

Flaskehalser på avkjøringsramper

Et casestudie av E6 i nordgående retning på
Sluppen, Trondheim

Oddrun Dalgard
Håvard Norgård

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Arvid Aakre, IBM

Medveileder: Jenny Persson, Asplan Viak
Børge Bang, Statens vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Flaskehalsen på avkjøringsramper Et casestudie av E6 i nordgående retning på Sluppen, Trondheim	Dato: 11.06.2017 Antall sider (inkl. bilag): 224 Masteroppgave <input checked="" type="checkbox"/> Prosjektoppgave <input type="checkbox"/>
Navn: Oddrun Dalgard og Håvard Norgård	
Faglærer/veileder: Arvid Aakre, Trafikkteknisk senter ved NTNU	
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Jenny Persson (Asplan Viak) og Børge Bang (Statens vegvesen)	

Ekstrakt:

Avviklingsproblemer som en konsekvens av flaskehalsen i trafikken utgjør et stort samfunnsproblem. Det er derfor behov for å kartlegge hva som skjer og hvordan dette kan påvirkes, for å øke forståelsen rundt fenomenet. Denne studien tar utgangspunkt i avkjøringsrampen fra E6 i nordgående retning på Sluppen i Trondheim som et caseområde. Rampen kan kategoriseres som en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger.

Gjennom en omfattende datainnsamling har det blitt kartlagt hvilke faktorer som er med på å forme dagens trafikksituasjon. Kartleggingen viste at området oppstrøms for flaskehalsen var preget av flere forstyrrende situasjoner som reduserte avviklingskvaliteten gjennom morgenrushet.

Ved bruk av mikrosimuleringsverktøyet Aimsun ble en spesialtilpasset modell for caseområdet konstruert med den hensikt å gjenskape de kartlagte situasjonene. Gjennom arbeidet med simuleringsmodellen ble det avdekket at en spesialtilpasset modell kunne gå på bekostning av den helhetlige gjenskapningen av de virkelige forholdene. For å oppnå en god representasjon ble det dermed kun fokusert på de mest fremtredende situasjonene.

Ved å ta utgangspunkt i tilnærmingen til dagens situasjon har tiltak for å forbedre trafikkavviklingen på Sluppen blitt vurdert og modellert. Da etterspørselen er høyere enn kapasiteten på avkjøringsrampen vil det ikke være mulig å løse avviklingsproblemer oppstrøms for flaskehalsen uten å øke kapasiteten eller redusere etterspørselen. Tiltak rettet mot de forstyrrende situasjonene vil derimot kunne bedre situasjonen, men ikke fjerne avviklingsproblemer i sin helhet.

Gjennom kartleggingen og modelleringen kom det tydelig frem at området oppstrøms for en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger vil være veldig sårbart for forstyrrelser. Situasjonen på Sluppen har samtidig begrensede konsekvenser, da det hverken skapes *first-in-first-out*-systemer som «fanger» trafikken som skal mot Trondheim sentrum eller tilbakeblokkeringer som sperrer oppstrøms ramper.

Stikkord:

1. Flaskehals
2. Avkjøringsrampe
3. Trafikkavvikling
4. Aimsun


(sign.)


(sign.)

Forord

Denne avsluttende masteroppgaven er skrevet av Oddrun Dalgard og Håvard Norgård ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, NTNU. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng for hver av kandidatene og er skrevet i løpet av vårsemesteret 2017.

Masteroppgaven omhandler flaskehals på avkjøringsramper, og ble gjennomført som et casestudium av E6 i nordgående retning på Sluppen, Trondheim. Problemstillingen og caseområdet ble valgt ut i samråd med hovedveileder Arvid Aakre.

Det finnes mange ulike typer flaskehals i vegnettet. Hvilke innvirkninger dette får på utviklingskvaliteten vil være sterkt avhengig av de trafikale forholdene som foreligger i systemet. Gjennom oppgaven skal årsaken bak og konsekvensene av flaskehalsen på avkjøringsrampen fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen og de trafikale forholdene på og oppstrøms for rampen kartlegges.

Masteroppgaven er videre todelt og består av en prosessrapport og en vitenskapelig artikkel. Prosessrapporten er et supplement til den vitenskapelige artikkelen og innebærer at artikkelen skal fungere som et uavhengig dokument. Både prosessrapporten og den vitenskapelige artikkelen er skrevet på norsk.

Det er ønskelig å rette en takk til hovedveileder Arvid Aakre ved Trafikkteknisk Senter ved NTNU for gode råd gjennom hele prosessen, fra definering av problemstilling, valg av caseområde, gjennomføringen av datainnsamlingen, forslag til relevant litteratur og gode tilbakemeldinger før innleveringen.

Oppgaven ble skrevet i samarbeid med Statens vegvesen og Asplan Viak gjennom Asplan Viak-programmet 2016. En takk rettes til Børge Bang og Erik Jørgen Jølsgard i Statens vegvesen for tilgjengeliggjøring av data og gode råd gjennom arbeidet. Videre er det ønskelig å takke Kari Skogstad Norddal og Jenny Persson i Asplan Viak for god tilrettelegging og støtte gjennom prosessen.

Til slutt er det ønskelig å rette en takk til Torbjørn Haugen i Statens vegvesen for tilgjengeliggjøring av data, samt Kjeldsberg Eiendomsforvaltning AS ved Tore Westrum og Paul Espen Pedersen og Trøndelag brann- og redningstjeneste IKS på Sluppen ved Pål Moxnes for et godt samarbeid som muliggjorde en god og effektiv datainnsamling.

Trondheim, juni 2017


Oddrun Dalgard


Håvard Norgård

Sammendrag

Avviklingsproblemer som en konsekvens av flaskehals i trafikken utgjør et stort samfunnsproblem. Det er derfor behov for å kartlegge hva som skjer og hvordan dette kan påvirkes for å øke forståelsen rundt fenomenet. Denne studien tar utgangspunkt i avkjøringsrampen fra E6 i nordgående retning på Sluppen i Trondheim som et caseområde. Rampen kan kategoriseres som en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger.

Gjennom en omfattende datainnsamling har det blitt kartlagt hvilke faktorer som er med på å forme dagens trafikk situasjon. Kartleggingen viste at den høyest belastede perioden for avkjøringsrampen på Sluppen var morgenrushet. Gjennom perioden oversteg etterspørselen kapasiteten og den fysiske flaskehalsen ble aktivert. Dette initierte avviklingsproblemer, som ble ytterligere forsterket av fem forstyrrende situasjoner som skapte sjokkbølger som forplantet seg bakover i trafikkstrømmen oppstrøms for avkjøringsrampen. Forstyrrelsene ble forårsaket av akselerasjonsproblemer gjennom flaskehalsen, sene feltskifter inn i en allerede saktegående trafikkstrøm rett i forkant av avkjøringsrampen og oppstrøms for bussholdeplassen, samt bussenes ankomst til og avgang fra bussholdeplassen.

Ved bruk av mikrosimuleringsverktøyet Aimsun ble en spesialtilpasset modell for caseområdet konstruert med den hensikt å gjenskape de kartlagte situasjonene. Gjennom arbeidet med simuleringsmodellen ble det avdekket at en spesialtilpasset modell kunne gå på bekostning av den helhetlige gjenskapningen av de virkelige forholdene. For å oppnå en god representasjon ble det dermed kun fokusert på de mest fremtredende situasjonene fra kartleggingen av trafikk situasjonen i caseområdet.

Ved å ta utgangspunkt i tilnærmingen til dagens situasjon har tiltak for å forbedre trafikkavviklingen på Sluppen blitt vurdert og modellert. Tiltakene ble delt inn i fire kategorier: mindre fysiske tiltak, adferdsendrende tiltak, tiltak som reduserer innvirkningen fra bussen og nye konseptuelle løsninger. Da etterspørselen er høyere enn kapasiteten på avkjøringsrampen vil det ikke være mulig å løse avviklingsproblemer oppstrøms for flaskehalsen uten å øke kapasiteten eller redusere etterspørselen. Tiltak rettet mot de forstyrrende situasjonene vil derimot kunne bedre situasjonen, men ikke fjerne avviklingsproblemer i sin helhet.

Gjennom kartleggingen og modelleringen kom det tydelig frem at området oppstrøms for en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger vil være veldig sårbart for forstyrrelser. Situasjonen på Sluppen har samtidig begrensede konsekvenser, da det hverken skapes *first-in-first-out*-systemer som «fanger» trafikken som skal mot Trondheim sentrum eller tilbakeblokkeringer som sperrer oppstrøms ramper.

Abstract

Traffic bottlenecks represents a major cost for the society through congestion, delays and pollution. It is therefore necessary to identify the causality behind the bottleneck to get a better understanding of the phenomenon. This report presents a case study of the freeway off-ramp from E6 in the northbound direction at Sluppen in Trondheim, Norway. The off-ramp can be categorized as a physical bottleneck with constant capacity, without downstream capacity constraints.

The factors that contributed to the current traffic situation were identified through an extensive data collection. The period with the highest traffic demand on the off-ramp was the morning rush hour. During this period, the demand exceeded the capacity and the physical bottleneck became activated. This initiated the queuing upstream of the bottleneck, which was further reinforced by five distinct situations interrupting the traffic flow. These incidents created shockwaves propagating backwards in the traffic upstream related to the off-ramp. The interruption of the traffic stream were caused by acceleration problems through the physical bottleneck, late merging into an already slow traffic stream just in front of the off-ramp and upstream of the bus stop, as well as the buses arriving to and departing from the bus stop.

To recreate the identified situations, a customized model of the case area was designed using the Aimsun microsimulation tool. Through the development of the simulation model, it was concluded that the customizations could deteriorate the overall recreation of real conditions. In order to achieve a good representation, only the most significant incidents in the case area were included in further development.

Based on today's situation, measures to improve the traffic situation at Sluppen were evaluated and modeled. The measures were divided into four categories: smaller physical measures, behavioral changes, measures to reduce impact from the bus and new conceptual solutions. Since the demand is higher than the capacity of the off-ramp, it is necessary to increase the capacity or reduce the demand to solve the queuing upstream of the bottleneck. Measures addressed to reduce the interruption of the traffic flow could improve the situation, but not remove the queuing entirely.

Based on the results it was concluded that the area upstream of a physical bottleneck with constant capacity, without downstream capacity constraints is very vulnerable to interferences. At the same time, the situation at Sluppen has limited consequences, as it does not create *first-in-first-out*-systems that "entrap" traffic towards the city center of Trondheim or upstream ramp blockage.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	iii
Sammendrag	iv
Abstract	v
Innholdsfortegnelse	vi
Figurliste – Prosessrapport.....	xi
Tabelliste – Prosessrapport	xviii
Figurliste – Artikkel.....	xx
Tabelliste – Artikkel	xxi
DEL 1: PROSESSRAPPORT	
1 Innledning.....	1
1.1 Målsetting og forskningsspørsmål	2
1.2 Rapportens oppbygging	3
2 Metode.....	4
3 Flaskehals - definisjonskapittel.....	6
4 Caseområde.....	9
4.1 Historisk utvikling	9
4.2 Dagens fysiske situasjon.....	10
4.3 Dagens trafikksituasjon	12
4.4 Uttalelser om området	12
Del A: Beskrive og forklare	13
5 Beskrivelse.....	14
6 Datainnsamling.....	18
6.1 Videoregistreringer	19
6.1.1 Pilotstudie.....	19

6.1.2	Utførelse.....	21
6.1.3	Manuelle videoregistreringer.....	24
6.2	Rutetider.....	30
6.3	Trafikkregistreringsdata	30
6.3.1	Kroppan bru.....	31
6.3.2	Sunnland.....	31
6.4	Bomsnittsregistreringer.....	32
6.5	Reisetidsregistreringer	33
6.6	Geometrisk utforming.....	34
7	Dataanalyse.....	35
7.1	Manuelle videoregistreringer.....	35
7.1.1	Trafikk på avkjøringsrampen fra E6 syd	35
7.1.2	Trafikk på E6 syd mot Trondheim sentrum.....	38
7.1.3	Trafikkfordeling	39
7.1.4	Påkjøringsrampen fra Sluppenvegen	40
7.1.5	Sene feltskifter	41
7.1.6	Bussregistreringer	43
7.2	Rutetider.....	44
7.3	Trafikkregistreringsstasjoner.....	45
7.3.1	Kroppan bru.....	45
7.3.2	Sunnland.....	50
7.4	Bomsnittsregistreringer.....	51
7.4.1	Estimering av trafikkfordelingen på avkjøringsrampen til Osloveien	52
7.4.2	Estimering av trafikkfordelingen på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen	53
7.4.3	Sammenligning med manuelle videoregistreringer	55
7.4.4	Sammenligning med registreringer fra Kroppan bru	56
7.5	Reisetidsregistreringer	57
7.6	Geometrisk utforming.....	62
7.6.1	Bussholdeplass	62
7.6.2	Stigningsforhold.....	62
8	Teori.....	63
8.1	Trafikkstrømsmodeller	63
8.1.1	Ulike modeller	63
8.1.2	Flaskehalses og trafikkstrømmer.....	66
8.2	Sjokkbølgeteori.....	68
8.3	Car-following	70

8.3.1	GM-modeller	71
8.3.2	Modeller basert på sikkerhetsavstand	72
8.3.3	Terskelmodeller	73
8.3.4	Modeller basert på uklar logikk.....	74
8.4	Kontinuitetsteori med spesialfelt.....	74
9	Teoretisk anvendelse.....	76
9.1	Anvendelse av trafikkstrømsmodeller	76
9.2	Sjokkbølgeanalyse	81
10	Forklaring.....	88
	Del B: Modellere	91
11	Aimsun.....	92
11.1	Oppbygging av en modell.....	92
11.2	Aktuelle delmodeller	93
11.2.1	Car-Following Model	93
11.2.2	Two-Lane Car-Following Model.....	96
11.2.3	Lane Change Model.....	96
11.2.4	Give Way Model	98
12	Oppbygging av modellen.....	100
12.1	Fysisk nettverk.....	100
12.1.1	Stigningsforhold.....	100
12.1.2	Kollektivtransport	101
12.1.3	Detektor.....	102
12.1.4	Fartsgrense	102
12.2	Tilpasning av datagrunnlag.....	102
12.2.1	Trafikkvolum	102
12.2.2	Kollektivtransport	103
13	Verifisering, kalibrering og validering.....	105
13.1	Verifisering	105
13.2	Kalibrering	105
13.2.1	Strategi for kalibreringsfasen	106
13.2.2	Justering av delmodeller	107
13.3	Validering.....	108
13.3.1	Valg av antall replikasjoner	109
13.3.2	Valideringskriterier	113
13.3.3	Validering av modellen.....	114
14	Gjenskaping av virkelige forhold i en modell	120

Del C: Tiltak	123
15 Eksisterende planer	124
15.1 Planer for analyseområdet	124
15.2 Planer for tilstøtende vegnett	126
16 Mulige tiltak	128
16.1 Mindre fysiske tiltak	128
16.2 Adferdsendrende tiltak	129
16.3 Tiltak som reduserer innvirkningen fra bussen	130
16.4 Nye konseptuelle løsninger	132
17 Modellering av tiltak	136
17.1 Utelatte tiltak	136
17.2 Modellering av enkelttiltak	137
17.2.1 Utvide avkjøringsrampen til to kjørefelt	137
17.2.2 Redusere innvirkningen fra bussen	139
17.2.3 Utjevne etterspørselen gjennom morgenerushet	142
17.3 Modellering av tiltak i kombinasjon	144
17.3.1 Utjevnet etterspørsel og fjerning av bussholdeplass	144
17.3.2 Utvidelse av rampen og fjerning av bussholdeplass	145
17.4 Usikkerheter ved bruk av spesialtilpassede modeller	146
18 Vurdering av tiltak	147
18.1 Nullvekstmålet	147
18.2 Trafikkvekst med valgt tiltak	148
19 Generalisering	150
20 Konklusjon	152
21 Forslag til videre arbeid	154
Referanseliste	155
DEL 2: VITENSKAPELIG ARTIKKEL	
Sammendrag	1
1 Introduksjon	1
2 Datainnsamling	2
3 Dagens trafikksituasjon	3
4 Kalibrering og validering	10
5 Simuleringsmodellen	10
6 Tiltak	13
7 Diskusjon	15
8 Konklusjon	16

Forslag til videre arbeid.....	17
Takk	18
Referanseliste.....	18
Vedlegg.....	I

Figurliste – Prosessrapport

Figur 1-1: Oversiktsbilde av dagens utforming på Sluppen fra en nordøstlig retning (Kilde: Langaas et al., 2008).....	2
Figur 4-1: Oversiktskart over dagens situasjon på Sluppen. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket).....	9
Figur 4-2: Rampeutformingen på Sluppen. Bildet er tatt mot nord. (Foto: R. Kjelsberg)	10
Figur 4-3: Illustrasjon på lengdemål for interessepunkter langs analyseområdet relatert til begynnelsen av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Figuren er ikke i målestokk.....	11
Figur 4-4: Utforming av bussholdeplassen på Sluppen (Hentet fra Norge i Bilder)	11
Figur 5-1: Illustrasjon av hvor de 5 situasjonene som er med på å skape og forverre trafikksituasjonen på Sluppen oppstår.	14
Figur 5-2: Illustrasjon av situasjon 1, saktegående kjøretøy på avkjøringsrampen.	15
Figur 5-3: Illustrasjon av situasjon 2, kjøretøy som tvinger frem luker i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen.....	15
Figur 5-4: Illustrasjon av situasjon 3, busser som fletter sammen med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt.	16
Figur 5-5: Illustrasjon av situasjon 4, busser som krysser gjennom eller reduserer hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøring til bussholdeplassen.....	17
Figur 5-6: Illustrasjon av situasjon 5, kjøretøy som legger seg inn i eller rett før oppløsningsfronten.	17
Figur 6-1: Kameraet Garmin VIRB XE som ble benyttet under videoregistreringene. (Foto: Garmin)	20
Figur 6-2: Illustrasjon av dekningsområde for kamera 1. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket)	22
Figur 6-3: Illustrasjon av dekningsområde for kamera 2. Midlertidig plassering til venstre og endelig plassering til høyre. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket).....	22
Figur 6-4: Illustrasjon av dekningsområde for kamera 3. Midlertidig plassering til venstre og endelig plassering til høyre. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket).....	23

Figur 6-5: Illustrasjon av brukergrensesnittet i de to applikasjonene. «Holdeplassregistrering» er vist til venstre og «Utvidet holdeplassregistrering» er vist til høyre. (Kilde: Google Play)	25
Figur 6-6: Illustrasjon av registreringsresultat fra applikasjonen «Utvidet holdeplassregistrering». Formatet dataene mottas på er vist til venstre (kilde: Google Play) og en illustrasjon på resultatet vist i Excel til høyre. Her er ankomst høyre fil og avgang benyttet i stedet for bussnummer, og «passenger» og «bus» representerer henholdsvis vanlige kjøretøy og buss.	26
Figur 6-7: Illustrasjon av utvalgt snitt for registreringene av kjøretøy som skal mot Trondheim sentrum (blå) og E6 Omkjøringsvegen (rød) fra E6 Syd, samt påkjøringsrampen fra Sluppenvegen mot E6 Omkjøringsvegen (oransje). Utsnitt hentet fra kamera 1.	27
Figur 6-8: Illustrasjon av utvalgt strekning for registrering av kjøretøy som foretar sene feltskifter med utsnitt hentet fra kamera 1.	29
Figur 6-9: Situasjonsbilde hentet fra videoregistreringen gjennomført onsdag 19.10.2016 kl. 08:13:22. Bildet viser fire busser som befinner seg ved bussholdeplassen samtidig.	29
Figur 6-10: Illustrasjon over plasseringen av trafikkregistreringsstasjonene (Kartgrunnlag hentet fra vegkart.no)	30
Figur 6-11: Plassering av bomsnittene ved Sluppen og Tonstad. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket)	32
Figur 6-12: Illustrasjon av strekningen mellom registreringspunktene. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket).....	33
Figur 7-1: Gjennomsnittlig trafikkvolum på avkjøringsrampen gitt på 5-minuttersintervall. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	35
Figur 7-2: Trafikkvolum for henholdsvis lette og tunge kjøretøy til E6 Omkjøringsvegen gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	36
Figur 7-3: Teoretisk fordelingen av virkelige tidsluker over de beregnede tidslukene.....	37
Figur 7-4: Tidslukefordeling på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen.....	37
Figur 7-5: Gjennomsnittlig trafikkvolum mot Trondheim sentrum basert på registreringer på 5-minuttersintervall. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	38
Figur 7-6: Trafikkvolum for henholdsvis lette og tunge kjøretøy mot Trondheim sentrum med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	38
Figur 7-7: Fordeling av trafikkvolum mellom kjørefeltene rett i forkant av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	39
Figur 7-8: Trafikkvolum fra de manuelle registreringene på påkjøringsrampen fra Sluppenvegen. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	40
Figur 7-9: Andel kjøretøy i ulike grupperingsstørrelser på påkjøringsrampen fra Sluppenvegen.	41
Figur 7-10: Sene feltskifter som en andel av trafikkvolumet på avkjøringsrampen for hver av registreringsdagene, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	42

