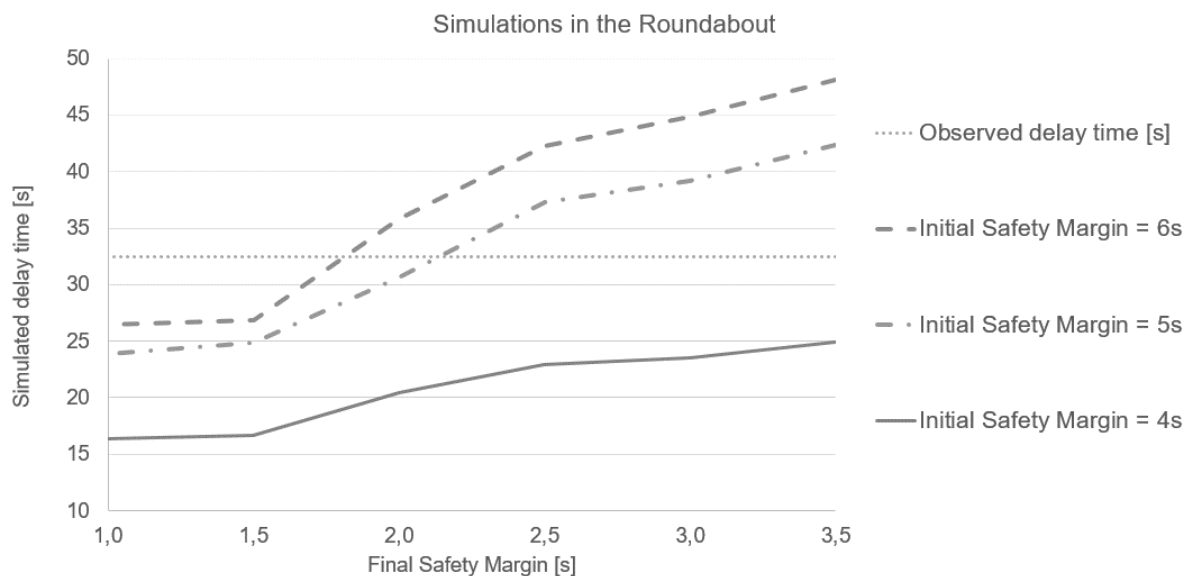


Figure 9 - Simulated delay time in the roundabout as a function of Final Safety Margin.

A Final Safety Margin of the default value 2.0 seconds give close to the observed delay when using an Initial Safety Margin of the default 6.0 seconds or 5.0 seconds. Further calibration of the Give Way Time Factor with these parameters are used in the next step of the analysis.

The Give Way Time Factor was adjusted to achieve compliance between simulated and observed delay times for the safety margins mentioned previously. The Give Way Time Factor was used instead of Maximum Give Way Time to affect both the vehicle class, *car* and *truck*, which both were used in the simulations with their default Maximum Give Way Time parameters. The different combinations that were calibrated are shown below in table 4.

Table 4 - Results from the calibration of the Give Way Time Factor

Intersection	Initial Safety Margin	Final Safety Margin	Give Way Time Factor	Simulated Delay Time
Give-way Ramp	8.0	5.0	1.30	48.6
Give-way Ramp	9.0	5.0	0.90	48.3
Roundabout	5.0	2.0	1.10	32.2
Roundabout	6.0	2.0	0.85	32.2

5. DISCUSSION

The focus on this study was to identify a set of parameters in Aimsun's mesoscopic model that could accurately describe delay for turning movements in intersections. The limited data basis from the field study of the signalized intersection gave results that is consistent with international and national observations on saturated flow (Shao & Liu 2012, Jie et al., 2012, Statens Vegvesen, 2007). Experience with the Aimsun's mesoscopic model in Norway suggests a Reaction Time between 1.2 and 1.8 to achieve compliance with observed capacities. The calibration with delay as measure of performance gave a Reaction Time of 1.7 second which indicate that this Reaction Time should be able to produce simulated delays that is consistent with observed delay where the gap-acceptance model is applied.

In the roundabout this indication turned out to be true. The simulated delay was close to the observed delay with default parameters, and only a small calibration of the Safety Margins or Give-Way Time Factor gave accurate simulated delay times. However, the studied left turning in the give-way ramp had a large deviation from the observed delay time and needed relatively large adjustments in the Initial and Final Safety Margin to give compliant delay times.