Figur 7-11: Sammenhengen mellom andelen sene feltskifter og trafikkvolumet på avkjøringsrampen.	42
Figur 7-12: Gjennomsnittlig hverdagstrafikk over døgnet registrert på Kroppan bru i midtre og høyre kjørefelt, gitt med timesoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	45
Figur 7-13: Gjennomsnittlig tungbilandel over døgnet for hverdager registrert på Kroppan bru i midtre og høyre kjørefelt, gitt med timesoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	46
Figur 7-14: Trafikkvolum per kjørefelt på Kroppan bru over døgnet for mandag 24.10.16 (t.v) og tirsdag 25.10.16 (t.h), gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	46
Figur 7-15: Hastighetsfordelingen i høyre kjørefelt på Kroppan bru, vist som antall kjøretøy per kvarter fordelt på ulike hastighetsklasser. Hastighetene er gitt i km/t. Registreringene viser mandag 24.10.16 (t.v) og tirsdag 25.10.16 (t.h), og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	47
Figur 7-16: Gjennomsnittlig hastighetsprofil i morgenrushet for høyre kjørefelt på Kroppan bru basert på registreringer fra mandag 24.10.16 og tirsdag 25.10.16, gitt med en oppløsning på 5 minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	47
Figur 7-17: Volum-, hastighet- og tetthetssammenhenger på Kroppan bru for midtre og høyre kjørefelt samlet.	48
Figur 7-18: Volum-, hastighet- og tetthetssammenhenger på Kroppan bru for midtre og høyre kjørefelt hver for seg.	49
Figur 7-19: Gjennomsnittlig hverdagstrafikk over døgnet registrert på Sunnland i nordgående retning, gitt med timesoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	50
Figur 7-20: Fordelingen av hastighetsmålinger fra enkeltkjøretøy hentet fra trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland i nordgående retning.....	51
Figur 7-21: Utsnitt av analyseområdet, der bomstasjonene er markert i svart, hovedtraséen i grønt og avkjøringsrampene i rødt. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket)	52
Figur 7-22: Estimert fordeling av lette kjøretøy fra Tonstad, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	54
Figur 7-23: Estimert fordeling av tunge kjøretøy fra Tonstad, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	54
Figur 7-24: Sammenligning av trafikkvolum mot sentrum for henholdsvis lette og tunge kjøretøy, gitt av balanseregnskap og manuelle registreringer. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	55
Figur 7-25: Sammenligning av trafikkvolum på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen for henholdsvis lette og tunge kjøretøy, gitt av balanseregnskap og manuelle videoregistreringer. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	56
Figur 7-26: Fordeling av trafikk mellom venstre og midtre kjørefelt gjennom døgnet. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	57
Figur 7-27: Forventet reisetid og strekningshastighet basert på reisetidsregistreringer fra ni yrkesdøgn, gitt med en oppløsning på fem minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	58

Figur 7-28: Strekningshastighet hentet for ni ulike yrkesdøgn i februar 2017, gitt med en oppløsning på fem minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	59
Figur 7-29: Reell reisetid hentet for ni ulike yrkesdøgn i februar 2017, gitt med en oppløsning på fem minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.....	59
Figur 7-30: Gjennomsnittlig reisetid basert på ni yrkesdøgn i februar 2017, sammen med ekstremalverdiene for reisetiden i tilsvarende tidsintervall. Registreringene er gitt med en oppløsning på fem minutter og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	60
Figur 7-31: Illustrasjon over grad av forsinkelse mellom tidspunkt og dager. Registreringene er gitt med en oppløsning på fem minutter og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	61
Figur 7-32: Sammenhengen mellom andelen sene feltskifter og reisetiden på strekningen mellom Tonstad og Sluppen.	61
Figur 8-1: Illustrasjon av forholdet mellom hastighet og tetthet gitt av en toregimemodell.....	64
Figur 8-2: Illustrasjon av tredimensjonale trafikkstrømsmodeller (Kilde: Hall, 1975).	64
Figur 8-3: Illustrasjon over innvirkningen en flaskehals har på forholdet mellom volum, hastighet og tetthet ved ulike lokasjoner.(Kilde: May, 1990).....	67
Figur 8-4: Typisk mønstrer ved sjokkbølgeformasjon ved flaskehals med konstant kapasitet. (Basert på May, 1990).....	68
Figur 8-5: Illustrasjon av trafikkvolum, hastighet og tetthet ved ulike situasjoner og sjokkbølgehastigheten for overgangen mellom situasjonene. Situasjonene er illustrert på en Greenshield-kurve.	69
Figur 8-6: Tid-avstand-diagram som illustrerer utbredelsen av de ulike situasjonene ved sjokkbølgedannelse på grunn av et saktegående kjøretøy. Situasjon A (grønt) er en høyt belastet situasjon i riflytsregimet, situasjon B (rødt) er køsituasjonen og situasjon C (gult) er oppløsningssituasjonen. Det grå området illustrerer det teoretiske tomrommet som oppstår i forkant av det saktegående kjøretøyet.....	70
Figur 8-7: Illustrasjon på fremstilling av en car-following-analyse i et tid-avstand-diagram.....	71
Figur 8-8: Sammenhengen mellom de mikroskopiske GM-modellene og de makroskopiske modellene presentert av Greenberg, Greenshield, Underwood og Northwestern. Interesseområdet er der $0 \leq m < 1$ og $l > 1$. (Basert på May, 1990).....	72
Figur 8-9: Illustrasjon av Wiedemanns terskelmodell inkludert en illustrert kjørebane. (Kilde: Hoyer og Fellendorf, 1997)	73
Figur 8-10: Iso-kurver for hastighet i (K,k)-planet, med illustrasjon av skillet mellom 2- og 1-rørsregimene. (Kilde: Daganzo, 1997)	75
Figur 8-11: Illustrasjon av de ulike kjøretøytypenes bevegelse gjennom ulike situasjoner fra et 2-rørsregime til et 1-rørsregime. Heltrukne linjer med pil er kjøretøy med tilgang på spesialfeltene og stiplede linjer med pil er de resterende kjøretøyene. (Kilde: Daganzo, 1997)	75
Figur 9-1: Trafikkstrømsmodellenes tilpasning til forholdet mellom hastighet og tetthet, gitt datagrunnlaget i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru, med en oppløsning på 5 minutter.	77

Figur 9-2: Trafikkstrømsmodellenes representasjon av forholdet mellom hastighet og volum, sammen med datagrunnlag i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Punktene er gitt med en oppløsning på 5 minutter.....	77
Figur 9-3: Trafikkstrømsmodellenes representasjon av forholdet mellom volum og tetthet, sammen med datagrunnlag i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Punktene er gitt med en oppløsning på 5 minutter.....	77
Figur 9-4: Sammenhengen mellom volum, hastighet og tetthet for de definerte delstrekningene, basert på estimater, illustrert sammen med sluttpunktene på de ulike delstrekningene. Punktene viser gjennomsnittlige kvartersverdier for et døgn og er fremstilt sammen med en tilpasning til trafikkstrømsmodellen Northwestern, presentert av Drake et al. (1967)	80
Figur 9-5: Illustrasjon av de 3 valgte situasjonene sammen med trafikkregistreringene fra Kroppan bru på 5 minuttersintervall og Greenshield-tilnærmingen til de 3 punktene.....	82
Figur 9-6: Illustrasjon av trafikkvolum, hastighet, tetthet og sjokkbølgehastighet for hver av de 3 situasjonene.	83
Figur 9-7: Tid-avstand-diagram for 3 situasjoner i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen, med ulik lokasjon og grad av påvirkning.....	84
Figur 9-8: Tid-avstand-diagram for 6 situasjoner i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen, med ulik lokasjon og grad av påvirkning.....	85
Figur 9-9: Illustrasjon av enkeltkjøretøys bevegelser gjennom området på Sluppen, og hvordan de blir påvirket av hendelsene i forkant av avkjøringsrampen. Diagrammet har tilsvarende akser som tid-avstandsdiagrammet, med tid bortover og posisjon oppover. Helningen på linjene indikerer kjøretøyet hastighet, og dermed hvilken situasjon de er i. Dette er tydeliggjort gjennom farger der situasjon A er grønn, situasjon B er rød og situasjon C er oransje.....	86
Figur 11-1: Illustrasjon av parameterne Number of Vehicles og Maximum Distance som inkluderes i en absolutt Two-Lane Car-Following Model. (Kilde: Transport Simulation Systems, 2017)	96
Figur 11-2: Illustrasjon av tre eksempler fra feltskiftmodellens beslutningsprosess (Kilde: Aakre, 2016).....	97
Figur 11-3: Illustrasjon av soneinndelingen i forkant av en node og parameterne Distance Zone 1 og Distance Zone 2 (Kilde: Bang et al., 2010).....	98
Figur 11-4: Sammenhengen mellom nødvendig lukestørrelse og ventetiden (Kilde: Transport Simulation Systems, 2017)	99
Figur 12-1: Illustrasjon av vegnettet ved rampene, hvor høydeprofil har blitt implementert.	100
Figur 12-2: Illustrasjon over felt-tilknytningen i noden ved avkjørings-rampen. Kjørefeltet med mørkegrå farge markerer kollektivfeltet.....	101
Figur 12-3: Illustrasjon over de utplasserte detektorene, markert i blått.	102
Figur 13-1: Illustrasjon over kalibrering- og valideringsfasen (Kilde: Casas et al., 2010).....	106
Figur 13-2: Utviklingen av reisetid og feil ved økende antall replikasjoner.	112

Figur 13-3: Kumulativ fordeling av reisetidene i de 31 replikasjonene sammenlignet med en t-fordeling med forventningsverdi og standardavvik gitt av modellresultatene.....	112
Figur 13-4: Retningslinjer for validering av simuleringsmodell hentet fra Design manual for roads and bridges (Department of Transport, 1996). Tabellen viser foreslåtte kriterier og målinger, samt anbefalte akseptmål.....	113
Figur 13-5: Reisetidsregistreringer på strekningen Tonstad – Sluppenrampene fra hverdager i uke 6 og 7, 2017. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	114
Figur 13-6: Illustrasjon av reisetider fra de ulike replikasjonene av simuleringsmodellen sammenlignet med ekstremalverdier fra virkelige registreringer. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	115
Figur 13-7: Illustrasjon av gjennomsnittlig reisetid fra virkelige registreringer og simuleringsmodellen, samt ekstremalverdier fra virkelige registreringer. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	115
Figur 13-8: Gjennomsnittlig hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru gitt av de virkelige og simulerte registreringene. Registreringene har en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	119
Figur 15-1: Fremtidig stamvegnett i Trondheim. Tegnforklaring: blå - E6 Syd og Omkjøringsvegen, gul - Nordre avlastningsveg og Stavne – Ila, rød - E6 fra Nidelv bru til Grilstad, hvit - Stavne – Sluppen – Selsbakk. (Kilde: Langaas et al., 2008).....	124
Figur 15-2: Alternative kryssutforminger på Sluppen fra kommunedelplan, 2010 (Kilde: Statens vegvesen, 2010). Fra venstre til høyre er alternativ 0+, 1, 2A, 2B og 3 illustrert. Tegnforklaring: gul – kjøreveg, rød – kollektivfelt/busslomme, grønn – gang-/sykkelveg.....	125
Figur 15-3: Mulig holdeplassløsning for en ny holdeplass på Sluppen med midtstilt kollektivfelt. Lys blå er kollektivfelt, mørk blå er plattform, grå er kjøreareal for bil, oransje er areal for myke trafikanter og grønn er grøntrabatter. (Kilde: Statens vegvesen, 2013).....	126
Figur 15-4: Illustrasjon av nye Sluppen bru (Kilde: Statens vegvesen, 2014a).....	126
Figur 15-5: Illustrasjon over strekningen som skal utbedres mellom Heimdal og Melhus (Kilde: Statens vegvesen, u.å.).....	127
Figur 16-1: Illustrasjon av eksisterende og mulige fremtidige bussholdeplasser på Sluppen. Stiplede linjer viser mulig gangtrasé mellom de nye bussholdeplassene gitt dagens infrastruktur. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket).....	131
Figur 16-2: Oversiktobilde av alternativ 1: Hovedtrasé fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen. Forslaget er kun en illustrasjon.....	133
Figur 16-3: Detaljobilde av alternativ 1: Hovedtrasé fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen. Forslaget er kun en illustrasjon.....	134
Figur 16-4: Oversiktobilde av alternativ 2: Ny utkjøring fra bussholdeplassen. Forslaget er kun en illustrasjon.....	135
Figur 16-5: Detaljobilde av alternativ 2: Ny utkjøring fra bussholdeplassen. Forslaget er kun en illustrasjon.....	135

Figur 17-1: Utvidelse av avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen til to kjørefelt (t.v) og felttilknytningen fra E6 syd (t.h).....	137
Figur 17-2: Sammenligning av reisetid før og etter utvidelse av avkjøringsrampen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	138
Figur 17-3: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter utvidelse av avkjøringsrampen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	138
Figur 17-4: Illustrasjon av hvordan bussavgangene fjernes i modellen.....	139
Figur 17-5: Sammenligning av reisetid før og etter at innvirkningen fra bussavganger fjernes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	140
Figur 17-6: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter at innvirkningen fra buss-avgangene fjernes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	140
Figur 17-7: Sammenligning av reisetid før og etter at bussholdeplassen flyttes forbi influensområdet til flaskehalsen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	141
Figur 17-8: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter at bussholdeplassen flyttes forbi influensområdet til flaskehalsen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	142
Figur 17-9: Sammenligning av reisetid før og etter at etterspørselen utjevnes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	143
Figur 17-10: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter at etterspørselen utjevnes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	144
Figur 17-11: Sammenligning av reisetid før og etter at etterspørselen utjevnes og bussholdeplassen fjernes fra influensområdet til flaskehalsen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	145
Figur 17-12: Sammenligning av reisetid før og etter at bussholdeplassen fjernes fra influensområdet til flaskehalsen og avkjøringsrampen utvides. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	146
Figur 18-1: Sammenligning av reisetid gitt av nullvekstscenariet og en trafikkøkning på 20 %, sammen med grunnmodellen før tiltak. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	148
Figur 18-2: Sammenligning av virtuell kø på utsiden av modellen ved Tonstad, gitt av nullvekstscenariet og en trafikkøkning på 20 %. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.....	149

Tabelliste – Prosessrapport

Tabell 5-1: De 5 situasjonene illustrert i figur 5-1.....	15
Tabell 6-1: Oversikt over hvilke perioder de ulike registreringene dekker.....	18
Tabell 6-2: Oversikt over gjennomførte registreringer.	24
Tabell 6-3: Oversikt over dato, ukedag, kameraplassering, start- og sluttidspunkt, samt varighet av videoen for de to registreringsdagene. Kamera 1 - Stålgården, Kamera 2 - Lyktestolpe/flaggstang, Kamera 3 - Brannstasjon, M - Midlertidig plassering og E - Endelig	24
Tabell 7-1: Eksempel på tidslukeberegning. Eksempel 1 og 2 representerer situasjonene med størst avvik fra virkelig tidsluke, mens eksempel 3 representerer en situasjon der virkelig og beregnet tidsluke er like.	36
Tabell 7-2: Fordeling av trafikkvolum mellom avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og E6 syd videre mot Trondheim sentrum, gitt med kvartersoppløsning.	40
Tabell 7-3: Gjennomsnittlig avgangsfrekvens og standardavvik basert på de manuelle registreringene. Registreringene er gitt på intervallenes starttidspunkt.	43
Tabell 7-4: Gjennomsnittlig oppholdstid og standardavvik basert på manuelle registreringer.	43
Tabell 7-5: Avganger til Trondheim sentrum basert på rutetider hentet fra AtB. Registreringene er gitt på intervallenes starttidspunkt.	44
Tabell 7-6: Avganger til E6 Omkjøringsvegen basert på rutetider hentet fra AtB.	45
Tabell 7-7: Tungbilandel gitt av manuelle videoregistreringer, forholdet mellom kjente kjøretøysklasser, samt ved inkludering av ukjente kjøretøy i kategorien bestående av lette kjøretøy.	53
Tabell 7-8: Oversikt over målte verdier til bruk i estimeringen av de ulike stigningsforholdene.	62
Tabell 8-1: Sammenligning av enkeltregimemodellers prediksjon av de ulike trafikkarakteristikkene ved tilpasning til et virkelig datasett. Volum er gitt som veh/h, tettheten som veh/mi og hastigheten i mi/h. (Kilde: May, 1990).....	66

Tabell 9-1: Tilpasset verdi av de nødvendige trafikkarakteristikkene gitt for de ulike trafikkstrømsmodellene.	76
Tabell 9-2: Oversikt over trafikkvolum, hastighet og tetthet for hver av de 3 situasjonene.	82
Tabell 9-3: Sjokkbølgehastigheter mellom de 3 ulike situasjonene.	83
Tabell 12-1: Oversikt over høyde- og lengdemål ved Sluppenrampene. Start- og slutthøyde er relatert til høyden ved begynnelsen av avkjøringsrampen fra E6 syd, som settes som nullreferanse.	101
Tabell 12-2: Frekvens og oppholdstid med tilhørende standardavvik for bussavgangene mellom Tonstad og Trondheim sentrum. I perioden 06:30-07:00 er tallene basert på avgangsfrekvens hentet fra AtB. I perioden 07:00 – 08:30 er tallene basert på manuelle registreringer som har en større nøyaktighet, da AtB oppgir rutetider på hele minutter.	103
Tabell 12-3: Tidtabell fra AtB for avganger fra Kroppanbrua bussholdeplass til E6 Omkjøringsvegen gjennom morgenrushet.	104
Tabell 13-1: Originale og endelige verdier for Distance Zone Variability (DZV) og Distance Zone 1 og 2 (DZ1, DZ2).	107
Tabell 13-2: Resultatet av 39 ulike kjøring med 2 til 40 replikasjoner. Første kjøring med stabil feil under 10, 9 8,7 og 6 sekunder er fremhevet i grønt.	111
Tabell 13-3: Sammenligning av gjennomsnittlig reisetid for hvert tidsintervall hentet fra simuleringsmodellen og virkelige registreringer.	116
Tabell 13-4: Andel reisetidsregistreringer fra modellen som ligger innenfor ekstremalverdiene for hvert tidsintervall ved forskjellige antall replikasjoner.	117

Figurliste – Artikkel

Figur 1: Illustrasjon av området på Sluppen med avstand fra avkjøringsrampen til et utvalg interessepunkter.	2
Figur 2: Registreringer av trafikkvolum mot E6 Omkjørings-vegen fra bomsnittet på Tonstad (kvartersoppløsning) og de manuelle videoregistreringene (5-minutters oppløsning). Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.	4
Figur 3: Gjennomsnittlig reisetid gjennom morgenrushet fremstilt sammen med registrerte ekstremalverdier i hvert intervall. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt med 5-minutters oppløsning.	4
Figur 4: Illustrasjon av innvirkningen en flaskehals har på forholdet mellom volum, hastighet og tetthet ved ulike lokasjoner fremstilt ved bruk av en Greenshield-tilnærming (May, 1990, s. 288).....	4
Figur 5: Sammenhengen mellom volum, hastighet og tetthet for de definerte delstrekningene, basert på estimer, illustrert sammen med sluttpunktene på de ulike delstrekningene. Punktene viser gjennomsnittlige kvartersverdier for et døgn og er fremstilt sammen med en tilpasning til trafikkstrømsmodellen Northwestern, presentert av Drake et al. (1967).	5
Figur 6: Illustrasjon av situasjon 1, saktegående kjøretøy på avkjøringsrampen.	6
Figur 7: Illustrasjon av situasjon 2, kjøretøy som tvinger frem luker i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen.....	7
Figur 8: Illustrasjon av situasjon 3, busser som fletter sammen med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt.	8
Figur 9: Illustrasjon av situasjon 4, busser som krysser gjennom eller reduserer hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøring til bussholdeplassen.....	8
Figur 10: Illustrasjon av situasjon 5, kjøretøy som legger seg inn i eller rett før oppløsningsfronten....	9
Figur 11: Reisetid mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen fra de ulike replikasjonene og ekstremalverdiene fra de virkelige reisetidsregistreringene, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.	11
Figur 12: Gjennomsnittlig reisetid mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen fra modell og virkelige registreringer, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.....	12

Figur 13: Gjennomsnittlig hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru fra virkelige registreringer og modellen, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.	12
Figur 14: Reisetid ved de ulike tiltakene, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.	14

Tabelliste – Artikkel

Tabell 1: Oversikt over de 5 observerte situasjonene på Sluppen.....	6
--	---

DEL 1: PROSESSRAPPORT

1 Innledning

En flaskehals er definert som et ledd som sinker eller stanser en prosess. De resterende leddene blir hindret i å fungere fullgodt ved at flaskehalsen har lavere kapasitet enn det resterende systemet (Store norske leksikon, 2009). I en trafikksammenheng blir flaskehalsen et punkt eller en strekning som markerer overgangen mellom to kapasitetsgrenser, der kapasiteten nedstrøms ikke er tilstrekkelig for å betjene etterspørselen. Dette medfører at trafikken samler seg oppstrøms for flaskehalsen. Avhengig av forskjellen mellom kapasitet og etterspørsel vil flaskehalsen kunne skape avviklingsproblemer av ulik grad. Det er bred enighet om at dårlig trafikkavvikling er et samfunnsproblem som bør løses. Utfordringen med flaskehals er at alle er unike, og generelle løsninger må i mer eller mindre grad tilpasses hver situasjon individuelt. For å øke forståelsen rundt fenomenet er derfor behov for å kartlegge hva som skjer og hvordan dette kan påvirkes.

Videre vil avkjøringsrampen fra E6 i nordgående retning på Sluppen i Trondheim, vist i figur 1-1, benyttes som et caseområde. Her består E6 av tre kjørefelt i retning Trondheim sentrum, med en ettfelts avkjøringsrampe mot E6 Omkjøringsvegen, som er hovedfartsåren utenom Trondheim sentrum. Avkjøringsrampen kan kategoriseres som en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger. Flaskehalsen aktiveres når etterspørselen overstiger kapasiteten, gjennomstrømningen i selve flaskehalsen optimaliseres og det dannes kø oppstrøms (Transportation Research Board, 2016).

I et område med en flaskehals med konstant kapasitet vil punktet på strekningen med lavest kapasitet alltid utgjøre den fysiske flaskehalsen. Når flaskehalsen aktiveres vil det bli en trafikkansamling oppstrøms, mens trafikken nedstrøms er i et friflytsregime (May, 1990). Samtidig vil situasjoner som oppstår i området kunne redusere kapasitetsutnyttelsen midlertidig. Dette kan sammenlignes med en midlertidig trafikal flaskehals. Hvis det faktiske trafikkvolumet gjennom den fysiske flaskehalsen reduseres til under kapasiteten vil kødannelsen oppstrøms kunne forsvinne og skjule flaskehalsen (Transportation Research Board, 2016).

Trafikksituasjonen på Sluppen er kompleks og mange faktorer spiller inn i det totale trafikkbildet. Både person- og næringstransportene beskriver vegsystemet på Sluppen som en flaskehals med store forsinkelser i trafikken, spesielt i rushperiodene (Langaas et al., 2008).

Med utgangspunkt i dette ble målsetting med oppgaven og forskningsspørsmål formulert. Dette presenteres videre sammen med en gjennomgang av rapportens oppbygging.



Figur 1-1: Oversiktsbilde av dagens utforming på Sluppen fra en nordøstlig retning (Kilde: Langaas et al., 2008).

1.1 Målsetting og forskningsspørsmål

Trafikksituasjonen på Sluppen er en kompleks sammensetning av det fysiske systemet i kombinasjon med trafikantadferd og miljøpåvirkninger, noe som gjør det utfordrende å kartlegge hvilke faktorer som gir størst innvirkning på den totale trafikkavviklingen i og oppstrøms for avkjøringsrampen. Det finnes lite tidligere forskning som kan forklare den samlede problemstillingen knyttet til avkjøringsrampen på Sluppen. Likevel kan eksisterende modeller og teorier benyttes for å se på generaliserte delhendelser. Målsettingen med denne oppgaven er derfor å beskrive, forklare og modellere dagens situasjon.

Gjennom beskrivelsen vil de ulike faktorene som er med på å forme dagens trafikksituasjon kartlegges. Videre skal en trafikkteknisk analyse av disse faktorene og en mikroskopisk simuleringsmodell benyttes til å forklare avviklingsproblemene. Med bakgrunn i dette er følgende to forskningsspørsmål formulert:

«Hvilke faktorer innvirker i størst grad på den totale trafikkavviklingen på Sluppen?»

«I hvor stor grad er det mulig å gjenskape dagens trafikksituasjon i en modell?»

Det skal også gjennomføres en kartlegging av potensielle tiltak som kan gjennomføres for å redusere innvirkningen fra de ulike faktorene og bedre eller løse avviklingsproblemene på Sluppen. Med utgangspunkt i dette er et tredje forskningsspørsmål formulert:

«Er det behov for omfattende endringer i de fysiske løsningene, eller vil mindre tiltak kunne gi tilsvarende eller bedre effekt?»

Muligheten for å generalisere resultatene for bruk i lignende situasjonsvurdering vil også bli diskutert. Oppgaveteksten er gjengitt i vedlegg 1.

1.2 Rapportens oppbygging

Rapporten er delt inn i to hoveddeler, en prosessrapport og en vitenskapelig artikkel. Prosessrapporten er presentert i Del 1 og gir en utfyllende beskrivelse av prosessen og arbeidet som ligger bak den etterfølgende vitenskapelige artikkelen, presentert i Del 2. På den måten vil de to delene utfylle hverandre.

Prosessrapporten begynner med fire innledende kapitler der en innledning med bakgrunn og forskningsspørsmål presenteres, etterfulgt av en beskrivelse av metoden, et definisjonskapittel knyttet til flaskehals og en beskrivelse av caseområdet. For å strukturere innholdet, er prosessrapporten videre delt i tre deler, Del A – C.

Del A presenterer beskrivelsen og forklaringen av dagens trafikksituasjon på Sluppen, og åpner med et beskrivelseskapittel. Videre inkluderes en gjennomgang av datainnsamlingen, samt etterfølgende analyser. Delen inneholder også en teoridel som tar for seg aktuelle trafikkteoretiske modeller som kan benyttes for å forklare eller illustrere trafikksituasjonen. Til slutt er to av teoriene benyttet for å danne grunnlag til forklaringen.

Del B omhandler modelleringsprosessen. Her presenteres mikrosimuleringsverktøyet Aimsun sammen med en gjennomgang av aktuelle delmodeller i programvaren. Videre beskrives oppbyggingen av modellen og det etterfølgende arbeidet med verifisering, kalibrering og validering. I hvor stor grad det er mulig å gjenskape dagens trafikksituasjon i en modell presenteres gjennom et avsluttende kapittel.

Del C tar for seg behovet for tiltak og begynner med en introduksjon til eksisterende planer i området, etterfulgt av en presentasjon av mulige tiltak. Videre inkluderes en gjennomgang av prosessen knyttet til modellering av tiltakene etterfulgt av en endelig vurdering av behovet.

Prosessrapporten avsluttes med et kapittel knyttet til muligheten for å generalisere problemstillingen, etterfulgt av en oppsummerende konklusjon og forslag til videre arbeid.

Den vitenskapelige artikkelen inneholder en introduksjon, etterfulgt av en kort gjennomgang av datainnsamlingen og en presentasjon av dagens situasjon. Videre følger en kort introduksjon til modelleringen før resultatene presenteres og diskuteres. Modellering av utvalgte tiltak er også inkludert, etterfulgt av en kort diskusjon om behovet. Til slutt kommer en diskusjon knyttet opp mot muligheten for å generalisere problemstillingen, etterfulgt av en avsluttende konklusjon.

I slutten av rapporten er også utvalgte dokumenter lagt ved som en utdypning og et supplement til de to delene.

2 Metode

Gjennom masteroppgaven var det nødvendig å gjennomføre både kvalitative og kvantitative analyser for å besvare de definerte forskningsspørsmålene. E6 i nordgående retning på Sluppen, Trondheim, ble valgt ut som caseområde der de trafikale utfordringene knyttet til avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen ble kartlagt.

Høsten 2016 ble det i forbindelse med forprosjektet gjennomført videoregistreringer av analyseområdet under morgenrushet. I løpet av våren 2017 ble videomaterialet manuelt analysert, der det var ønskelig å avdekke blant annet trafikkfordelingen, tungbilandel og trafikantadferd. I tillegg ble det inngått et samarbeid med Statens vegvesen om tilgjengeliggjøring av data hentet fra trafikkregistreringsstasjoner og bomsnitt innenfor analyseområdet, samt reisetidsregistreringer mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen. Detaljert gjennomgang av datainnsamlingen følger i kapittel 6.

For å avdekke de ulike faktorene som innvirket på trafikkavviklingen på Sluppen ble det gjennomført analyser av datagrunnlaget og et utvalg trafikkteoretiske modeller ble benyttet. Kapittel 8 gir en innføring i de aktuelle teoriene.

Resultatene ble videre benyttet som inngangsdata og kontrollverdier gjennom oppbyggingen av mikrosimuleringsmodellen i Aimsun. Da modellen skulle være en spesialtilpasning av de lokale forholdene på Sluppen, var det nødvendig å undersøke hvilke potensial som forelå i programmet. Dette ble gjort ved bruk av brukermanualen til Aimsun 8.2 (Transport Simulation Systems, 2017). En detaljert gjennomgang av programmet og aktuelle delmodeller følger i kapittel 11.

Gjennom kalibrering- og valideringsfasen var det nødvendig å benytte både kvalitative og kvantitative vurderinger før modellen kunne benyttes som grunnlag for videre kartlegging av potensielle tiltak for analyseområdet. Aktuelle metoder og retningslinjer for kriterier og akseptmål ble kartlagt gjennom et litteraturstudie. Da modellen var av liten utstrekning og kompleksitet ble det valgt å tilpasse valideringskravene i henhold til modellens fokusområde. De utvalgte metodene og tilpasningen av disse er presentert i sin helhet i kapittel 13.

Valg av tiltak for implementering i modellen ble basert på kartleggingen av hvilke faktorer som bidro i størst grad til å redusere avviklingskvaliteten gjennom morgenrushet. For å kunne se resultatene fra analysene i en større sammenheng for området ble det også gjennomført en kartlegging av eksisterende og kommende planer som kunne innvirke på trafikkstrømmene i analyseområdet. Dette

ble gjort ved bruk av offentlige dokumenter som kommunedelplaner og konsekvensutredninger for området. En gjennomgang av de aktuelle planene er presentert i kapittel 15.

Ved endt kartlegging av innvirkningen fra de utvalgte faktorene som i størst grad bidro til å redusere avviklingskvaliteten i analyseområdet, ble resultatene generalisert for å bedre forståelsen av denne typen flaksehalser. Videre ble det gjennomført et litteraturstudie for å sammenligne resultatene fra analyseområdet med resultater fra tidligere analyser av tilsvarende problemstillinger. På denne måten kunne det trekkes paralleller til likheter og forskjeller. Sammenligningen er presentert i kapittel 19.

3 Flaskehals - definisjonskapittel

I trafikken er det flere forskjellige flaskehals der det av ulike årsaker oppstår avviklingsproblemer. Vanlige former for flaskehals er reduksjon av antall kjørefelt langs hovedveger, av- og påkjøringsramper og kryssløsninger. Flere av flaskehalsene er likevel vanskelige å identifisere.

Avhengig av egenskaper og lokasjon vil en flaskehals kunne være aktiv eller skjult. I følge Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016) må tre kriterier oppfylles for at en flaskehals skal være aktiv:

1. Forholdet mellom etterspørsel og kapasitet (vd/c) må være større enn 1,0
2. Forholdet mellom virkelig trafikkvolum og kapasitet (va/c) er lik 1,0
3. Det er oppstrøms kødannelse

Det virkelige trafikkvolumet vil dermed være et resultat av flaskehalsens kapasitet. Aktive flaskehals vil komme tydelig frem i trafikkbilde som strekninger med stor kødannelse oppstrøms, og er enkle og identifisere.

På samme måte som for de aktive flaskehalsene definerer Highway Capacity Manual også tre kriterier som må oppfylles for at en flaskehals skal være skjult:

1. Forholdet mellom etterspørsel og kapasitet (vd/c) må være større enn 1,0
2. Forholdet mellom virkelig trafikkvolum og kapasitet (va/c) er typisk lavere eller lik 1,0
3. Ingen oppstrøms kødannelse

Kriteriene fører til at det virkelige trafikkvolumet vil være definert av en aktiv oppstrøms flaskehals. Flaskehalsen vil dermed bli vanskelig å identifisere, da den ikke kommer tydelig frem i trafikkbilde gjennom kødannelse.

Hvis den aktive flaskehalsen blir fjernet vil den skjulte flaskehalsen kunne omgjøres til en aktiv flaskehals ved at trafikkvolumet gjennom flaskehalsen øker og fører til at va/c blir 1,0 og skaper oppstrøms kødannelse. Ved utarbeidelse av tiltak for å bedre trafikkavviklingen i et område med aktive flaskehals vil det være viktig å kjenne til de skjulte flaskehalsene i tillegg, da disse vil kunne aktiveres ved økt gjennomstrømning oppstrøms.

Gjennom en flaskehals vil trafikkavviklingen avhenge av forholdet mellom tilbud og etterspørsel, der resultatet gjenspeiles i forholdet mellom trafikkvolumet som entrer og forlater nettverket. Hvis den totale etterspørselen er lavere enn nettverkskapasiteten vil trafikkvolumet som forlater nettverket være lik etterspørselen, korrigert for tidsforskyvelser gjennom nettverket. Hvis den totale

etterspørselen overstiger nettverkskapasiteten vil trafikkvolumet som forlater nettverket reduseres. En videre vekst vil da øke antallet kjøretøy i nettverket og føre til en videre reduksjon i trafikkvolum som forlater nettverket. (Wang et al., 2016)

Denne sammenhengen er også beskrevet av Arnott (2013) gjennom en badekarsanalogi, der trafikkvolumet som entrer nettverket korresponderer med vannet som fyller opp badekaret og trafikkvolumet som forlater nettverket korresponderer med vannet som renner ut. På denne måten vil høyden på vannet representere tettheten.

Trafikkvolumet som forlater nettverket gjennom en flaskehals begrenses gjennom en lav kapasitet. Kapasitet kan defineres på flere ulike måter, men en vanlig definisjon er:

“The maximum sustainable hourly flow rate at which persons or vehicles reasonably can be expected to traverse a point or a uniform section of a lane or roadway during a given time period under prevailing roadway, environmental, traffic, and control conditions.” (Transportation Research Board, 2016, s. 9-4)

Denne definisjonen innebærer at gjeldende kjøreadferd, værforhold og trafikale forhold er med på å definere kapasiteten til enhver tid. Dette gjelder derimot ikke hvis nedstrøms kapasitetsbegrensninger fører til tilbakeblokkeringer.

En enklere definisjon av kapasitet er den maksimale ytelseevnen til systemet i form av det maksimale antallet kjøretøy som kan passere gjennom et punkt eller en vegstrekning under optimale forhold. Ved å bruke denne definisjonen vil gjeldende kjøreadferd, værforhold og trafikale forhold legge føringer for hvor mye av den tilgjengelige kapasiteten som benyttes.

Kjøreadferd og værforhold er to av flere faktorer som vil påvirke avviklingskvaliteten gjennom flaskehals. Faktorene kan deles inn i tre grupper: vegrelaterte faktorer, trafikkrelaterte faktorer og andre faktorer (Yamaguchi et al., 2016). De vegrelaterte faktorene omhandler blant annet vegens geometri i form av horisontal- og vertikalgeometri, antall kjørefelt og vegstandard. Eksempler på trafikkrelaterte faktorer er trafikksammensetning, kjørefeltsutnyttelse og kjøremønstre. Andre faktorer innebærer innvirkning fra omgivelsene i form av for eksempel værforhold. Videre vil fokuset rettes mot trafikale faktorer som innvirker på avviklingskvaliteten gjennom flaskehalsen.

Hvis en flaskehals blir aktivert vil kødannelsen oppstrøms kunne forverre en allerede belastet trafikk situasjon. Ved flaskehals på avkjøringsramper vil tilbakeblokkering ut på hovedvegen kunne blokkere oppstrøms avkjøringsramper. Dette vil kunne føre til en forverret kødannelse der kjøretøy på hovedvegen blir fanget i køen for å komme til ønsket rampe (Wang et al., 2016). Det vil også kunne oppstå såkalt *first-in-first-out*-systemer, der køen fra avkjøringsrampen vokser over alle kjørefeltene på hovedvegen og fanger alle trafikkstrømmene i køen (Muñoz og Daganzo, 2002).

I videre kartlegging av flaskehalsen i caseområdet vil kapasitet være definert som den forventede maksimale gjennomstrømningen i et punkt eller på en strekning, gitt av nettverket. Dette innebærer at kapasiteten defineres av faktiske registreringer på strekningen der trafikkstrømmen opererer under optimale forhold. Da trafikk er en kompleks sammensetting av det fysiske systemet i kombinasjon med trafikantadferd og miljøpåvirkninger vil de optimale forholdene kun være gjeldende over korte perioder. Oppløsningen på registreringene vil derfor ha stor betydning for hvilke kapasitetsmål som avdekkes i det fysiske nettverket. Valg av oppløsning vil avhenge av ønsket detaljgrad på innvirkningen fra de ulike komponentene i trafikken.

Alle overnevnte faktorer vil inngå i den gitte kapasitetsgrensen, men ved å sette en øvre verdi for hva vegsystemet kan håndtere vil det i større grad være mulig å se på hvilke innvirkninger de ulike

faktorene har alene og i kombinasjon. I perioder kan sesongvariasjoner i værforholdene kunne innvirke på den generelle trafikantadferden, og anses som en dominerende faktor i trafikkbildet. Det vil da være mulig å se i hvor stor grad disse forholdene påvirker utnyttelsen av kapasiteten på en strekning, der førere må tilpasse seg de nye forholdene. Videre vil det også være mulig å benytte egne kapasitetsgrenser for langvarige karakteristiske perioder som innvirker på trafikkavviklingen.

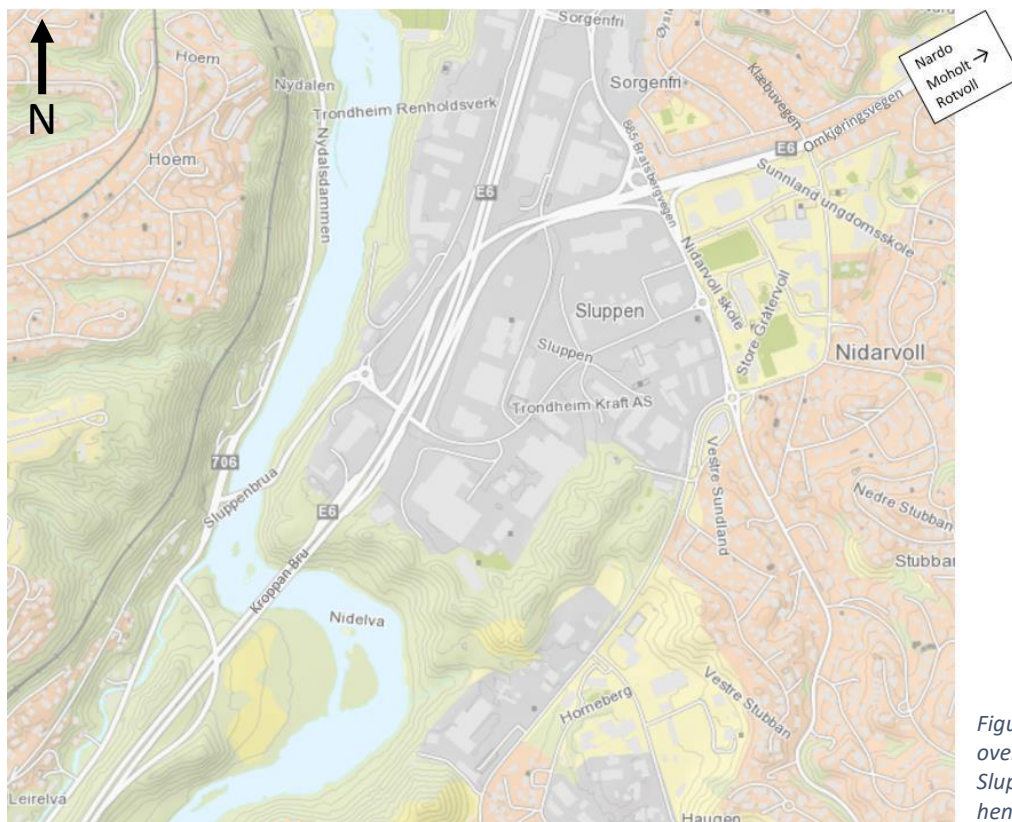
Kapasiteten vil følgelig forbli dynamisk, men vil i større grad kunne relateres til perioder med tilnærmet like miljøpåvirkninger. Hvis kapasiteten satt for et nettverk overskrides viser dette til at den gjeldende verdien ikke gjenspeiler potensialet som foreligger i nettverket og må korrigeres i henhold til de nye registreringene.