The main difference between the two give-way turnings studied, is that the turning in the give-way ramp must yield to multiple opposing turning movements and cross multiple lanes in the node. The studied turning movement in the roundabout only has one conflicting turning movement and merges into the same lane. This difference is reflected in the measured critical gap and follow-up time in the two different turnings. However, Aimsun uses the same default Initial and Final Safety Margin regardless of the length of the turning and the number of opposing movements the turning crosses.

There are multiple different combinations of parameters that achieve compliance between the simulated and observed delay times. The two combinations of the give-way turnings shown in table 4 indicate that the Initial and Final Safety Margin can be set based on measured or estimated critical gaps, and then tweaked with the Give Way

Time Factor. Estimates for critical gap can be measurements from local calibration or base values from research such as the Highway Capacity Manual (National Research Board, 2010) or Statens Vegvesen (1985). For the studied left turn in the give-way ramp the suggested critical gaps from these sources are 7.1 and 5.5 seconds, respectively. For the roundabout the critical gap is estimated to be in the interval between 4.1 and 4.6 seconds by the National Research Board (2010). All of these critical gaps are between the calibrated Initial and Final Safety Margin for both the left turning in the give-way ramp and the studied turning in the roundabout.

6. CONCLUSION

The research done on the mesoscopic gap-acceptance model in Aimsun 8.1.3 in this study indicates that the default gap-acceptance parameters give compliant simulated delay time in turnings with a relatively short measured critical gap value. However, in turnings with larger values of critical gap such as the left turn onto the major road further calibration of the Initial and Final Safety Margins are needed to accurately describe the delay time.

Measurements and base values of critical gaps are indicated to give good estimates of the Initial and Final Safety Margins in the studied turnings. The results from the field data suggest that the Initial Safety Margin could be raised up approximately 50 % above the critical gap, and the Final Safety Margin lowered down to between 10 % and 50 % below the critical gap. Fine tuning can be done with the Give Way Time Factor, and this factor will have a higher significance as the gap between the Initial and Final Safety Margin increase.

Further research must be done to study if the indication that turnings with high base values of critical gap are simulated with a too low delay time in Aimsun's mesoscopic model are true. A limiting factor in the study is that the visibility parameters Look-ahead Distance and Visibility along Main Stream were excluded from this gap-acceptance analysis. The data basis used in this study are limited both in terms of geography and number of studied turnings, but give interesting data to local calibrations.

7. BIBLIOGRAPHY

- AAKRE, E. H. 2015. AIMSUN - samling av forskningsnotater fra Trafikkteknisk senter i 2015. *Mesomodellering i Aimsun*. NTNU Traffic Engineering Research Centre.
- AKÇELİK, R. 1988. The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections. *ITE journal*, 58, 23-27.
- BUISSON, C., DAAMEN, W., PUNZO, V., WAGNER, P., MONTANINO, M. & CIUFFO, B. 2014. Calibration and validation principles. *Traffic Simulation and Data*. CRC Press.
- CASAS, J., FERRER, J., GARCIA, D., PERARNAU, J. & TORDAY, A. 2010. Traffic Simulation with Aimsun. In: BARCELÓ, J. (ed.) *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer New York.

- CIUFFO, B., CASAS, J., MONTANINO, M., PERARNAU, J. & PUNZO, V. 2013. Gaussian Process Metamodels for Sensitivity Analysis of Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2390, 87-98.
- FANG, F. C. & ELEFTERIADOU, L. 2005. Some guidelines for selecting microsimulation models for interchange traffic operational analysis. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 131, 535-543.
- JIE, L., VAN-ZUYLEN, H. J., CHEN, Y. S. & LU, R. 2012. Comparison of driver behaviour and saturation flow in China and the Netherlands. *ET Intelligent Transport Systems*, 6, 318 - 327.
- LITTLE, J. D. C. & GRAVES, S. C. 2008. Little's Law. *In: CHHAJED, D. & LOWE, T. J. (eds.) Building Intuition*. Springer US.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL & TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2010. HCM 2010 : Highway Capacity Manual.
- SHAO, C.-Q. & LIU, X.-M. 2012. Estimation of Saturation Flow Rates at Signalized Intersections. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 9.
- STATENS VEGVESEN 1985. Kapasitet i kryss: Beregningsmetoder for ikke signalregulert kryss. *In: VEGDIREKTORATET (ed.)*. Oslo, Norway.
- TROUTBECK, R. & BRILON, W. 1997. Unsignalized intersection theory. *Traffic Flow Theory, TRB*, Revised Monograph on Traffic Flow Theory.
- TSS - TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS 2015. Aimsun 8.1 User's Manual. Barcelona, Spain.
- VEJDIREKTORATET 2010. *Trafikteknik: Anvendelse af mikro-simuleringsmodeller*, Denmark, Vejregelrådet.