4 Caseområde

E6 i nordgående retning på Sluppen og avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen vil fungere som caseområde for videre analyser av flaskehalsproblematikk på avkjøringsramper. Videre følger en beskrivelse av området gjennom den historiske utviklingen, dagens fysiske og trafikale situasjon, samt en gjennomgang av uttalelser om området.

4.1 Historisk utvikling

E6 Omkjøringsvegen ble originalt bygget som en 2-felts riksveg mellom Sluppen og Rotvoll. Etter mange år med trafikkvekst, køproblemer og trafikkulykker ble vegen utvidet til en firefeltsveg. Strekningen fra Sluppen til Klæbuvegen var andre byggetrinn i denne utvidelsen og sto ferdig i 1997. Da var allerede strekningen fra Klæbuvegen, via Nardo skole til Moholt ferdig utvidet. (Grut et al., 2002)



Figur 4-1: Oversiktskart over dagens situasjon på Sluppen. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket)

E6 syd fikk den traséen den har i dag etter at den østre delen av Kroppan bru sto ferdig i 1975. Da hadde strekningen et kjørefelt i hver retning. Senere ble vege utvidet, og broa fikk 3 kjørefelt. Et kjørefelt i hver retning, pluss et midtfelt der kjøreretningen ble reversert med lyssignaler i morgen og ettermiddagsrushet. I 1990 sto vestre bru ferdig, og Kroppan bru besto av to bruer med 3 kjørefelt på hver. (Grut et al., 2002)

Det første krysset på Sluppen ble bygd i 1966/67 og var et ordinært kanalisert T-kryss. Dette krysset lå uendret frem til 1974/75 da Kroppan bru sto ferdig, og dagens kryssløsning med avkjøringsramper og bro over E6 ble konstruert. Krysset ble ikke endret under utvidelsen av E6 syd, men på begynnelsen av 90-tallet ble bruløsningen i sørgående retning utvidet til to felt sånn som den er i dag. Selv om E6 Omkjøringsvege ble bygget ut til 4 felt ble ikke kapasiteten på av- og påkjøringsrampene økt. Like etter dagens kryssløsning sto ferdig ble det anlagt busslommer på nordsiden av Kroppan bru. (E-post korrespondanse 25.11.2016 med Erik Jørgen Jølsgard, Seksjonsjef Plan- og trafikkseksjonen Sør-Trøndelag, Statens vegvesen)

4.2 Dagens fysiske situasjon

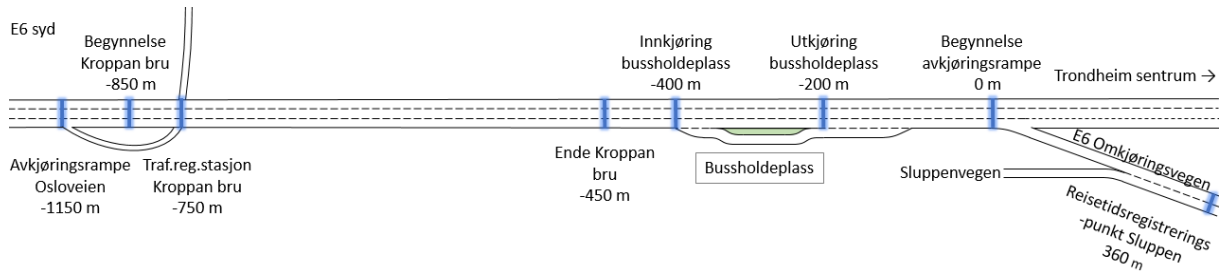
I dagens situasjon har E6 syd 3 felt i nordgående retning over Kroppan bru. På Sluppen deles disse videre i en ettfelts avkjøringsrampe til E6 Omkjøringsvege og tre felt, hvorav et kollektivfelt, videre på E6 mot Trondheim sentrum. Avkjøringen til E6 Omkjøringsvege møtes videre av en påkjøringsrampe fra Sluppenvege. Disse to kjørefeltene fortsetter sammen og danner de to nordgående kjørefeltene på E6 Omkjøringsvege. Rampeutformingen på Sluppen er vist i figur 4-2.



Figur 4-2: Rampeutformingen på Sluppen. Bildet er tatt mot nord. (Foto: R. Kjelsberg)

På E6 syd er fartsgrensen satt til 80 km/t. Denne er gjeldende frem til E6 Omkjøringsvegen begynner og fartsgrensen reduseres til 70 km/t. Krysset mellom Sluppenvegen og påkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen er utformet som et T-kryss der fartsgrensen på Sluppenvegen er 60 km/t. Ved påkjøringsrampens begynnelse heves denne til 70 km/t.

Lengdemålene for utvalgte punkter langs strekningen er hentet ved bruk av metreringsverdier fra Nasjonal Vegdatabank (NVDB) tilgjengeliggjort av Statens vegvesen gjennom vegkart.no. Lengdene er presentert som avrundede estimater i figur 4-3 og benytter begynnelsen av rampen til E6 Omkjøringsvegen som nullreferansen.



Figur 4-3: Illustrasjon på lengdemål for interessepunkter langs analyseområdet relatert til begynnelsen av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Figuren er ikke i målestokk.

Ca. 300 meter før avkjøringsrampen på Sluppen er Kroppanbrua bussholdeplass lokalisert. Denne er utformet som en 2-felts busslomme med fysisk skille mot den resterende trafikken på E6. For å komme fra bussholdeplassen og tilbake ut på E6 er det et eget akselerasjonsfelt der bussen er den vikende parten. Utformingen er vist i figur 4-4.



Figur 4-4: Utforming av bussholdeplassen på Sluppen (Hentet fra Norge i Bilder)

4.3 Dagens trafikksituasjon

I 2016 ble årsdøgntrafikken (ÅDT) på E6 i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen målt til 47806 kjt/døgn (Statens vegvesen, 2017). Denne målingen gjelder for begge kjøreretninger samlet. Basert på en antakelse om at belastningen er lik i nord- og sørgående retning vil ÅDT i den aktuelle kjøreretningen være ca. 23 900 kjt/døgn. På samme tid viser registreringer fra bomstasjonen på Tonstad at den korresponderende yrkesdøgntrafikken (YDT) er i størrelsesorden 30 000 kjt/døgn.

Kroppanbrua bussholdeplass er definert som et knutepunkt, som muliggjør omstigning mellom ruter til og fra E6 Omkjøringsvegen og Trondheim sentrum. Knutepunktet betjener i dag 18 forskjellige ruter med til sammen 743 avganger per dag. De ulike rutene betjener daglig 1773 påstigende passasjerer. (Sollie et al., 2016)

I morgenrushet ligger trafikkvolumet på E6 i nordgående retning i overkant av 3 000 kjt/t. Utformingen av kryssløsningen på Sluppen stemmer dårlig overens med trafikkfordelingen, da ca. 2/3 av trafikken fra E6 syd skal til E6 Omkjøringsvegen, mens kun 1/3 av trafikken fortsetter videre mot Trondheim sentrum (Statens vegvesen, 2010). For å posisjonere seg, velger størsteparten av kjøretøyene som skal videre på E6 Omkjøringsvegen å benytte høyre kjørefelt. Dette skaper en tett trafikkstrøm i høyre kjørefelt, samtidig som de to andre kjørefeltene belastes i liten grad. Avkjøringen fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen utgjør på bakgrunn av dette en betydelig flaskehals i trafikkbildet på Sluppen.

4.4 Uttalelser om området

Det er et stort engasjement rundt trafikksituasjonen på Sluppen. Senest 21. mai 2017 ble det publisert et debattinnlegg i Adresseavisen om kjøreadferden over Kroppan bru mot E6 Omkjøringsvegen. Der skrev bussjåføren Per Erik Kufås:

“Biler i 80-90 km/t raser over brua i midt- og venstrefelt og kaster seg inn i høyrefila opp mot Omkjøringsvegen, selv om køa i høyrefeltet går i 70 og 80. Helt utrolig.” (Kufås, 2017)

I debatten kom det videre frem at oppfatningen rundt de sene feltskiftene var todelt. Den ene gruppen var sterkt imot adferden, og mente det skapte trafikkfarlige situasjoner og kødannelse. Den andre gruppen argumenterte for at det allerede var luker i trafikken da flere kjøretøy i trafikkstrømmen holdt alt for stor avstand til kjøretøyet foran. Det sene feltskiftet førte dermed ikke til forstyrrelser, men utnyttet kun muligheter som allerede var der.

Konflikter med bussene på veg ut fra bussholdeplassen ble også trukket frem som trafikkfarlige situasjoner som skapte stor nedbremsing, da bussene ikke overholdt vikeplikten.

I tidligere utredninger av området er trafikksituasjonen beskrevet som kompleks, med mange faktorer som spiller inn i det totale trafikkbildet. Både person- og næringstransportene beskriver vegsystemet på Sluppen som en flaskehals med store forsinkelser, spesielt i rushperiodene (Langaas et al., 2008).

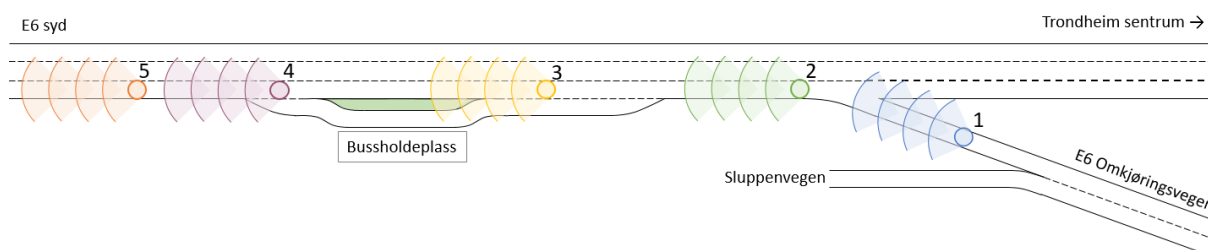
Del A:
Beskrive og forklare

5 Beskrivelse

I et område med en flaskehals med konstant kapasitet vil punktet på strekningen med lavest kapasitet alltid utgjøre den fysiske flaskehalsen. Når flaskehalsen aktiveres vil det bli en trafikkansamling oppstrøms, mens trafikken nedstrøms er i et friflytsregime (May, 1990). Samtidig vil situasjoner som oppstår i området kunne redusere kapasitetsutnyttelsen midlertidig. Dette kan sammenlignes med en midlertidig trafikal flaskehals.

Observasjoner av caseområdet viser at den fysiske flaskehalsen er selve avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen der kapasiteten er betydelig lavere enn etterspørselen i morgenrushet. Grunnet utformingen av vegsystemet tvinges kjøretøyene som skal til avkjøringsrampen å samle seg i høyre kjørefelt for å ikke miste avkjøringen. Dette gjør at kapasiteten oppstrøms for avkjøringsrampen kan tilnærmes kapasiteten av ett kjørefelt, som er den samme kapasiteten som i selve flaskehalsen. Forenklet sett vil utstrekningen av den fysiske flaskehalsen være forlenget. Dette gjør området veldig sårbart for situasjoner som kan forstyrre trafikkstrømmen og redusere kapasiteten ytterligere gjennom midlertidige trafikale flaskehals.

Basert på observasjoner er det 5 situasjoner som er med på å skape og forverre trafikksituasjonen gjennom å danne sjokkbølger som forplanter seg bakover i trafikken. Hvor disse oppstår er illustrert i figur 5-1 og er videre beskrevet i tabell 5-1.

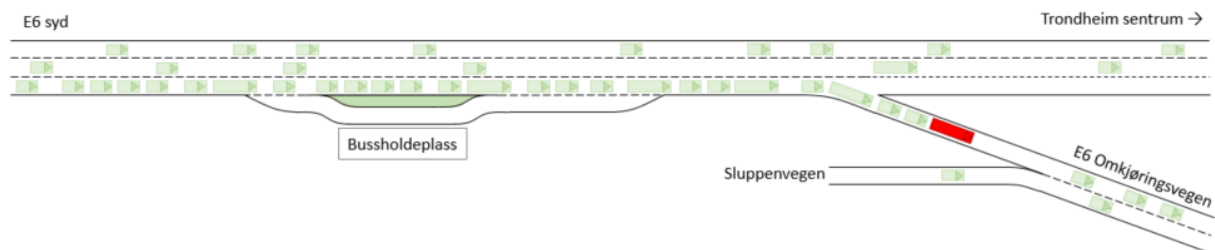


Figur 5-1: Illustrasjon av hvor de 5 situasjonene som er med på å skape og forverre trafikksituasjonen på Sluppen oppstår.

Tabell 5-1: De 5 situasjonene illustrert i figur 5-1.

Situasjon	Beskrivelse
1	Saktegående kjøretøy på avkjøringsrampen
2	Kjøretøy som tvinger frem luker i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen
3	Busser som fletter sammen med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt
4	Busser som krysser gjennom eller reduserer hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøring til bussholdeplassen
5	Kjøretøy som legger seg inn i eller rett før oppløsningsfronten

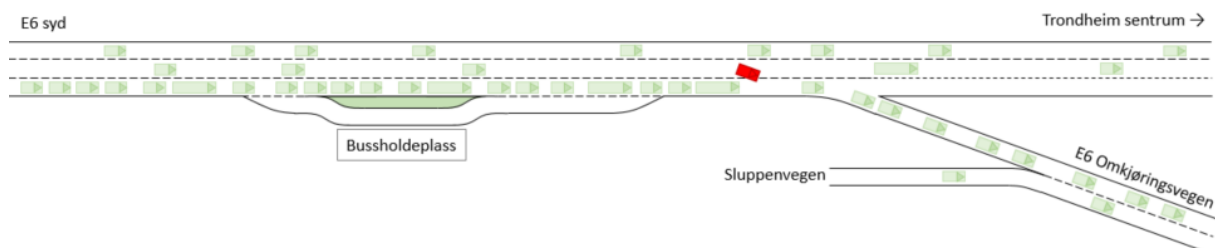
Den første situasjonen skapes av trafikken på selve rampen. Her er det en liten stigning, noe som gjør at enkelte kjøretøy, spesielt tyngre, med lav hastighet sliter med å akselerere oppover bakken. Påvirkningen dette har på den resterende trafikken er illustrert i figur 5-2.



Figur 5-2: Illustrasjon av situasjon 1, saktegående kjøretøy på avkjøringsrampen.

Konsekvensene av situasjon 1 blir dermed at kjøretøy lenger bak må bremse ned rett i forkant av rampen. Disse vil igjen kunne få utfordringer med å holde følge med trafikken opp bakken. En annen negativ konsekvens er at hastigheten på selve rampen blir lavere, noe som igjen kan resultere i at et lavere trafikkvolum greier å passere gjennom flaskehalsen. I tilfeller med stor trafikk fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen vil kjøretøyene fra E6 syd kunne få utfordringer med å legge seg over i høyre kjørefelt etter at de kommer inn på E6 Omkjøringsvegen. Hvis dette samtidig er kjøretøy som holder en lav hastighet vil de kunne hindre trafikken bak seg over en lengre strekning, og kunne forlenge varigheten av situasjonen.

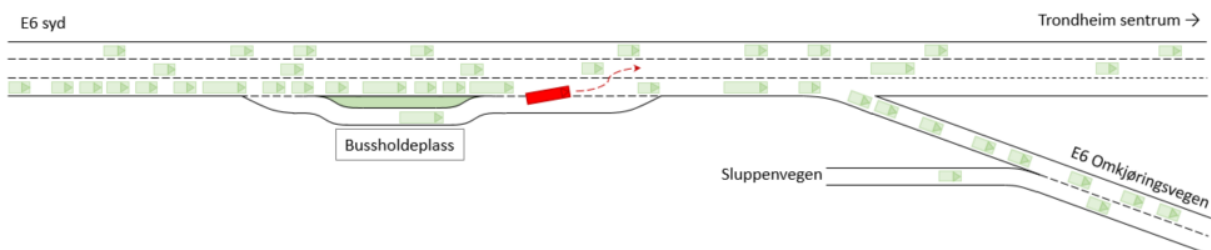
Den andre situasjonen er kjøretøy som legger seg i midtre felt, kjører forbi den tette trafikken i høyre kjørefelt, for til slutt å tvinge seg inn i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen. Disse kjøretøyene kutter trafikkstrømmen, og tvinger frem en luke som i utgangspunktet ikke er der. Situasjonen er illustrert i figur 5-3.



Figur 5-3: Illustrasjon av situasjon 2, kjøretøy som tvinger frem luker i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen.

Observasjoner viser at denne typen manøver typisk skjer foran tungtransport, da disse holder noe større luke en personbilene. Hyppigheten øker også med økt kødannelse oppstrøms i høyre kjørefelt, noe som trolig har en sammenheng med sjåførens oppfatning av økt innspart tid på strekningen. Resultatet av feltskiftet blir ofte stor nedbremsing for bakenforliggende kjøretøy, noe som reduserer den totale avviklingskvaliteten til trafikkstrømmen i høyre felt. Da hendelsen oppstår sporadisk kan den for mange komme som et overraskelsesmoment. Dette gjør at flere kjøretøy kan overkompensere, og på den måten forverre den totale situasjonen.

Den tredje situasjonen omhandler busser som kommer ut av bussholdeplassen. Disse må flette med trafikken i høyre kjørefelt på E6 syd for å komme seg tilbake på veien. Ved tradisjonell fletting fra akselerasjonsfelt på en flerfeltsveg vil trafikken i høyre kjørefelt ha muligheten til å skifte kjørefelt mot venstre for å gjøre plass til kjøretøyet som kommer fra akselerasjonsfeltet. Dette er derimot ikke tilfellet i denne situasjonen, da trafikken i høyre kjørefelt er «fanget» der for å kunne fortsette videre på E6 Omkjøringsvegen. Selv om det i teorien er bussene som har vikeplikt praktiseres det i stor grad motsatt. Dette gjør at kjøretøyene i høyre kjørefelt ofte bremses kraftig ned for å slippe frem bussen. Resultatet er en drastisk reduksjon i hastigheten i høyre kjørefelt, som fort forplanter seg bakover i trafikkstrømmen. I tilfeller der tungtransport er involvert blir denne effekten forsterket. Selv om nedbremsingen er stor, bærer situasjonen preg av at bussen er godt synlig for flere kjøretøy bakover i trafikkstrømmen. Observasjoner viste at det i mange tilfeller var en kollektiv tilpasning blant kjøretøyene, og ikke kun en direkte reaksjon på at kjøretøyet foran bremses. Figur 5-4 illustrerer situasjonen som oppstår.



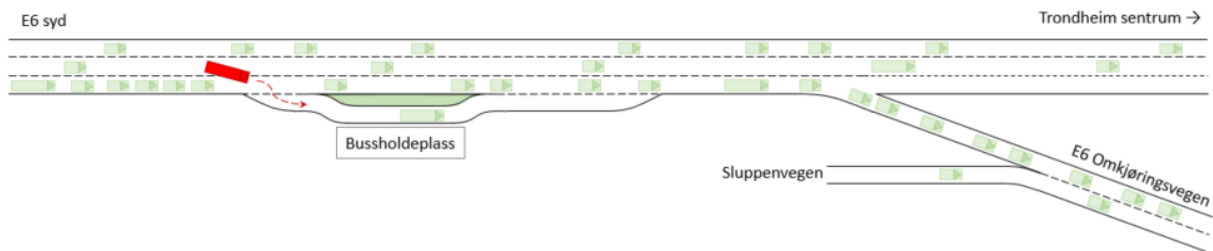
Figur 5-4: Illustrasjon av situasjon 3, busser som fletter sammen med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt.

Når bussen først har kommet over i høyre kjørefelt velger den i de fleste tilfeller å legge seg rett over i det midtre kjørefeltet, da majoriteten av bussene skal fortsette på E6 mot Trondheim sentrum. Dette gjør at kjøretøyene som bremses ned for bussen fort kan akselerere tilbake opp i hastighet ved å tette luken etter bussen. Resultatet er at den saktegående, og i enkelte tilfeller også stillestående, delen av køen får liten fysisk utstrekning, da oppløsningen kan begynne nesten umiddelbart.

Det ble også observert en del tilfeller der bussen som lå i høyre kjørefelt på ulikt vis kom i konflikt med kjøretøy i situasjon 2, da disse ønsket et kryssende feltskifte på samme sted. De fleste bussene valgte da å bli liggende i høyre kjørefelt, da dette ikke hindret dem i å fortsette i riktig retning, men kun reduserte hastigheten over en kortere strekning. I tilfeller der kjøretøy i situasjon 2 kommer like etter at bussen har gjennomført et feltskifte til midtre kjørefelt vil omfanget av situasjon 2 kunne bli vesentlig redusert, da kjøretøyet kan benytte luken etterlatt av bussen i stedet for å tvinge frem en luke som ikke er der.