VEDLEGG

- Vedlegg 1 - Oppgavetekst
- Vedlegg 2 - Trafikktall for vikeplikt kryss og rundkjøring
- Vedlegg 3 - Trafikkfordeling for vikende og prioriterte strømmer
- Vedlegg 4 - Data om tidsluker fra signalanlegg på Nardo
- Vedlegg 5 - Data til beregning av kritisk tidsluke og følgetid
- Vedlegg 6 - Data om kjøretøylengde

Aimsun 8.1.3- og SIDRA INTERSECTION 6.1-filer av de studerte kryssene ligger vedlagt som digitale vedlegg gjennom innlevering i DAIM. Excelfiler om kølengde som er vist i figur 23 og figur 27 er også lagt med som digitale vedlegg.

Vedlegg 1 - Oppgavetekst

Vedlegg 1
Oppgavetekst

MASTEROPPGAVE

(TBA4945 TRANSPORT, masteroppgave)

VÅREN 2016
for
Torbjørn Hogstad Birkeland

Mesosimulering i Aimsun:
Parameterstudie for å bestemme riktig forsinkelse i kryss

BAKGRUNN

Trafikksimulering på mesoskopisk nivå er et nyttig planverktøy for å analysere rutevalg, avviklingsproblemer og alternative løsninger i større og kompliserte trafikknnettverk. Trafikksimuleringsprogrammet Aimsun er valgt som etatstandard for mesoskopisk trafikksimulering i Norge. Erfaringer med trafikkm modeller og flere undersøkelser slår fast at standardparameterne i de matematiske atferdsmodellene må kalibreres etter lokale trafikforhold og lokal kjøreatferd for å få riktige simuleringsresultater og rutevalg

Det har vært mest fokus på forskning med kalibrering av parametere på mikronivå fram til nå, men det er stadig flere mesomodeller som lages i Norge og det er dermed viktig å forske på effekten av parametere i de mesoskopiske modellene. De matematiske kjøretøysmodellene som bygger opp mesonivået i Aimsun er ulike fra de modellene som brukes på det mikroskopiske nivået og bruker andre parametre. Spesielt interessant er den simulerte forsinkelsen som i stor grad bestemmer rutevalget for mesosimulering.

OPPGAVE

Formålet med oppgaven er å kalibrere hovedparametrene som bestemmer forsinkelse i Aimsuns mesoskopiske *gap-acceptance model* med innsamlet data om forsinkelse i tre ulike krysstyper i Trondheimsområdet. Forsinkelse er valgt som resultatmål på grunn av at det er den viktigste faktoren i Aimsuns dynamiske rutevalg. Målet er å ende opp med et sett med parametre som gir riktig forsinkelse for de studerte svingebevegelsene.

Følgende problemstilling skal besvares med avgrensingen til parametrene nevnt ovenfor:

«Hvilke verdier for utvalgte parametre i Aimsuns mesomodell simulerer forsinkelsen for generelle svingebevegelser i kryss mest nøyaktig»

GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Masteroppgaven regnes ikke som ferdig levert før kandidaten har levert innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i Sentralbygg II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjennelse fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.