Bussen er også årsaken til den fjerde situasjonen, ved at denne må krysse gjennom eller redusere hastigheten i høyre kjørefelt for å komme inn til bussholdeplassen. Praksisen er ulik fra sjåfør til sjåfør, men observasjoner viser at enkelte av bussene velger å legge seg i midtre kjørefelt over Kroppan bru for å slippe å ligge i den saktegående trafikkstrømmen i høyre kjørefelt. Størsteparten av disse skal likevel inn til Kroppanbrua bussholdeplass. Dette gjør at bussene må krysse gjennom den saktegående

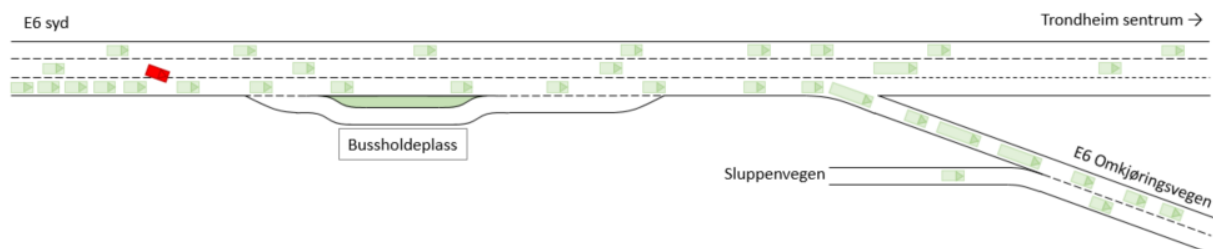
trafikkstrømmen i høyre kjørefelt, noe som resulterer i at de i enkelte tilfeller må stoppe helt opp og tvinge frem en luke. Denne situasjonen er illustrert i figur 5-5.



Figur 5-5: Illustrasjon av situasjon 4, busser som krysser gjennom eller reduserer hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøring til bussholdeplassen.

Trafikkavviklingen oppstrøms for bussholdeplassen blir i stor grad negativt påvirket av manøvrene fra situasjon 4. Samtidig har situasjonen en selvforsterkende effekt, der hyppigheten øker med køens utstrekning i høyre kjørefelt på bruene. På den andre siden vil bussene etterlate seg luker i trafikken som kan redusere konsekvensene av bussene som kjører ut (situasjon 3).

Den femte situasjonen kan i stor grad minne om situasjon 2, da denne også omhandler kjøretøy i midtre kjørefelt som legger seg over i høyre kjørefelt etter at trafikkstrømmen har begynt å tetne til. Forskjellen er at hendelsene som utgjør situasjon 5 skjer på et tidligere tidspunkt. Sjåførene kan sees på som mer passive, og det kan i flere tilfeller virke som de tolker situasjonen som siste mulighet for feltskifte før avkjøringsrampen. Dette er illustrert i figur 5-6.



Figur 5-6: Illustrasjon av situasjon 5, kjøretøy som legger seg inn i eller rett før oppløsningsfronten.

Felles for kjøretøyene i situasjon 5 er at de legger seg over i høyre kjørefelt i eller rett før det punktet i trafikken der sjokkbølgen løses opp. Dette er typisk et område der avstanden mellom kjøretøyene øker noe grunnet hastighetsendringen. Ettersom hastigheten på trafikkstrømmen i høyre kjørefelt typisk er lav, vil kjøretøyet fra midtre kjørefelt måtte senke hastigheten. Dette gjør at kjøretøyet har en nedadgående hastighet i det feltskiftet gjennomføres, i motsetning til trafikkstrømmen i høyre kjørefelt der de har en oppadgående hastighet. Oppløsningen av sjokkbølgen vil dermed kunne forstyrres, og en ny forverret sjokkbølge vil kunne dannes i den allerede eksisterende sjokkbølgen. Hendelsen er likevel sporadisk i en allerede saktegående trafikkstrøm, noe som gjør at de totale konsekvensene av påvirkningen blir lavere. Hyppigheten vil samtidig øke med økt kødannelse på Kroppan bru, av samme årsak som for situasjon 2

6 Datainnsamling

Som grunnlag for videre analyser ble det samlet inn ulike trafikktekniske data fra området på Sluppen. Hvilke data som ble samlet inn og hvordan innsamlingen ble gjennomført er videre presentert. Da trafikk er en kompleks sammensetning av enkeltindividers kjøreadferd begrenset av infrastrukturen og andre kjøretøy, var det ønskelig å avdekke flere aspekter ved trafikken. På bakgrunn av dette er innsamlet data knyttet opp mot trafikkregistreringer, reisetid, trafikantadferd og geometrisk utforming. Datainnsamlingen ble gjennomført ved hjelp av videoregistreringer, registreringer fra trafikkregistreringsstasjoner, bomsnittsregistreringer og reisetidsregistreringer, i tillegg til uthenting av data fra Nasjonal Vegdatabank (NVDB) og andre aktuelle databaser.

Det var ønskelig å gjennomføre datainnsamlingen i samme periode for å få størst mulig grad av overlappende registreringer. Dette lot seg ikke gjøre grunnet tekniske begrensninger. En oversikt over de innsamlede dataene er gitt i tabell 6-1. Videre delkapitler tar for seg gjennomføringen av datainnsamlingen for hver av registreringsalternativene.

Tabell 6-1: Oversikt over hvilke perioder de ulike registreringene dekker.

Data	Oppløsning	Uke og dato	
Videoregistreringer	Enkeltkjøretøy	Uke 40	05.10.16 – 07.10.16
		Uke 42	17.10.16
			19.10.16 - 20.10.16
Trafikkregistreringsstasjon	Timesdata	<u>Kroppan bru:</u>	
		Uke 39-41	01.10.16 - 12.10.16
	Uke 42-44	22.10.16 - 31.10.16	
	<u>Sunnland:</u>	Uke 39-44	01.10.16 - 31.10.16
Enkeltkjøretøy	<u>Kroppan bru:</u>	Uke 42-43	22.10.16 - 25.10.16
		<u>Sunnland:</u>	Uke 40
	Uke 41-42	15.10.16 - 20.10.16	
Bomsnittsregistreringer	Kvartersdata	Uke 37	12.09.16 - 18.09.16
Reisetidsregistreringer	5-minuttersdata	Uke 6-7	06.02.17 - 19.02.17

6.1 Videoregistreringer

Siden innsamling av data knyttet til trafikkantadferd er en tidkrevende prosess med behov for både observasjoner og registreringer, ble disse gjennomført som videoregistreringer i løpet av høsten 2016. Gjennomføringen, sammen med nødvendig forarbeid i form av befaringer og pilotstudie er videre beskrevet i detalj. En oversikt over medgått tid knyttet til befaringer, pilotstudie og gjennomføringen av videoregistreringene er også gitt i vedlegg 2. Etter at det var samlet inn videoer fra området ble det gjennomført manuelle registreringer av trafikken. Videre er også utførelsen av dette beskrevet.

6.1.1 Pilotstudie

Før videoregistreringen ble gjennomført i fullskala var det nødvendig å kartlegge potensialene og begrensningene som forelå i området og den tilgjengelige teknologien. Dette ble gjort gjennom befaringer, samt kartlegging av fysiske og tekniske forhold.

6.1.1.1 Fysiske forhold

Det ble gjennomført flere befaringer med den hensikt å avdekke de trafikale utfordringene i området. Alle befaringene ble gjennomført til fots og med sykkel, da det ikke var mulig å delta aktivt i trafikken selv, grunnet manglende tilgang på bil.

I første omgang ble det kartlagt hvor det ofte oppsto situasjoner som påvirket trafikkavviklingen negativt og hvordan dette forplantet seg oppstrøms i trafikken. Med utgangspunkt i kartleggingen av de trafikale forholdene ble det avklart hvor det var viktig å ha kameradekning. Videre ble potensielle kameraplasseringer vurdert ut ifra de fysiske begrensningene som forelå i området.

Befaringene ble gjennomført på forskjellige dager til ulike tider av døgnet for å få et godt bilde av hvordan lysforholdene og trafikkavviklingen endret seg. Hovedfunnene fra befaringen under morgenrushet satte føringer for hvordan datainnsamlingen skulle gjennomføres videre.

Befaringen som skulle gjennomføres under morgenrushet startet kl. 06.50. Ved oppmøte ble det observert tendenser til sporadisk kødannelse, da det allerede var relativt tett trafikk der én enkelthendelse kunne utløse en sjokkbølge. Det ble likevel vurdert at tidspunktet var egnet til å avdekke de større avviklingsproblemene som var forventet å oppstå litt senere da trafikkmengden og tettheten, samt bussfrekvensen økte. Etter kl. 08:30 ble det observert periodiske trafikkstrømmer over Kroppan bru, som trolig skyldes lysreguleringen før påkjøringsrampen ved Tonstadkrysset, ca. 3 km sør for Sluppen. Trafikkmengden ble videre vurdert som for liten til å kunne danne nevneverdige avviklingsproblemer på Sluppen.

Forhold som dekningsgrad, siktlinjer og trafiksikkerhet gir føringer for hvor kameraene kan plasseres. I forhold til siktlinjer var de største utfordringene knyttet til vegetasjon, terreng, veglinjens horisontale kurvatur og kjøretøy i motgående retning som periodevis dekket interesseområdet. I kombinasjon med ønsket dekning av området satte dette flere begrensninger i forhold til hvor kameraene kunne monteres. Det ble også klart at det var nødvendig å montere kameraene så høyt som mulig for i større grad å unngå forstyrrende momenter, samt få en bedre oversikt over de ulike kjøretøyenes feltplassering.

Området på Sluppen er i størst grad tilrettelagt for motorkjøretøy, da store arealer gjøres lite tilgjengelig for gående grunnet planfrie kryssløsninger. Området er også delt av en sterkt trafikkert motorveg der det eneste krysningsspunktet for gående er ved Sluppenvegen som går under motorvegen. På bakgrunn av dette ble det derfor vurdert som ikke trafiksikkerhetsmessig forsvarlig å henge opp kameraer i lyktestolpene ved midtdelene eller der rampen og hovedvegen inn mot sentrum splittes. Dette er områder med dårlig tilgjengelighet i tillegg til at trafikanter ikke er vant til at mennesker oppholder seg der, som videre kan gjøre det til et forstyrrende moment i trafikkbildet.

6.1.1.2 Kameraspesifikasjoner

Etter at de fysiske forholdene var kartlagt var det behov for å se på om de teknologiske mulighetene med kameraene kunne sette begrensninger for hvor tilgjengelig monteringsstedene måtte være.

For å gjennomføre videoregistreringene ble tre Garmin VIRB XE-kameraer, som vist i figur 6-1, benyttet. Dette er små, vanntette actionkamera med innebygd GPS. Det er flere funksjoner og spesifikasjoner ved kameraene som gjør de godt egnet til videoregistrering av trafikk. Kameraet er kompatibelt med mange ulike feste-anordninger, som gir gode plasseringsmuligheter. Eksempler på aktuelle feste-anordninger er reimer, stativ, sugekopper og limklosser, i tillegg til ledd og vinkler som tillater videre finjustering.



Figur 6-1: Kameraet Garmin VIRB XE som ble benyttet under videoregistreringene. (Foto: Garmin)

Kameraene kan gjennom Garmin VIRB Mobile App fjernstyres ved bruk av en smarttelefon eller et nettbrett, som videre vil fungere som en styringsenhet. Programvaren kan lastes ned gratis fra ulike plattformer. Fjernstyringen fungerer ved at kameraet setter opp et lokalt Wi-Fi nettverk som styringsenheten kobles opp mot. Det er også mulig å fjernstyre kameraene med egne garminenheter, som muliggjør vekking av kameraene fra dvalemodus. Den trådløse tilkoblingen fungerer i tillegg mellom kameraenheter, der et kamera kan velges som moderenhet, mens de resterende datterenhetene følger instruksjoner fra dette.

Den innebygde GPS-en i kameraene er svært nøyaktig, og har en følsomhet på 1Hz. Basert på data fra denne, sammen med data fra innebygde sensorer som akselerometer og gyroskop blir G-metrix data produsert for hver film. Dette er ytelsesdata i sanntid, som senere kan vises som grafer, tall og illustrasjoner på filmene ved bruk av tilleggsprogrammet Virb Edit. De innebygde sensorene har liten betydning for datainnsamlingen, men gjennom GPS-synkronisert tidsstempeling vil synkronisering av filmene på tvers av kameraene kunne gjennomføres med stor nøyaktighet.

Kameraene er også robuste og har ifølge spesifikasjonene et driftstemperaturområde fra -20°C til 45°C, og et ladetemperaturområde fra 0°C til 45°C. Dette gjør at kameraene er godt tilrettelagt for utendørs bruk. Batteriet som følger med er et 980 mAh oppladbart litiumionbatteri som gir opptil 2 timer filmetid med høy ytelse. Kameraene muliggjør også lading og filming på samme tid, noe som kan gi forlenget batteritid ved bruk av eksterne batterier.

Selve kameraet kan filme med tre ulike oppløsninger; 1080p, 720p og 480p. Ved maksimal ytelse kan de gitte oppløsningene kombineres med henholdsvis 60fps, 120fps og 240fps. Synsfeltet kan videre justeres til en av de tre alternativene bred, zoom og ultra-zoom. Kameraet muliggjør også for bildestabilisering på 2 akser med opptil 1440p/30fps, men dette ble ikke benyttet videre da kameraene ikke skulle være i bevegelse. Det er også mulig å ta stillbilder med en oppløsning på 7 MP eller 12 MP, samt bildeserier med opptil 30fps. Under gjennomføringen ble all data lagret på 64 GB microSD-minnekort.

6.1.1.3 Gjennomførte tester av tekniske forhold

I utgangspunktet var det ønskelig å ha kameraene fastmontert gjennom hele datainnsamlingsperioden, noe som satte krav til batteri- og lagringskapasitet. Batterilevetiden med et eksternt batteri på 20000 mAh ble dermed testet utendørs for å simulere temperaturforholdene under filmingen. Testperioden skulle utgjøre 2,5 timer filming for så en standby-periode på 21,5 timer. Etter at testen ble gjennomført kunne det konkluderes med at kameraet ikke forble påslått gjennom perioden til tross for at det fortsatt var strøm igjen på det eksterne batteriet. Da det ikke er mulig å slå på kameraet ved bruk av programvaren fra den eksterne styringsenheten satte dette begrensninger for plasseringen.

Et annet problem i tilknytning til batterikapasiteten var ønsket om å benytte seg av dvalemodus. Dette var en funksjon som kun lot seg benytte ved bruk av en ekstra garminenhet i form av en fjernkontroll med en rekkevidde på 10 meter. Dette kunne løst problemet med av- og påslåing av kameraene, men da det ikke er tilsvarende utstyr for de eksterne batteriene var ikke dette et reelt alternativ. Det ble derfor konkludert med at alle kameraene måtte være tilgjengelig for manuell aktivering for hvert innsamlingstidspunkt.

Lagringskapasiteten på kameraene var på rundt 5,5 timer ved en ytelse på 1080p/30fps, men denne kunne økes til rundt det tredobbelte ved en reduksjon av oppløsningen til 720p. Videre ble det gjort en vurdering av nødvendig ytelse og synsfelt, samt den korresponderende størrelsen på dataene som skulle behandles i ettertid for hvert av kameraene.

Muligheten for å seriekoble kameraene, der styringsenheten kommuniserte med moderenheten, som igjen kommuniserte med datterenhetene ble også testet. Rekkevidden ble undersøkt ved å flytte moderenheten mens styringsenheten og datterkameraet forble på samme lokasjon. Etter at testen var gjennomført kunne det konkluderes med at kommunikasjonen mellom styringsenheten og moderkameraet vedvarte over en større avstand enn mellom moderenheten og datterenheten. Avstanden mellom styringsenheten og moderkameraet ble målt til ca. 100 meter, men etter hvert som avstanden økte opplevdes større forsinkelser og problemer knyttet til å motta signal. Dette førte videre til ustabile forhold rundt overføring og lagring av bilder og filmer. Det ble derfor konkludert med at det var knyttet for store usikkerheter til bruken av denne funksjonen, da det med grunnlag fra tidligere befaringer har blitt vurdert at kameraene med stor sannsynlighet vil stå mer enn 100 meter fra hverandre.

6.1.2 Utførelse

Med utgangspunkt i erfaringer fra pilotstudiet ble videoregistreringene planlagt. Videre er valgte kameraplasseringer beskrevet, sammen med en detaljert gjennomgang av aspekter rundt gjennomføringen.

6.1.2.1 Valg av kameraplassering

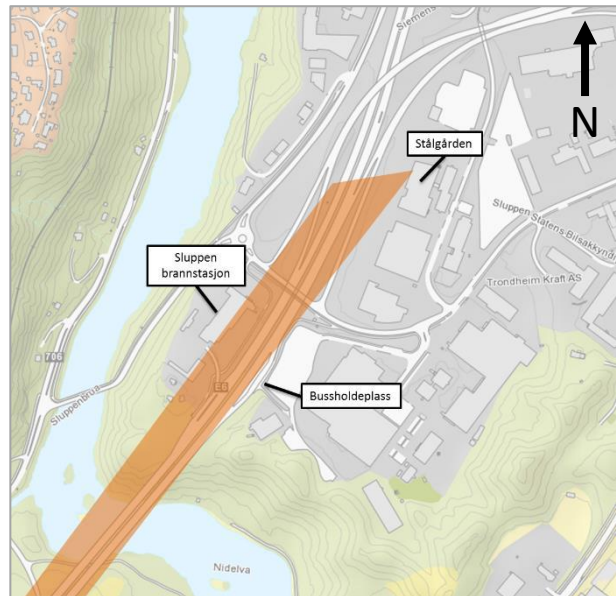
Etter at de tekniske og fysiske aspektene ved gjennomføringen av videoregistreringene var kartlagt ble tre plasseringer valgt ut. Alle de tre ønskelige plasseringene forutsatte tilgang til taket på to ulike bygninger langs E6. Dette gjaldt kontorbygget Stålgården på østsiden av E6 og Sluppen brannstasjon på vestsiden. Dette krevde videre innhenting av nødvendige tillatelser, der forespørslene ble sendt i samme periode som befaringsene ble gjennomført. Det var kort behandlingstid for å få tilgang til Stålgården, men grunnet kommunikasjonssvikt tok den tilsvarende prosessen med brannstasjonen lengre tid og det var derfor behov for en midlertidig løsning. De midlertidige plasseringene ble en lyktestolpe på østsiden av E6 og et kamerastativ oppå en stige på bakkenivå utenfor brannstasjonen.

Det ble sørget for at de forskjellige kameraposisjonene alltid ga overlappende bilder av strekningen mellom avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og Okstadbakken. Videre er plassering og

innstillinger for hvert enkelt kamera presentert, sammen med en illustrasjon av dekningsområdet i figur 6-2 til figur 6-4.

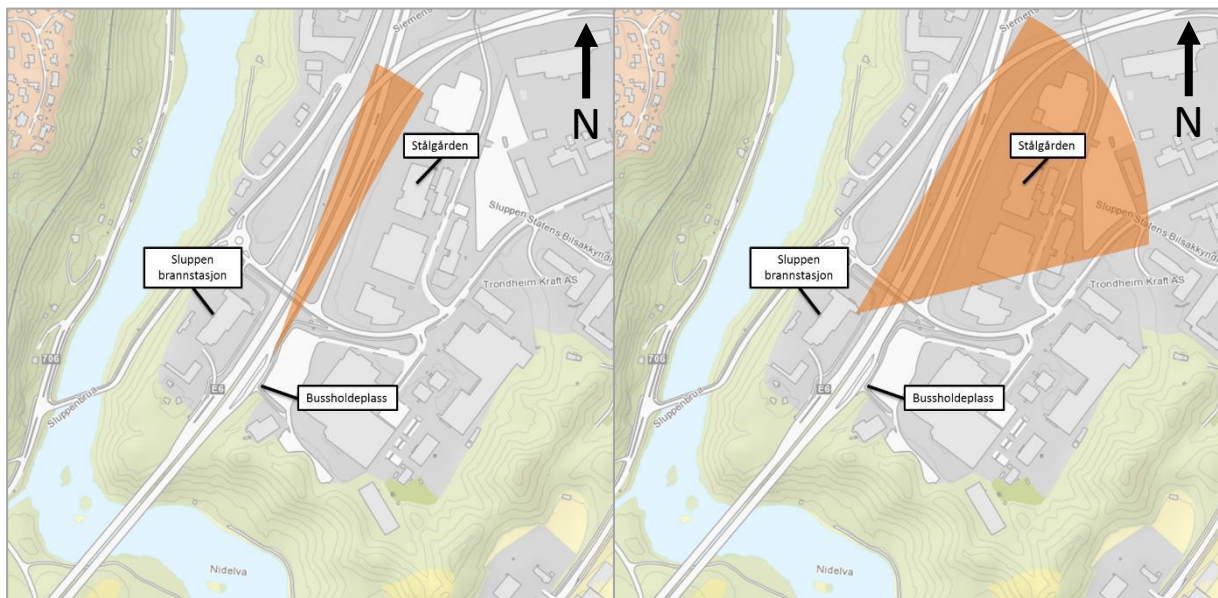
Kamera 1 ble montert på taket av Stålgården, med den hensikt å avdekke kødannelse, feltbruk og feltskifte på Kroppan bru. Filmen kunne også benyttes til å registrere fordelingen mellom kjøretøy som kjørte på avkjøringsrampen og inn mot sentrum, da begge vegstrekningene kom tydelig frem i videoene i det de skilte lag. Tilsvarende registreringer kunne foretas for å finne fordelingen av tungbiler.

Kameraet ble festet i parapeten ved bruk av sugekopp og videre sikret med gaffatape og en sikkerhetsstråd for å unngå at kameraet kunne falle ned fra bygningen. Det var i tillegg mulig å koble kameraet opp mot en kontinuerlig strømkilde, noe som gjorde det mulig å la kameraet være i stand-by mellom filmingene. Siden kameraet skulle dekke et område over en større avstand ble dette kameraet satt på ultra-zoom og høy kvalitet (1080p/30fps).



Figur 6-2: Illustrasjon av dekningsområde for kamera 1. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket)

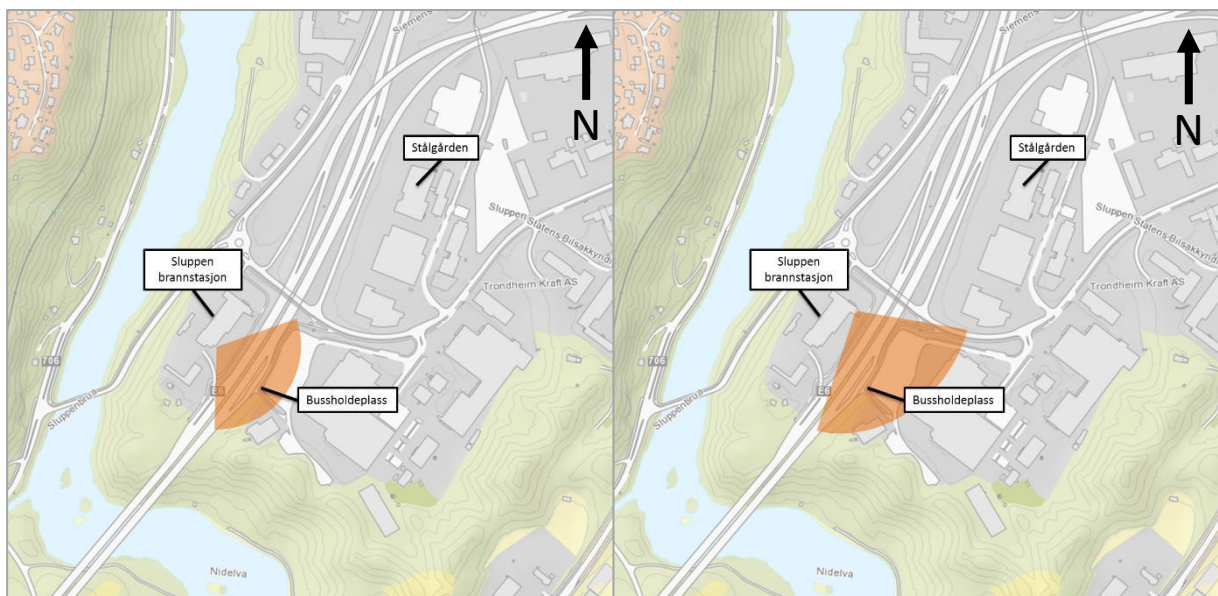
Kamera 2 ble først montert i en lyktestolpe like etter bussholdeplassen på Sluppen med den hensikt å avdekke trafikkavviklingen på rampen, samt antall sene feltskifter. Sistnevnte hendelse tilsvarer situasjon 2 som er beskrevet i kapittel 5. Ved hjelp av stige ble kameraet og et eksternt batteri festet med borrelåsreimer og gaffatape i tre meters høyde. Kameraet ble stilt på ultra-zoom for å få et godt bilde av området av interesse, men det var tilstrekkelig å sette kvaliteten til 720p/30fps.



Figur 6-3: Illustrasjon av dekningsområde for kamera 2. Midlertidig plassering til venstre og endelig plassering til høyre. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket)

Senere ble kameraet posisjonert på taket til brannstasjonen på Sluppen da nødvendige tillatelser var ordnet. Kameraet ble da festet til flaggstangen ved hjelp av de samme reimene som tidligere. Kvaliteten og synsfeltet på kameraet forble uendret.

Kamera 3 ble først plassert på østsiden av brannstasjonen og vinklet slik at den sto 90 grader på Kroppanbrua bussholdeplass i nordgående retning. Kameraet og et eksternt batteri ble montert på et kamerastativ som igjen ble festet til en stige for å oppnå en viss høyde. Dette kameraet ble stilt inn på bred synsvinkel da et større nærliggende område skulle dekkes, men det var tilstrekkelig å sette kvaliteten til 720p/30fps. Dette kameraet hadde til hensikt å avdekke hvor mange busser som krysset høyre kjørefelt ved innkjøring til holdeplassen, antallet busser som stoppet på holdeplassen, gjennomsnittlig ombordstigningstid og antallet busser som kjørte ut samtidig. Videre var det interessant å se på samspillet og kommunikasjonen mellom trafikken i høyre kjørefelt og bussene som skulle inn på/ut fra bussholdeplassen, samt hvilken innvirkning dette fikk på trafikkstrømmen. Senere ble også dette kameraet posisjonert på taket til brannstasjonen på Sluppen. Stativet ble fremdeles benyttet til plasseringen av kameraet, mens kvalitet og synsfelt forble uendret.



Figur 6-4: Illustrasjon av dekningsområde for kamera 3. Midlertidig plassering til venstre og endelig plassering til høyre. (Kartgrunnlag hentet fra Kartverket)

6.1.2.2 Gjennomføring

Da kameraene ble montert og aktivert på nytt for hver dag, varierte registreringstidsrommet fra kamera til kamera. Første kamera ble aktivert ca. 06:30. Videre ble de resterende kameraene aktivert fortløpende i perioden frem mot 07:00. Registreringene ble avsluttet mellom 08:15 og 08:30, da trafikkmengden ble vurdert til å være for lav til at det videre kunne oppstå større avviklingsproblemer. Kameraene ble deretter deaktivert i motsatt rekkefølge, med den følgen at det første kameraet ble deaktivert sist. Filmingen ble dermed gjennomført i samme periode som tidligere ble vurdert som den høyest belastede. I samme tidsrom ble det også gjennomført observasjoner av trafikken i det tilstøtende nettverket og områder som ble dårlig dekket av kameraene.

Det ble totalt gjennomført 6 videoregistreringer i løpet av uke 40 og 42, fordelt mellom en mandag, to onsdager, to torsdager og en fredag. Dette ble gjort for å registrere om det var tydelige variasjoner mellom de ulike ukedagene. Uke 41 ble utelatt da høstferien ble avviklet i denne perioden, noe som videre ville innvirket på den totale trafikkmengden på strekningen. En oversikt over registreringsdagene er gitt i tabell 6-2.

Tabell 6-2: Oversikt over gjennomførte registreringer.

Uke	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Fredag
40 (3-9.okt)			X	X	X
42 (17-23.okt)	X		X	X	

Datainnsamlingen ble gjennomført relativt intensivt for å unngå en eventuell endring i kjøreforholdene grunnet snø og frost på vegen. Dette ville vært forhold som måtte tas videre hensyn til gjennom databehandlingen. Dataene ville dermed ikke vært direkte sammenlignbare, da endrede kjøreforhold kunne innvirket på individers kjøreopplevelse og tilpasning.

I perioden registreringene ble gjennomført var det tilsvarende kjøreforhold for alle dagene. Temperaturen lå mellom 0 og 4 grader, ingen tendenser til isdannelse i vegbanene og ellers klarvær og opphold.

6.1.3 Manuelle videoregistreringer

Etterbehandlingen av videomaterialet ble vurdert ut ifra hvilket detaljnivå som var nødvendig for å avdekke de sentrale trafikale forholdene i analyseområdet. Kapittelet tar videre for seg valg av dager for prosessering, registreringsmetode, samt hvor og hvordan de ulike registreringene ble gjennomført.

6.1.3.1 Valg av dager

Videoregistreringene ble gjennomført på 6 ulike dager i 2 ulike uker på 4 ulike ukedager. Det var liten variasjon mellom de ulike dagene og ukene, og alle filmene ble dermed ansett som representative. På bakgrunn av dette ble det besluttet å velge ut 2 dager som grunnlag for manuelle registreringer.

De ulike situasjonene som preger de trafikale forholdene blir forsterket i mer belastede perioder. For å få et best mulig grunnlag til å beskrive situasjonen ble dette lagt til grunn for valg av hvilke dager som skulle inkluderes i videoregistreringen. Fredag 07.10.16 var den eneste av registreringsdagene som fikk et fullstendig sammenbrudd i trafikken. Med grunnlag i dette ble det besluttet at denne dagen skulle inkluderes i videoregistreringene. I tillegg ble onsdag 19.10.16 inkludert da belastningen var jevnt høy. Onsdagen inneholdt også flere tydelige sjokkebølgedannelser og situasjoner som nærmet seg trafikale sammenbrudd.

Dagene ble ansett som representative for situasjonen på Sluppen og dekker samtidig to ulike ukedager. Dette gjør at eventuelle variasjoner over ukedagene vil kunne bli avdekket. Tabell 6-3 viser dato, ukedag, kameraplassering, start- og sluttidspunkt, samt varigheten på videoene for de to registreringsdagene

Tabell 6-3: Oversikt over dato, ukedag, kameraplassering, start- og sluttidspunkt, samt varighet av videoen for de to registreringsdagene. Kamera 1 - Stålgården, Kamera 2 - Lyktestolpe/flaggstang, Kamera 3 - Brannstasjon, M - Midlertidig plassering og E - Endelig

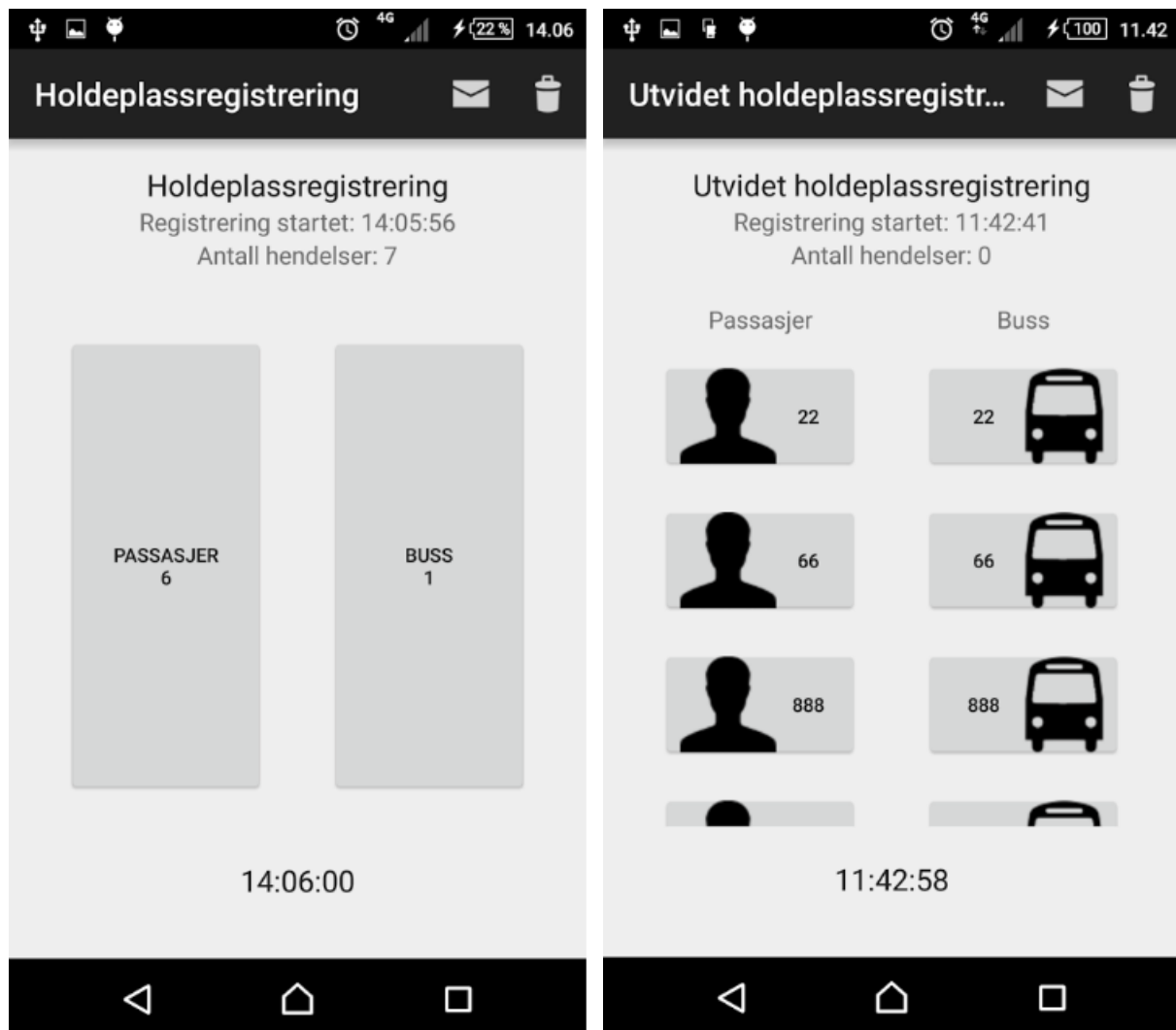
Dato	Dag	Kameraplassering	Starttidspunkt	Sluttidspunkt	Varighet
07.10.2016	Fredag	Kamera 1	06:28:10	08:54:04	02:25:54
		Kamera 2M	06:41:43	08:39:04	01:57:21
		Kamera 3M	06:53:58	08:28:31	01:34:33
19.10.2016	Onsdag	Kamera 1	06:33:16	08:45:11	02:11:55
		Kamera 2E	06:49:47	08:23:03	01:33:16
		Kamera 3E	06:58:20	08:22:43	01:24:23

6.1.3.2 Applikasjon til registreringer

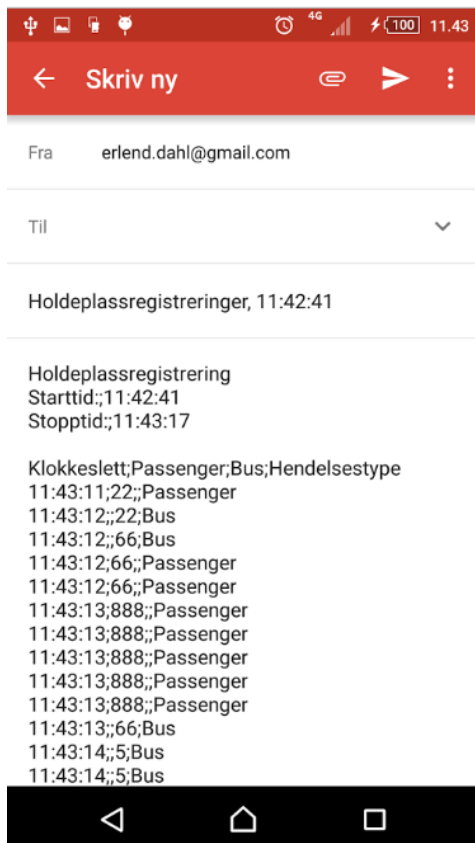
For å gjennomføre registreringene fra videomaterialet ble det konkludert med at det fantes to applikasjoner på Google Play som var velegnet for denne oppgaven. Applikasjonene kalt «Holdeplassregistrering» og «Utvidet holdeplassregistrering» er utviklet av Sintef med den hensikt å registrere individers ventetid i forkant av en bussavgang.

Applikasjonenes funksjon kan enkelt overføres til registreringer av enkeltkjøretøy uten nødvendige modifikasjoner, da den baserer seg på tidsstempel, som igjen kan benyttes til å bergene tidslukene mellom enkeltkjøretøy. Applikasjonen skiller mellom passasjerer og busser som i dette tilfellet vil benyttes til å skille mellom lette og tunge kjøretøy.

Applikasjonen som heter «Utvidet holdeplassregistrering» er en videreutvikling av applikasjonen «Holdeplassregistrering». Denne innehar dermed de samme funksjonene som den originale applikasjonen, men har i tillegg muligheten til å legge inn registreringer for ulike busslinjer. Den utvidede applikasjonen vil kunne benyttes i tilfeller der man ønsker å skille mellom flere kjørefelt under samme telling, samtidig som det skilles mellom de ulike kjøretøytypene. Brukergrensesnittet for de to applikasjonene er vist i figur 6-5.



Figur 6-5: Illustrasjon av brukergrensesnittet i de to applikasjonene. «Holdeplassregistrering» er vist til venstre og «Utvidet holdeplassregistrering» er vist til høyre. (Kilde: Google Play)



Holdeplassregistrering			
Telling			
Starttid:	13:45:36		
Stopptid:	13:55:01		
Klokkeslett	Passenger	Bus	Hendelsestype
13:45:39		avgang	Bus
13:45:51		avgang	Bus
13:46:03		avgang	Bus
13:46:09		avgang	Bus
13:48:58		ankomst høyre	Bus
13:49:17	ankomst høyre fil		Passenger
13:49:29		avgang	Bus
13:49:43	avgang		Passenger
13:51:25		ankomst høyre	Bus
13:51:41		ankomst høyre	Bus
13:52:01		avgang	Bus
13:52:05		avgang	Bus

Figur 6-6: Illustrasjon av registreringsresultat fra applikasjonen «Utvidet holdeplassregistrering». Formatet dataene mottas på er vist til venstre (kilde: Google Play) og en illustrasjon på resultatet vist i Excel til høyre. Her er ankomst høyre fil og avgang benyttet i stedet for bussnummer, og «passenger» og «bus» representerer henholdsvis vanlige kjøretøy og buss.

Dataene føres opp i en tekstfil med starttidspunkt relatert til når applikasjonen blir tatt i bruk, klokkeslett for hver registrering, hvilken kategori registreringen tilhører, samt hendelsestype. Tekstfilen kan lastes over i Excel for videre databehandling. En illustrasjon på formatet registreringene blir gitt på er gitt i figur 6-6.

Siden applikasjonen i utgangspunktet er ment til å registrere oppmøtetiden til kollektivreisende har det fra utviklers side blitt valgt å legge inn en mindre nøyaktig tidsstempling, gitt på formatet tt:mm:ss. Nøyaktigheten er likevel ansett som tilstrekkelig for videre bruk.

Til slutt må starttidspunktet og registreringene fra videoprosesseringen korrigeres i forhold til når videoregistreringene ble gjennomført. Korrigeringen kan gjennomføres ved bruk av tidsstemplene gitt i videoene.

6.1.3.3 Avkjøringsrampen fra E6 Syd

Trafikken på avkjøringsrampen fra E6 syd til Omkjøringsvegen er en sentral del av situasjonen på Sluppen. Det ble derfor foretatt en detaljert registrering av kjøretøyene som kjørte av til E6 Omkjøringsvegen ved å gjennomføre tellingene i sanntid. Den detaljerte registreringen inkluderer trafikkvolum og tungbilandel, i tillegg til å muliggjøre beregning av tidsluker mellom de ulike kjøretøyene. Registreringene ble gjennomført ved bruk av applikasjonen «Holdeplassregistrering».

Videoene fra Stålgården var mest egnet til å avdekke fordelingen mellom trafikken som skulle mot sentrum eller på E6 Omkjøringsvegen. Det valgte snittet er illustrert med en rød linje i figur 6-7. Grunnet vegetasjon er det en strekning på ca. 45 meter i forkant av der det oppstår et fysisk skille mellom kjørefeltet inn mot byen og til rampen som ikke dekkes av videoene. På denne strekningen er det et markert sperreområde over de siste 25 meterne. Det ble derfor videre antatt at antallet kjøretøy

som eventuelt legger seg inn på denne strekningen er neglisjerbart sammenlignet med det totale trafikkvolumet.

Det er også mulig å fortsette fra høyre kjørefelt til kollektivfeltet videre mot Trondheim sentrum. Denne muligheten er lite brukt, da det innebærer å følge den saktegående trafikken i høyre kjørefelt fremfor å kjøre forbi den i midtre eller venstre kjørefelt. Enkelte busser velger likevel å benytte denne muligheten da tette trafikkstrømmer i midtre felt kan vanskeliggjøre et feltskifte etter bussholdeplassen. I registreringen ble det antatt at alle kjøretøy som lå i høyre kjørefelt skulle fortsette på E6 Omkjøringsvegen, men busser som ga tegn til å skifte kjørefelt ble utelatt. Dette gir en liten usikkerhet i resultatene, men denne er videre neglisjert.