Opgaven er skrevet i samarbeid med Asplan Viak gjennom Asplan Viak-programmet 2015.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursionsjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til sonja.hammer@ntnu.no

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Arvid Aakre

Veileder (eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: Jenny Persson, Asplan Viak

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 10.01.2016, revidert 06.06.2016

Underskrift



Faglærer

Vedlegg 2

Trafikktall for vikeplikt kryss og rundkjøring

Vedlegg 2 - Trafikktall for vikepliktkryst og rundkjøring

Trafikktall fra vikepliktkryst på Tunga den 14.03.16 klokken 07:15 til 08:15

FRA		Trafikk fra Tungasletta			
TIL		E6		Rundkjøring	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	2	0	23	1
5	10	1	1	20	1
10	15	5	0	22	1
15	20	4	0	26	0
20	25	2	1	22	1
25	30	3	0	20	0
30	35	0	6	24	1
35	40	3	0	29	0
40	45	2	0	44	0
45	50	5	0	19	0
50	55	3	0	34	4
55	60	8	1	29	0
SUMMERT		38	9	312	9

FRA		Trafikk fra E6			
TIL		Tungasletta		Rundkjøring	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	28	0	24	3
5	10	18	2	32	0
10	15	24	1	32	0
15	20	19	2	37	1
20	25	12	2	34	1
25	30	13	1	53	1
30	35	15	1	46	0
35	40	11	1	45	1
40	45	18	2	41	0
45	50	17	0	52	0
50	55	24	0	51	0
55	60	10	1	44	1
SUMMERT		209	13	491	8

FRA		Trafikk fra rundkjøring			
TIL		E6		Tungasletta	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	12	0	22	0
5	10	8	0	37	1
10	15	12	0	35	0
15	20	17	0	46	2
20	25	14	0	64	1
25	30	27	0	70	3
30	35	20	0	66	2
35	40	21	0	67	1
40	45	26	0	62	0
45	50	22	0	59	1
50	55	22	0	56	0
55	60	16	1	62	1
SUMMERT		217	1	646	12

Vedlegg 2 - Trafikktall for vikepliktkryst og rundkjøring

Trafikktall fra rundkjøring på Ila den 15.03.16 klokken 15:30 til 16:30

		Fra Flakk					
		Til Byåsen		Til Norde avlast.		Til Mellomila	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	9	0	6	2	0	0
5	10	17	1	11	5	0	0
10	15	13	0	13	3	1	0
15	20	9	1	6	0	1	0
20	25	11	1	8	1	0	0
25	30	8	0	3	0	0	0
30	35	13	0	8	1	0	0
35	37	27	0	11	2	1	0
37	40	5	0	2	0	0	0
40	45	10	0	11	0	0	0
45	50	8	0	4	0	0	0
50	55	11	1	5	0	0	0
55	60	7	0	11	1	0	0
SUMMER		148	4	99	15	3	0

		Fra Nordre Avlastningsveg					
		Til Byåsvegen		Til Flakk		Til Mellomila	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	80	2	12	1	3	0
5	10	65	0	16	1	7	0
10	15	58	1	13	0	4	0
15	20	60	0	16	0	5	0
20	25	67	2	14	0	5	0
25	30	68	0	10	0	6	0
30	35	63	5	11	1	4	0
35	40	61	2	15	1	3	0
40	45	66	0	16	0	4	0
45	50	65	1	11	0	10	0
50	55	74	2	15	0	8	0
55	60	67	3	6	1	7	0
SUMMERT		794	18	155	5	66	0

		Fra Mellomila					
		Til Flakk		Til Byåsen		Til Nordre avlast.	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	3	0	3	0	4	0
5	10	0	0	7	0	1	0
10	15	2	0	7	0	1	0
15	20	0	0	3	0	2	0
20	25	0	0	10	0	0	0
25	30	0	0	7	0	1	0
30	35	1	0	7	0	2	0
35	40	0	0	5	1	5	0
40	45	0	0	12	0	4	0
45	50	0	0	6	0	2	0
50	55	0	0	7	0	1	0
55	60	0	0	7	0	1	0
SUMMERT		6	0	81	1	24	0