Figur 6-7: Illustrasjon av utvalgt snitt for registreringene av kjøretøy som skal mot Trondheim sentrum (blå) og E6 Omkjøringsvegen (rød) fra E6 Syd, samt påkjøringsrampen fra Sluppenvegen mot E6 Omkjøringsvegen (oransje). Utsnitt hentet fra kamera 1.

6.1.3.4 Trafikk mot sentrum

Trafikken som fortsetter på E6 mot Trondheim sentrum berører i liten grad trafikken i høyre kjørefelt før avkjøringsrampen. Det er likevel nødvendig å registrere kjøretøy mot sentrum for å få en total trafikkmengde. Dette ble gjort ved bruk av videoene fra kamera 1 (Stålgården). Snittet for registreringen er illustrert med blå linje i figur 6-7 og omfatter kun kjøretøy i midtre og venstre kjørefelt.

Gjennom registreringen ble det skilt på tunge og lette kjøretøy i tillegg til feltplassering. Dette ga til sammen 4 ulike registreringskategorier:

- Lett kjøretøy i midtre kjørefelt
- Tungt kjøretøy i midtre kjørefelt
- Lett kjøretøy i venstre kjørefelt
- Tungt kjøretøy i venstre kjørefelt

Sanntidsregistreringer ble ikke ansett som nødvendig da det ikke var behov for registrering av tidsluker mellom kjøretøyene. Registreringene ble derfor gjennomført på 5-minuttersintervaller for å redusere arbeidsmengden, men fortsatt bevare en god oppløsning på datasettet. For gjennomføringen ble applikasjonen «Utvidet holdeplassregistreringer benyttet».

6.1.3.5 Påkjøringsrampen fra Sluppenvegen

Trafikken som benytter påkjøringsrampen fra Sluppenvegen vil kunne innvirke på avviklingen på avkjøringsrampen fra E6 syd, da disse trafikkstrømmene møtes og går videre sammen på E6 Omkjøringsvegen. Fra tidligere befaringer har det blitt observert at trafikken som kommer fra Sluppenvegen gjerne kommer samlet i perioder, noe som kan innvirke på den totale trafikkavviklingen for området. Det ble derfor bestemt at også kjøretøyene som kommer fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen skulle registreres i sanntid for å få et høyt detaljnivå. Den detaljerte registreringen inkluderer trafikkvolum og tungbilandel, i tillegg til å muliggjøre beregninger av tidsluker mellom de ulike kjøretøyene. Registreringene ble gjennomført ved bruk av applikasjonen «Holdeplassregistrering».

Videoene fra Stålgården dekket tydelig trafikken som benyttet seg av påkjøringsrampen fra Sluppenvegen. Snittet som ble benyttet under registreringene er illustrert med oransje linje i figur 6-7. Da det var relativt lite trafikk som benyttet seg av påkjøringsrampen, i tillegg til det faktum at påkjøringsrampen kun leder til E6 Omkjøringsvegen, er det få usikkerheter knyttet til disse registreringene.

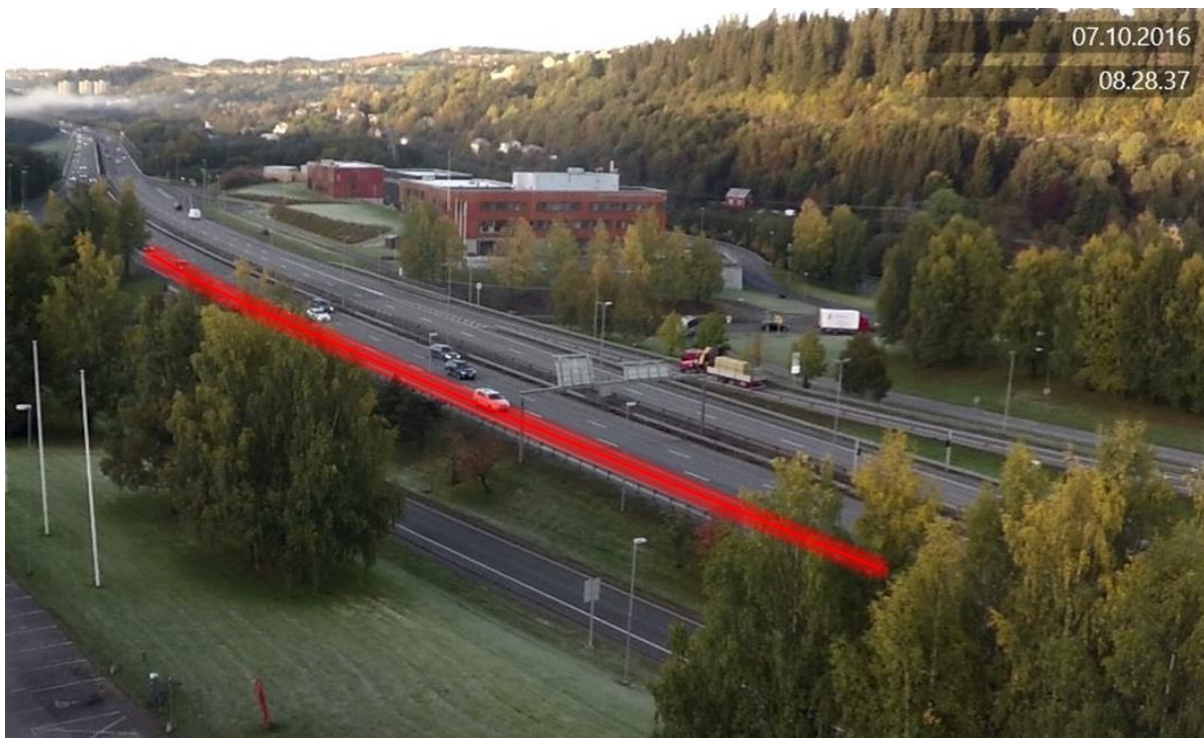
6.1.3.6 Sene feltskifter

Registrering av feltskifter fra midtre til høyre kjørefelt rett i forkant av avkjøringsrampen kan benyttes til å kartlegge omfanget av situasjon 2. Dette ble gjennomført med grunnlag i videoene fra kamera 1 (Stålgården), med mulighet for kvalitetssikring fra en annen vinkel ved hjelp av videoene fra kamera 2 (lyktestolpe/flaggstang).

For å gjennomføre registreringen ble det interessante området for feltskifte definert som strekningen fra avslutningen av akselerasjonsfeltet fra bussholdeplassen til begynnelsen av sperreområdet ved avkjøringsrampen. Denne strekningen er ca. 160 m, og utgjør det siste området med lovlig feltskifte før avkjøringsrampen. Strekningen er illustrert i figur 6-8. Selv om de siste 20 meterne av strekningen er delvis skjult bak trær i bildet fra kamera 1 anses synligheten som god nok i kombinasjon med videoen fra kamera 2.

Fenomenet har en sterk sammenheng med trafikksituasjonen i høyre kjørefelt. Hendelsen oppstår sporadisk basert på sjåførenes oppfatning av trafikksituasjonen før de vet hvordan det vil være når de kommer frem til avkjøringsrampen. Dette gjør at tidsluken mellom hendelsene ikke er interessant, og sanntidsdata er dermed ikke nødvendig. Da det absolutte antallet kjøretøy som gjennomfører manøveren er relativt lavt, vil en fordeling på femminuttersintervaller kunne gi stor spredning i resultatene da hendelsen samtidig preges av tilfeldigheter. På bakgrunn av dette ble det besluttet å registrere på kvartersintervaller. Dette bevarer muligheten til å se på resultatene som en andel av det korresponderende trafikkvolumet i høyre kjørefelt, uten at variasjonene i trafikken blir betydelig utjevnet.

Registreringen ble gjennomført manuelt, uten å benytte applikasjonene, da antallet hendelser per kvartersintervall var relativt lavt. Det ble ikke skilt på ulike kjøretøytyper.



Figur 6-8: Illustrasjon av utvalgt strekning for registrering av kjøretøy som foretar sene feltskifter med utsnitt hentet fra kamera 1.

6.1.3.7 Bussregistreringer

Avviklingen på og oppstrøms for rampen har blitt sett i sammenheng med flere faktorer. En av de sentrale faktorene som kan ha en innvirkning på avviklingskvaliteten er knyttet til bussene som skal inn og ut fra kollektivknutepunktet.

Fra tidligere observasjoner har det blitt registrert at bussene har en tendens til å klumpe seg sammen over Kroppan Bru. Figur 6-9 viser et situasjonsbilde som illustrerer situasjonen. Dette medfører at bussernes innvirkning ofte kommer i konsentrerte perioder og kan ha en forsterket negativ effekt på trafikkavviklingen. I andre perioder har det blitt registrert få avganger, og bussen vil ikke gi stor innvirkning. Den detaljerte registreringen inkluderer både ankomster og avganger, i tillegg til nok informasjon til å beregne tidslukene mellom avgangene. Gjennom registreringene er det skilt på busser og andre kjøretøy som kjører inn til bussholdeplassen. På grunn av dårlig synlighet i videoene var det ikke mulig å registrere hvilket kjørefelt kjøretøyene ankom fra. Registreringene ble gjennomført ved bruk av applikasjonen «Holdeplassregistrering».



Figur 6-9: Situasjonsbilde hentet fra videoregistreringen gjennomført onsdag 19.10.2016 kl. 08:13:22. Bildet viser fire busser som befinner seg ved bussholdeplassen samtidig.

6.2 Rutetider

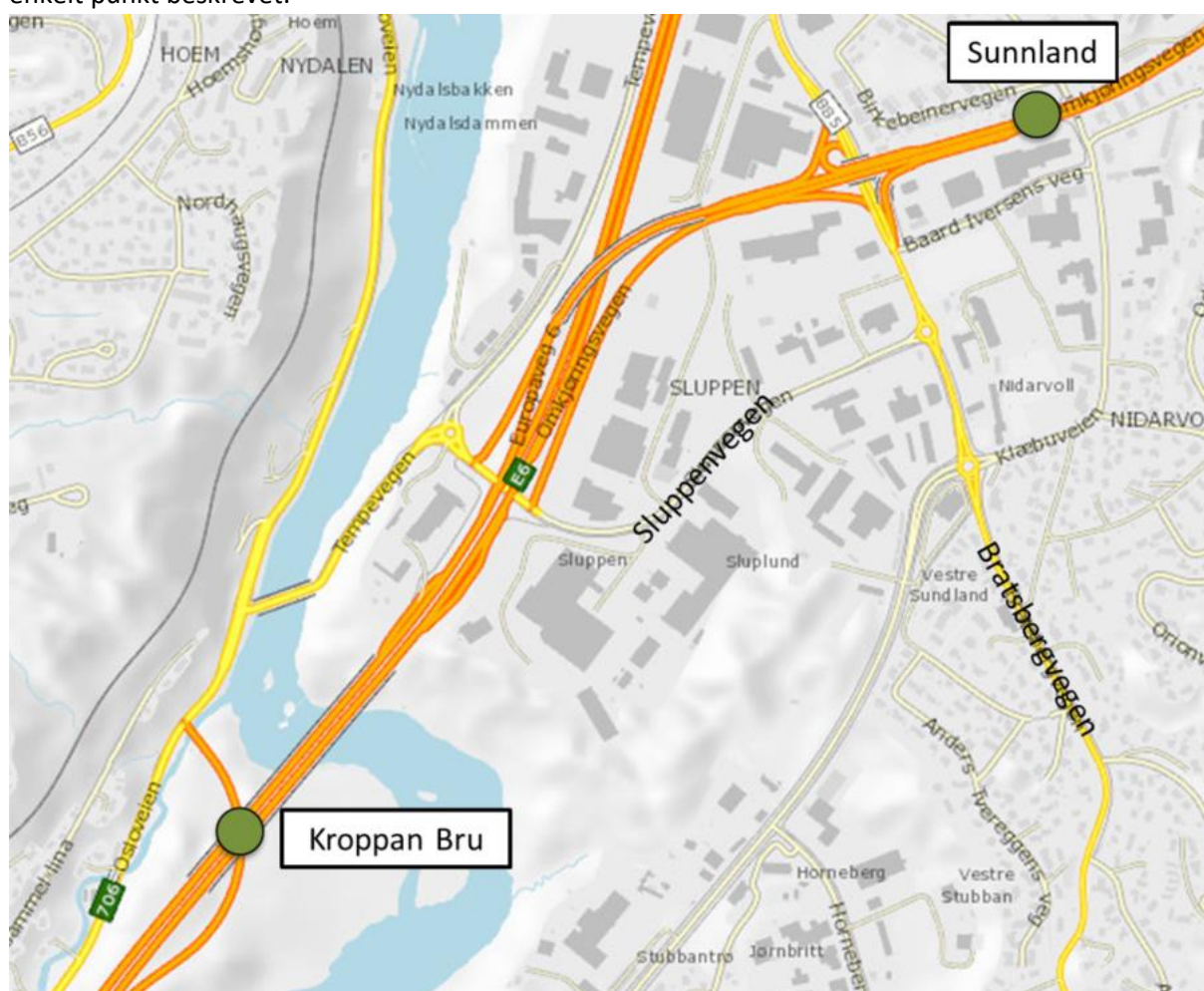
Da det gikk med tid til montering og aktivering av de ulike kameraene oppsto det en forsinkelse mellom videoene på ca. 30 minutter. Da kameraet ved Sluppen Brannstasjon var det siste kameraet som ble montert var det nødvendig å samle inn data knyttet til bussavgangene i perioder uten dekning. Som grunnlag for dette ble det benyttet rutetider gitt av AtB, som er administrasjonsselskapet for kollektivtrafikken i Sør-Trøndelag. Dette ble gjort ved bruk av sanntidsinformasjon tilgjengelig på deres nettsider for perioden mellom 06:30 og 07:00.

En videre kartlegging for hele tidsperioden ble benyttet til å si noe om planlagt fordelingen av bussavgangene gjennom morgenrushet. Samtidig ble bussenes fordeling mellom ruter mot sentrum og E6 Omkjøringsvegen fastsatt.

Disse dataene vil trolig avvike fra de manuelle registreringene da det kan oppstå forsinkelser gjennom busstraseen som det ikke er tatt høyde for i rutetiden. Busser vil heller ikke kjøre inn på holdeplassen i de tilfellene der ingen passasjerer skal foreta et skifte av transportmiddel i form av av- eller påstigning.

6.3 Trafikkregistreringsdata

For å kunne hente ut data fra trafikkregistreringsstasjonene ble det inngått et samarbeid med Statens vegvesen om tilgjengeliggjøring av data. Det er to aktuelle trafikkregistreringsstasjoner i området: Kroppan bru og Sunnland. Plasseringen av disse er illustrert i figur 6-10. Videre er dataene fra hvert enkelt punkt beskrevet.



Figur 6-10: Illustrasjon over plasseringen av trafikkregistreringsstasjonene (Kartgrunnlag hentet fra vegkart.no)

6.3.1 Kroppan bru

Trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru er lokalisert på sørenden av bruene, ca. 750 m oppstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen. Stasjonen er et nivå 1 tellepunkt med kontinuerlig registrering av kjøretøy. Frem til midten av oktober 2016 ble alle dataene i dette punktet aggregert på timesbasis. I oktober ble tellepunktet omprogrammert til å registrere enkeltkjøretøy. Dette medførte at tellepunktet var ute av drift i litt over en uke. Fra og med fredag 21.10.16 kl. 11.16 var det omprogrammerte tellepunktet i drift igjen. Dette medførte at hverken aggregerte data på timesgjennomsnitt eller enkeltkjøretøydata var tilgjengelig for de tre siste dagene videoregistreringene ble gjennomført. I den første perioden med videoregistreringer er kun timesgjennomsnitt tilgjengelig.

Under omprogrammeringen av trafikkregistreringsstasjonen ble det oppdaget at registreringene i venstre kjørefelt i nordgående retning var ustabile og mangelfulle. Hvor lenge dette hadde vært tilfelle var usikkert, men feilen hadde tilsynelatende vært der over lang tid. Da det var usikkert hva som forårsaket feilen var det også usikkert når feilen ville bli rettet opp. Dette gjorde at det kun var midtre og høyre kjørefelt i den aktuelle kjøreretningen som samlet brukbare registreringer i det ønskede tidsrommet.

De første dagene i etterkant av omprogrammeringen var det også perioder med ustabile og mangelfulle målinger fra tellepunktet. Fra og med mandag 24.10.16 er målingene ansett som stabile for registreringer i midtre og høyre kjørefelt.

Datasettet som ble mottatt fra Statens vegvesen besto av registreringer av enkeltkjøretøy fra tellepunktet ble omprogrammert, altså fredag 21.10.16, til og med tirsdag 25.10.16. Det ble også mottatt to datasett med aggregerte data på timesgjennomsnitt. Det første datasettet overlappet med de tre første videoregistreringsdagene og var fra lørdag 01.10.2016 til onsdag 12.10.2016, mens det andre overlappet med enkeltkjøretøydataene og var fra lørdag 22.10.16 til mandag 31.10.16.

Dataene for enkeltkjøretøy inneholdt følgende informasjon:

- Dato og tidsstempel
- Kjørefeltnummer (1, 3 og 5 er hhv. venstre, midtre og høyre kjørefelt i nordgående retning)
- Hastighet med korresponderende kvalitet på målingen
- Kjøretøylengde
- Tidsluke mellom kjøretøy (bakende til front)
- Kjøretøytype med korresponderende kvalitet på målingen

Dataene for timesgjennomsnitt inneholdt følgende informasjon:

- Dato og tidsstempel
- Kjørefeltnummer (1, 3 og 5 er hhv. venstre, midtre og høyre kjørefelt i nordgående retning)
- Antall kjøretøy
- Lengde på kjøretøy gitt som antall i 5 ulike lengdeklasser
- Hastighet: gjennomsnitt, 85%- og 95%-fraktil

6.3.2 Sunnland

Trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland er lokalisert på E6 Omkjøringsvegen, ca. 800 m nedstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen. Stasjonen er et nivå 1 tellepunkt med kontinuerlig registrering av kjøretøy, hvor alle registreringene er tilgjengelige for enkeltkjøretøy. Bruksområdet for dataene fra tellepunktet på Sunnland reduseres grunnet muligheten til av- og påkjøring fra Bratsbergvegen som ligger mellom avkjøringsrampen på Sluppen og registreringsstasjonen. Det vil også foreligge større

usikkerheter knyttet til innblandingen av trafikkstrømmen fra Sluppenvegen i perioder uten dekning fra de manuelle videoregistreringene.

Datasettet som ble mottatt fra Statens vegvesen besto av registreringer av enkeltkjøretøy i to perioder. Den første perioden overlappet med de første tre dagene med videoregistreringer, og var fra tirsdag 04.10.16 til og med søndag 09.10.16. Den andre perioden overlappet med de siste tre dagene med videoregistreringer, og var fra lørdag 15.10.16 til og med torsdag 20.10.16. Det ble også mottatt et datasett med aggregerte data på timesgjennomsnitt fra lørdag 01.10.16 til og med mandag 31.10.16.

Informasjonen i de to ulike datasettene er det samme som for datasettene fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. De aktuelle kjørefeltene vil være kjørefelt 1 og 3 som tilsvarer henholdsvis venstre og høyre kjørefelt.

6.4 Bomsnittsregistreringer

Da analyseområdet dekkes av to bomsnitt var det mulig å benytte registreringene som foretas av bomselskapet som et supplement til de mangelfulle dataene gitt på Kroppan bru. Første bomsnitt omfatter kun kjøretøy som skal mot sentrum og er plassert like etter at avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og hovedvegen mot sentrum skiller lag. Det andre bomsnittet er plassert ved Tonstadkrysset, ca. 3,2 km oppstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen, og registrerer all trafikk som benytter seg av strekningen. Plasseringen av bomsnittene er illustrert i figur 6-11.

Gjennom et samarbeid med Statens vegvesen ble registreringer foretatt i uke 37, 2016, tilgjengeliggjort. Datasettet er gitt på 15-minuttersintervall og inneholder følgende informasjon:

- Dato og tidsstempel
- Prosjekt
 - o Inneholder ingen informasjon som er aktuell å benytte videre
- Stasjon
 - o Navn på bomsnitt
- Kjørefelt
- Kjøretøyklasse
 - o Gitt som liten bil, stor bil og ukjent
- Produkt
 - o Skilles mellom ulike kjøretøy med ulike betalingsordninger, miljøkjøretøy, offentlig transport og utrykningskjøretøy
- Antall passeringer



Figur 6-11: Plassering av bomsnittene ved Sluppen og Tonstad. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket)

Det er forventet at datasettet registrerer antall kjøretøy med høy nøyaktighet. Ukjente kjøretøy kan videre skape utfordringer ved estimering av fordelingen mellom korte og lange kjøretøy. Registreringer foretatt i de to bomsnittene kan ikke sammenlignes direkte da kjøretøy har muligheten til å benytte avkjøringsrampen til Osloveien og E6 Omkjøringsvegen.