Vedlegg 2 - Trafikktall for vikeplikt kryss og rundkjøring

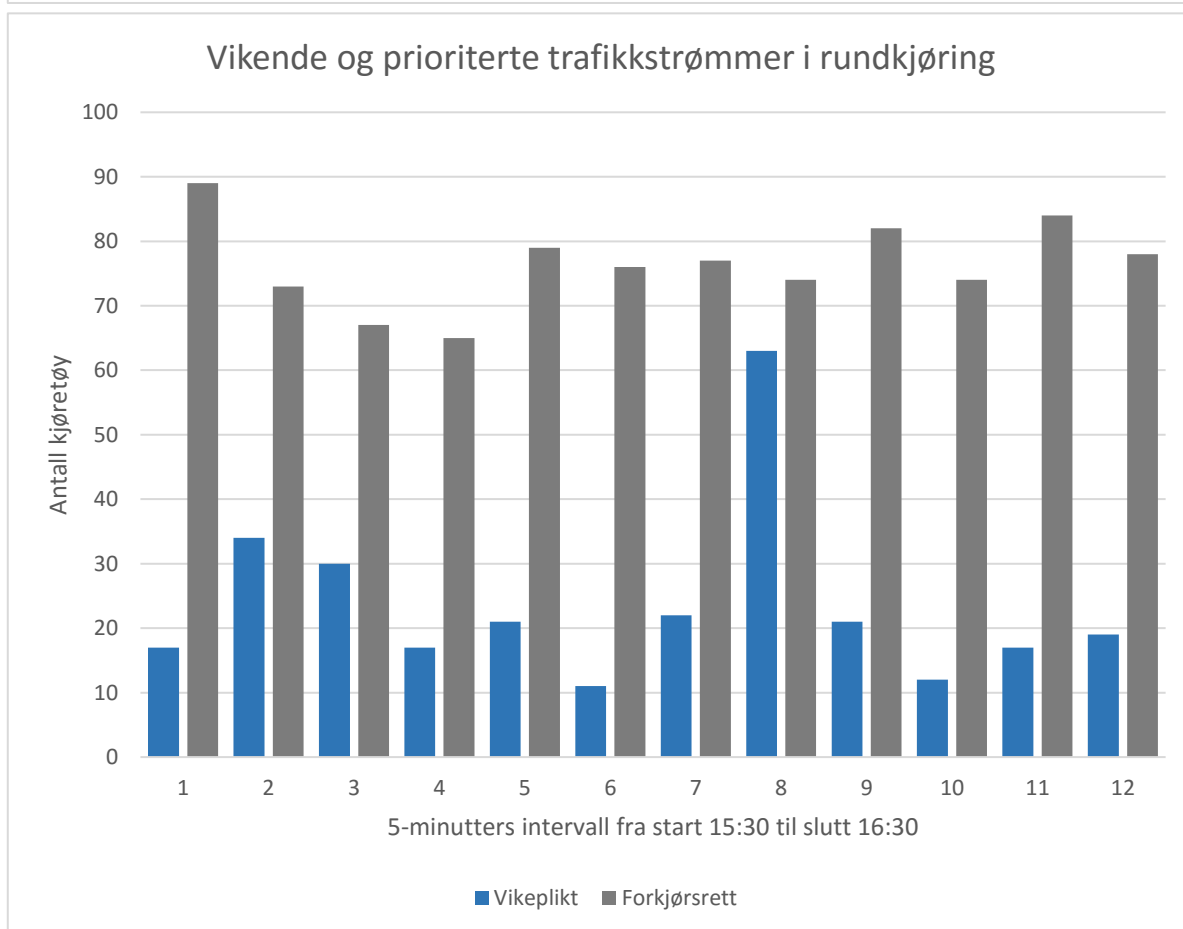
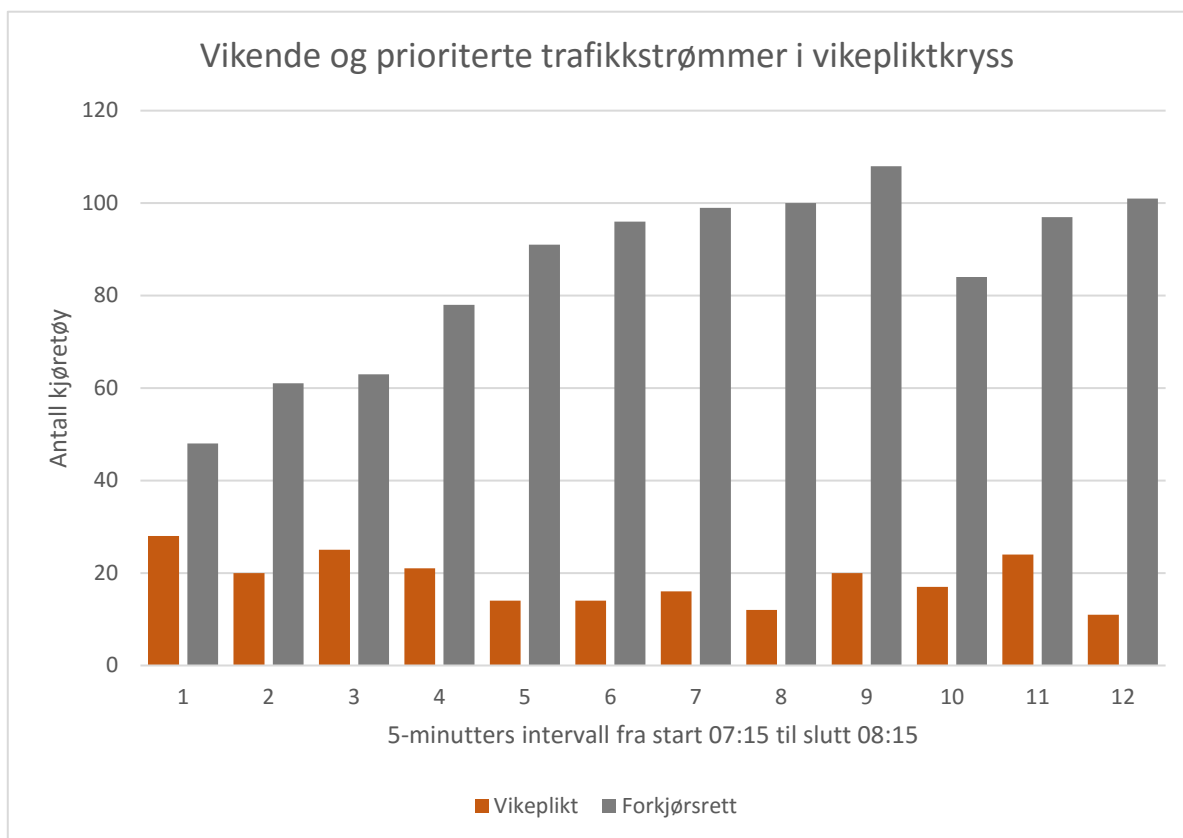
Trafikktall fra rundkjøring på Ila den 15.03.16 klokken 15:30 til 16:30

FRA		Fra Byåstunnelen					
TIL		Til Flakk		Til Mellomila		Til Nordre Avlast.	
Tid fra i min.	Tid til i min.	Lette	Tunge	Lette	Tunge	Lette	Tunge
0	5	9	0	1	0	32	4
5	10	18	0	7	0	28	2
10	15	17	1	9	0	29	2
15	20	24	0	5	0	26	0
20	25	11	0	9	0	29	2
25	30	16	1	8	0	25	1
30	35	11	1	3	0	26	3
35	40	18	0	8	0	31	0
40	45	10	1	10	0	17	0
45	50	18	0	3	0	20	1
50	55	12	0	10	0	13	0
55	60	11	0	3	0	29	2
SUMMERT		175	4	76	0	305	17

Vedlegg 3

Trafikkfordeling for vikende og prioriterte strømmer

Vedlegg 3 - Vikende og prioriterte trafikstrømmer



Vedlegg 4 – Data om tidsluker fra signalanlegg på Nardo

Vedlegg 4

Data om tidsluker fra signalanlegg på Nardo

Vedlegg 4 - Data om tidsluker fra signalanlegg på Nardo

Antall kjøretøy i mettet kø [N]	Total tid [s]	Tid for kjøretøy #1-#4 [s]	Tid for kjøretøy #5-#N [s]	Gjennomsnittlig mettet tidsluke [s]	Gjennomsnittlig tidsluke for #1-#4 [s]	Gjennomsnittlig tidsluke kjøretøy #5-#N [s]
5	11,16	9,23	1,93	2,23	2,31	1,93
11	25	10,38	14,62	2,27	2,60	2,09
8	16,15	9,27	6,88	2,02	2,32	1,72
16	35,91	10,24	25,67	2,24	2,56	2,14
10	23,3	11,29	12,01	2,33	2,82	2,00
14	31,6	8,74	22,86	2,26	2,19	2,29
14	30	9,57	20,43	2,14	2,39	2,04
8	20,44	12,50	8,90	2,56	3,13	2,23
16	32,87	7,73	25,14	2,05	1,93	2,10
13	25,9	9,74	16,16	1,99	2,44	1,80
14	28,53	8,24	20,29	2,04	2,06	2,03
15	32,02	8,58	23,44	2,13	2,15	2,13
16	35,18	9,26	25,92	2,20	2,32	2,16
15	30,69	8,47	22,22	2,05	2,12	2,02
8	20,13	11,42	8,71	2,52	2,86	2,18
19	41,31	8,89	32,42	2,17	2,22	2,16
11	23,4	7,65	15,75	2,13	1,91	2,25
14	30,88	8,22	22,66	2,21	2,06	2,27
8	16,68	9,22	7,46	2,09	2,31	1,87
15	33,43	9,79	23,64	2,23	2,45	2,15
250	544,58	188,43	357,11	SUMMERT		

Gjennomsnittlig tidsluke for kjøretøy #5-N i sekunder 2,10

Gjennomsnittlig tidsluke for kjøretøy #1-4 i sekunder 2,36

Estimering av tapt tid for kjøretøy #1-#4 i sekunder 1,02

Vedlegg 4 - Data om tidsluker fra signalanlegg på Nardo

	Antall kjøretøy i mettet kø [N]	Total tid [s]	Gjennomsnittlig mettet tidsluke [s]
	14	31,6	2,26
	14	30	2,14
	16	32,87	2,05
	14	28,53	2,04
	15	32,02	2,13
	16	35,18	2,20
	15	30,69	2,05
	19	41,31	2,17
	14	30,88	2,21
	15	33,43	2,23
SUMMERT	152	326,51	2,15

Gjennomsnittlig mettet tidsluke for de 10 omløpene med mest trafikk i mettet trafikkstrøm ga en gjennomsnittlig tidsluke på 2,15 sekund

Vedlegg 5 - Data til beregning av kritisk tidsluke og følgetid

Vedlegg 5

Data til beregning av kritisk tidsluke og følgetid

Vedlegg 5 - Data til beregning av kritisk tidsluke og følgetid

Tidsluker for venstresvingen i vikeplikt-krysset og antall kjøretøy som benyttet tidslukene

Luke #	Tidsluke [s]	Antall kjøretøy
1	1,6	0
2	1,6	0
3	1,9	0
4	1,9	0
5	1,9	0
6	2,0	0
7	2,0	0
8	2,2	0
9	2,2	0
10	2,4	0
11	2,4	0
12	2,5	0
13	2,5	0
14	2,7	0
15	2,8	0
16	3,1	0
17	3,1	0
18	3,4	0
19	3,4	0
20	3,6	0
21	3,7	0
22	3,8	0
23	4,0	0
24	4,1	0
25	3,4	1
26	3,7	1
27	3,7	1
28	3,7	1
29	3,8	1
30	3,8	1
31	3,9	1
32	4,0	1
33	4,0	1
34	4,0	1
35	4,2	1
36	4,2	1
37	4,2	1

Luke #	Tidsluke [s]	Antall kjøretøy
37	4,2	1
38	4,2	1
39	4,4	1
40	4,4	1
41	4,5	1
42	4,6	1
43	4,6	1
44	4,8	1
45	4,9	1
46	5,1	1
47	5,1	1
48	5,4	1
49	5,4	1
50	5,5	1
51	5,7	1
52	5,7	1
53	6,0	1
54	6,0	1
55	6,1	1
56	6,2	1
57	6,3	1
58	6,7	1
59	6,7	1
60	6,7	1
61	6,7	1
62	6,9	1
63	6,9	1
64	7,1	1
65	7,1	1
66	7,2	1
67	7,5	1
68	7,6	1
69	8,0	1
70	8,2	1
71	8,8	1
72	9,0	1

Luke #	Tidsluke [s]	Antall kjøretøy
73	7,3	2
74	7,3	2
75	8,7	2
76	6,8	2
77	11,5	2
78	7,0	2
79	12,6	2
80	6,6	2
81	6,1	2
82	8,1	2
83	6,6	2
84	10,6	2
85	7,3	2
86	7,6	2
87	9,3	2
88	7,5	2
89	9,5	2
90	10,0	2
91	7,8	2
92	11,0	2
93	8,6	2
94	8,7	2
95	7,1	2
96	8,3	2
97	9,5	2
98	9,4	2
99	8,7	2
100	12,5	3
101	15,8	3
102	14,9	3
103	11,9	3
104	13,5	3
105	15,3	3
106	14,9	4
107	13,8	4
108	15,8	4

Tidsluker for svingebevegelsen i rundkjøringen og antall kjøretøy som benyttet tidslukene

Vedlegg 5 - Data til beregning av kritisk tidsluke og følgetid

Luke #	Tidsluke [s]	Antall kjøretøy
1	1,7	0
2	1,8	0
3	1,9	0
4	2,0	0
5	2,1	0
6	2,2	0
7	2,2	0
8	2,3	0
9	2,3	0
10	2,5	0
11	2,6	0
12	2,6	0
13	2,7	0
14	2,7	0
15	2,7	0
16	2,7	0
17	2,8	0
18	2,9	0
19	3,0	0
20	3,8	0
21	4,2	0
22	4,4	0
23	5,2	0
24	2,4	1
25	2,6	1
26	2,7	1
27	2,9	1
28	2,9	1
29	3,0	1
30	3,0	1
31	3,0	1
32	3,0	1
33	3,1	1
34	3,2	1
35	3,2	1

Luke #	Tidsluke [s]	Antall kjøretøy
36	3,3	1
37	3,3	1
38	3,4	1
39	3,5	1
40	3,5	1
41	3,7	1
42	3,8	1
43	3,9	1
44	4,0	1
45	4,2	1
46	4,3	1
47	4,3	1
48	4,3	1
49	4,4	1
50	4,4	1
51	4,4	1
52	4,5	1
53	4,6	1
54	4,6	1
55	4,7	1
56	4,8	1
57	4,8	1
58	4,8	1
59	4,9	1
60	5,0	1
61	5,0	1
62	5,5	1
63	6,0	1
64	6,1	1
65	6,2	1
66	5,5	2
67	5,7	2
68	5,8	2
69	6,0	2
70	6,0	2

Luke #	Tidsluke [s]	Antall kjøretøy
71	6,0	2
72	6,1	2
73	6,1	2
74	6,2	2
75	6,4	2
76	6,4	2
77	6,5	2
78	6,5	2
79	7,0	2
80	7,1	2
81	7,2	2
82	7,2	2
83	7,3	2
84	7,5	2
85	7,7	2
86	7,7	2
87	8,2	2
88	8,4	2
89	7,0	3
90	7,5	3
91	8,0	3
92	8,5	3
93	9,2	3
94	9,3	3
95	9,6	3
96	10,0	3
97	10,1	3
98	10,3	3
99	10,6	3
100	10,8	3
101	11,7	3
102	10,0	4
103	10,5	4
104	12,1	4
105	13,0	4

Vedlegg 6
Data om kjøretøyslengde

Vedlegg 6 - Data om kjøretøyslengde

Merke	Antall solgt 2015	Lengde [m]	Produkt av antall og lengde
1. VW Golf	9679	4,26	41184
2. Toyota Auris	5385	4,28	23021
3. Nissan Leaf	4781	4,45	21252
4. Skoda Octavia	4427	4,66	20625
5. Tesla Model S	4040	4,98	20113
6. Toyota Yaris	3891	3,90	15175
7. Mazda CX-5	3846	4,54	17461
8. VW Up!	3807	3,54	13477
9. Toyota RAV4	3614	4,57	16516
10. Volvo V40	3394	4,37	14828
11. Volvo V70	3101	4,82	14956
12. Mitsubishi Outlander	2988	4,66	13912
13. Nissan Qashqai	2975	4,38	13022
14. VW Passat	2459	4,87	11965
15. Volvo Xc60	2428	4,64	11273
16. VW Tiguan	2340	4,43	10366
17. Audi A3	2322	4,45	10333
18. Suzuki SX4	2145	4,49	9631
19. Ford Focus	2141	4,53	9699
20. Peugeot 308	2106	4,59	9656
SUMMERT	71869		318465

Gjennomsnittslengde [m] =	4,43
---------------------------	------