6.5 Reisetidsregistreringer

Reisetidsregistreringer på strekningen mellom Tonstad og avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen har, gjennom et samarbeid med Statens vegvesen, blitt tilgjengeliggjort. Måleutstyret på Tonstad er montert på bruene over til Formo og ligger ca. 2,95 km oppstrøms for begynnelsen av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Tilsvarende utstyr på Sluppen er montert i en lyktestolpe ca. 0,3 km nedstrøms for begynnelsen av rampen. Dette er illustrert i figur 6-12.

Tilgjengeliggjorte registreringer gjelder for perioden onsdag 01.02.17 til søndag 19.02.17. Grunnet problemer knyttet til utførelsen av reisetidsmålinger var det først i begynnelsen av februar at det ble aktuelt å få tilsendt reisetidsdata. Det var følgelig ikke mulig å få reisetider i samme periode som de øvrige manuelle og maskinelle registreringene ble foretatt.

Målingene viser at det fremdeles var problemer med registreringene til og med mandag 06.02.17. Alt av registreringer i denne perioden vil dermed bli forkastet for bruk i videre analyser.

Datasettet er gitt med en oppløsning på 5-minuttersintervaller og inneholder informasjon om:

- Dato og klokkeslett
- Reell og normal reisetid
- Forsinkelse
- Antall kjøretøy
- Lengde på strekningen
- Strekningshastighet
- Opplysning om hvorvidt strekningshastigheten er stipulert



Figur 6-12: Illustrasjon av strekningen mellom registreringspunktene. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket)

Kategorien «Forsinkelse» er gitt av en funksjon som finner differansen mellom normal og reell reisetid. Datasettet oppgir den normale reisetiden på strekningen til 240 sekunder, noe som innebærer en strekningshastighet på 51,65 km/t. Med unntak av de siste 100 meterne av rampen, som er skiltet med 70 km/t, er fartsgrensen på den resterende strekningen satt til 80 km/t. Den oppgitte forsinkelsen i datasettet er derfor beregnet på feil grunnlag og vil forkastes. Videre kartlegging av forsinkelse vil derfor måtte korrigeres manuelt.

Datasettet baserer seg på registrering av kjøretøy som benytter Autopass-brikke, noe som innebærer at trafikkvolumet som registreres i hvert 5-minuttersintervall ikke kan benyttes i sammenligningen av registrert trafikkvolum fra andre datasett. I perioder der det ikke registreres noen kjøretøy benyttes det stipulerte verdier basert på normal reisetid over strekningen.

Lengden på strekningen mellom de to målepunktene er oppgitt som 3443 meter. Avstanden ble kontrollert opp mot målinger gjennomført ved bruk av Google Maps, der det ble konstatert en differanse på ca. 200 meter. Det ble derfor gjennomført en mer nøyaktig måling ved bruk av metreringsverdier hentet fra NVDB . Lengden på strekningen er for videre bruk korrigert til 3240 meter.

I datasettet er strekningshastigheten for hvert intervall beregnet ved bruk av forhold mellom den gjennomsnittlige reelle reisetiden benyttet på strekning og den oppgitte avstanden mellom målepunktene. Da reisetidsmålingen er hentet direkte ut fra tidsdifferansen mellom to registreringspunkt, vil de være uavhengig av den oppgitte avstanden. Basert på den korrigerte verdien for avstandsparameteren vil det være nødvendig å beregne en ny strekningshastighet innenfor de ulike intervallene. Ved å redusere avstanden mellom registreringspunktene samtidig som de originale reisetidsregistreringene beholdes vil korrigeringen medføre en reduksjon av strekningshastigheten.

6.6 Geometrisk utforming

For å kunne gjennomføre nødvendige kartlegginger av sentrale aspekter ved analyseområdet var det behov for å innhente data vedrørende enkelte geometriske utforminger.

Bussene har en sentral plass i analyseområdet og det var derfor ønskelig å gjennomføre en mer detaljert kartlegging av forholdene knyttet til kollektivtransporten. Ved bruk av måleverktøy tilgjengelig på norgeskart.no ble busslommens utstrekning fastsatt. Basert på utformingen vil det være mulig å estimere hvor mange busser som kan oppholde seg ved holdeplassen samtidig.

Kryssløsningen som er valgt på Sluppen setter preg på det totale trafikkbildet. Det var derfor ønskelig å gjennomføre en mer detaljert kartlegging i henhold til de ulike stigningsforholdene gitt for rampen fra E6, Sluppenvegen, samt etter at de to rampene fletter sammen og fortsetter som en to kjørefelt. Høydemål ble hentet ved bruk av måleverktøy i kart tilgjengelig av Kartverket gjennom norgeskart.no. Videre ble lengdemål estimert ved bruk av metreringsverdier hentet fra NVDB . Det avdekkede stigningsforholdet vil videre kunne vurderes opp mot en eventuell innvirkning på den totale trafikkavviklingen.

7 Dataanalyse

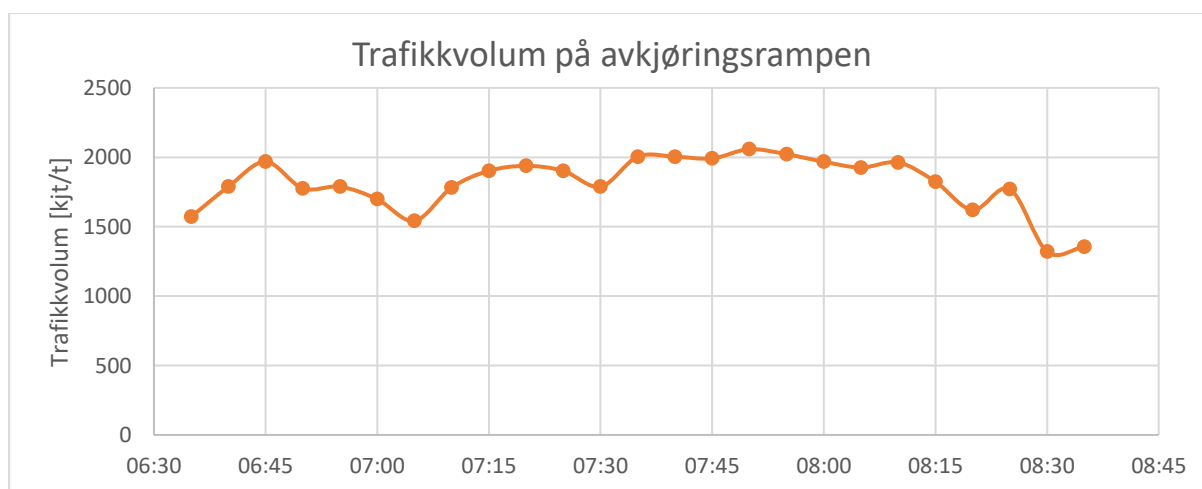
Innsamlet trafikkdata vil videre bli analysert og relevante resultater vil bli presentert. Hensikten med analysene er å underbygge forklaringen, samt etablere et datagrunnlag som kan benyttes i teoretiske tilnærminger og modelleringer av dagens situasjon. Videre vil analysene bli presentert i tilsvarende rekkefølge gitt i kapittel 6.

7.1 Manuelle videoregistreringer

I de manuelle videoregistreringene ble det gjort registreringer i fem ulike snitt/strekninger i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen. Videre er registreringer knyttet til trafikken på avkjøringsrampen fra E6 syd, trafikken på E6 syd mot Trondheim sentrum og fordelingen mellom disse presentert, sammen med trafikken fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen, forekomsten av sene feltskifter og registreringer knyttet til bussen. En oversikt over utregnede verdier er gjengitt i vedlegg 3.

7.1.1 Trafikk på avkjøringsrampen fra E6 syd

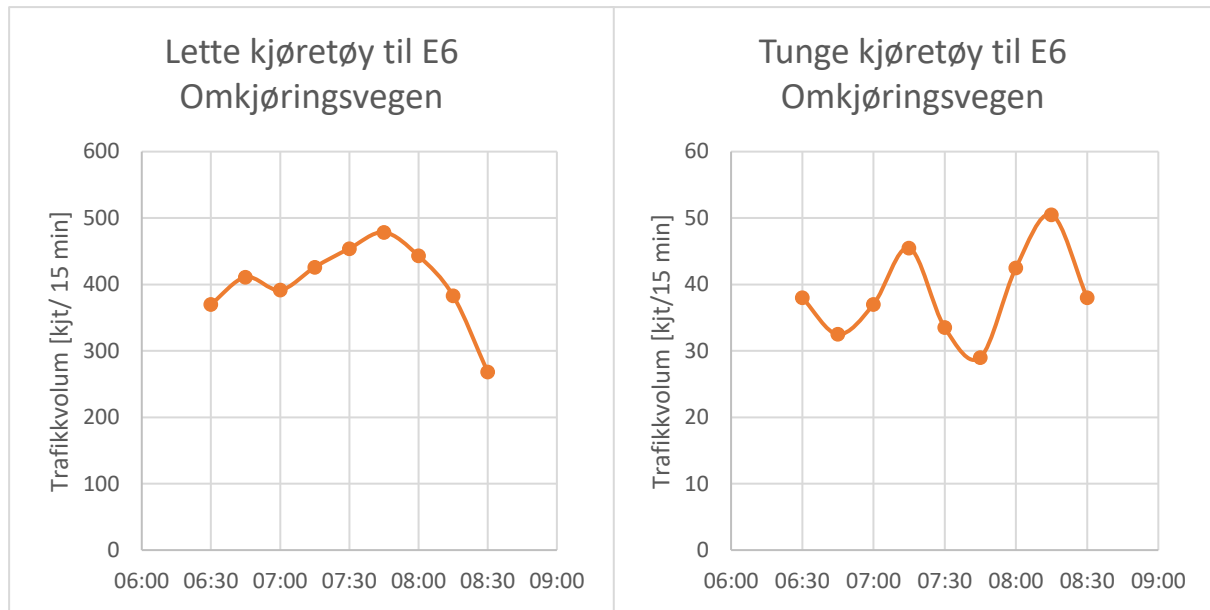
Trafikkvolumet på avkjøringsrampen over morgenrushperioden er vist i figur 7-1 med 5 minutters oppløsning. Figuren viser at trafikkvolumet i de høyest belastede periodene ligger i overkant av 2000 kjt/t, som er i samme størrelsesorden som forventet maksimal kapasitet for en avkjøringsrampe med ett kjørefelt.



Figur 7-1: Gjennomsnittlig trafikkvolum på avkjøringsrampen gitt på 5-minuttersintervall. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Hele perioden fra 06:35 til 08:40 bærer preg av mye trafikk, men perioden fra 07:35 til 08:15 er den mest belastede. Etter 08:15 begynner trafikken å avta. Det er også mulig å observere en mindre trafikktopp kl. 06:45, men da det kun er to dager som er lagt til grunn i registreringene vil dette kunne skyldes døgnvariasjonen.

Trafikksammensetningen domineres av lette kjøretøy, og trafikkveksten mot rushtoppen gjenspeiles tydelig i trafikkvolumet for de lette kjøretøyene, vist i figur 7-2. Figuren viser også hvordan tungbilvolumet i større grad varierer over rushperioden. Basert på de totale trafikkvolumene i perioden 06:30 til 08:45 blir den gjennomsnittlige tungbilandelen på ca. 8,7 %.



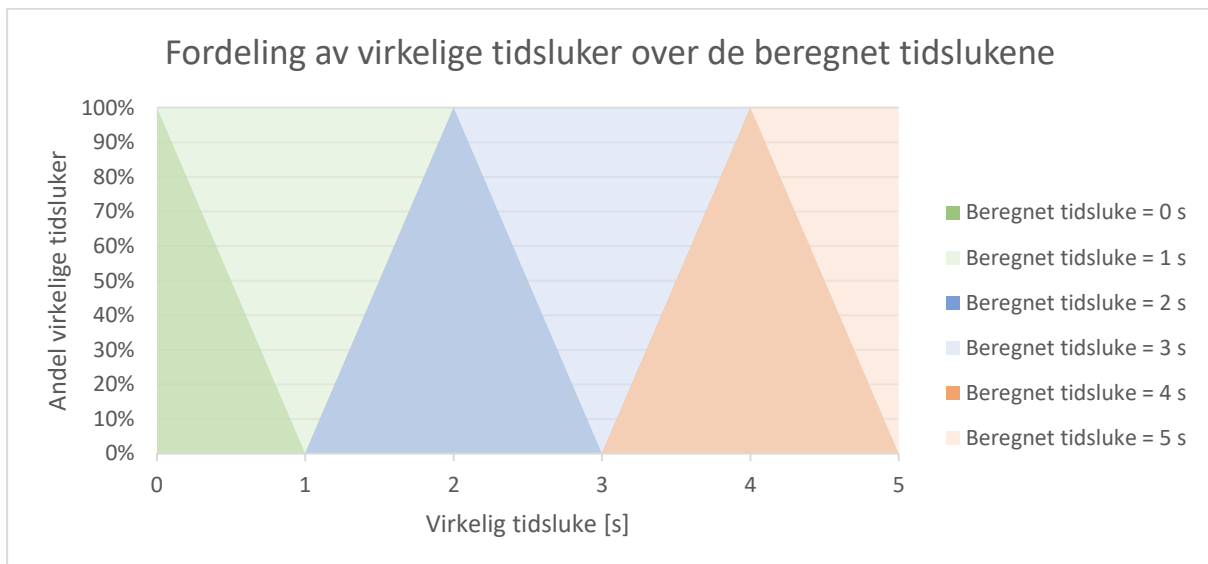
Figur 7-2: Trafikkvolum for henholdsvis lette og tunge kjøretøy til E6 Omkjøringsvegen gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

I registreringen av enkeltkjøretøyene på avkjøringsrampen fikk alle kjøretøy et tidsstempel på formatet tt:mm:ss for passeringstidspunktet. Da tidsluken beregnes som differansen mellom to tidsstempel vil denne oppgis som hele sekund. Ved å sammenligne resultatet med et resultat med hundredelsnøyaktighet vil en tidsluke på 1 sekund, i de mest ekstreme tilfellene, kunne korrespondere med en mer nøyaktig tidsluke på 0,01 til 1,99 sekunder, avhengig av tidsstemplene til passeringene. Tabell 7-1 viser et eksempel på beregningen av tidsluken der eksempel 1 og 2 representerer situasjonene med størst avvik fra virkelig tidsluke mens eksempel 3 representerer en situasjon der virkelig og beregnet tidsluke er like.

Tabell 7-1: Eksempel på tidslukeberegning. Eksempel 1 og 2 representerer situasjonene med størst avvik fra virkelig tidsluke, mens eksempel 3 representerer en situasjon der virkelig og beregnet tidsluke er like.

Eksempel nummer	Kjøretøy nummer	Tidsstempel				Virkelig tidsluke [sek]	Beregnet tidsluke [sek]
		Time (kjent)	Minutt (kjent)	Sekund (kjent)	Hundredel (ukjent)		
1	1	00	00	00	99	0,01	1
	2	00	00	01	00		
2	1	00	00	00	00	1,99	1
	2	00	00	01	99		
3	1	00	00	00	00	1,00	1
	2	00	00	01	00		

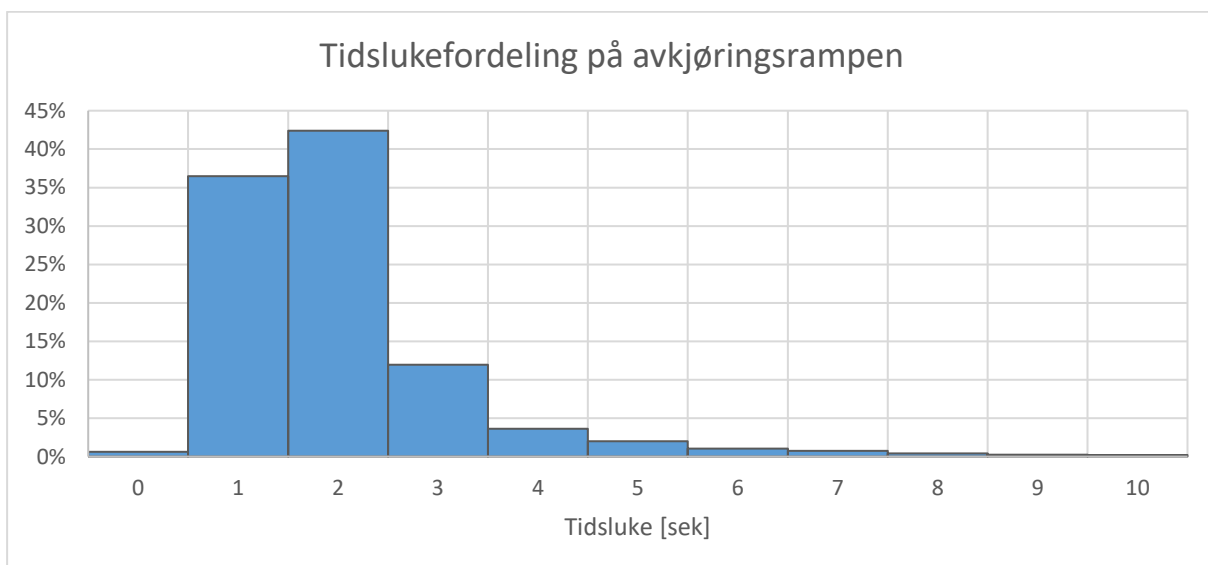
Det er viktig å påpeke at en virkelig tidsluke på 0,01 eller 1,99 sekunder kun vil bli representert som 1 sekund tidsluke i 1 av 100 tidsstempelkombinasjoner. Fordelingen av de virkelige tidslukene over de beregnede tidslukene vil henge sammen med den statistiske fordelingen gitt av alle mulige tidsstempelkombinasjoner. Figur 7-3 viser hvordan dette kan illustreres som stablede trekkanter, da en virkelig tidsluke bare vil kunne korrespondere med to ulike beregnede tidsluker og fordelingen mellom de to alternativene vil utvikle seg lineært. Når den virkelige tidsluken nærmer seg et helt antall sekunder vil sannsynligheten for at tidsluken blir beregnet til en tidsluke med det samme hele antallet sekunder øke.



Figur 7-3: Teoretisk fordelingen av virkelige tidsluker over de beregnede tidslukene.

Ved å legge inn en liten sikkerhetsmargin for å ta hensyn til ekstremtilfellene vil resultatet kunne tolkes som at en registrert tidsluke på 1 sekund viser at den virkelige tidsluken er under 2 sekunder.

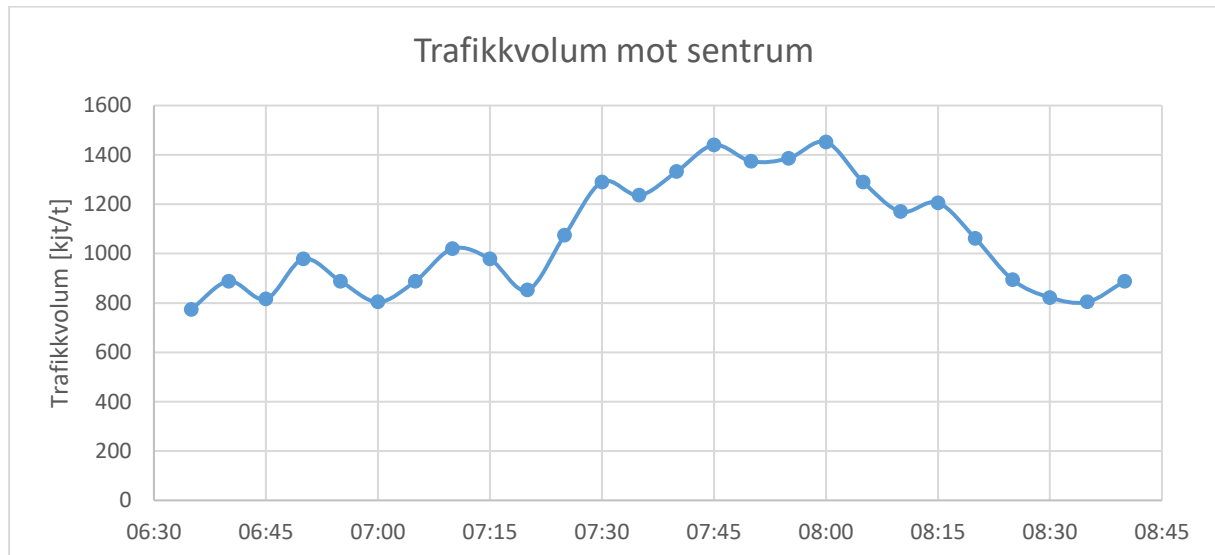
Gjennom tidslukefordelingen, vist i figur 7-4, kommer det også tydelig frem at avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen preges av tett trafikk. Figuren viser at majoriteten holder en tidsluke på 2 sekunder, og at tidsluker over 4 sekunder er lite representert. Det kumulative resultatet viser at ca. 80 % av tidslukene var 2 sekunder eller lavere, mens hele 95 % av tidslukene var på 4 sekunder eller lavere.



Figur 7-4: Tidslukefordeling på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen.

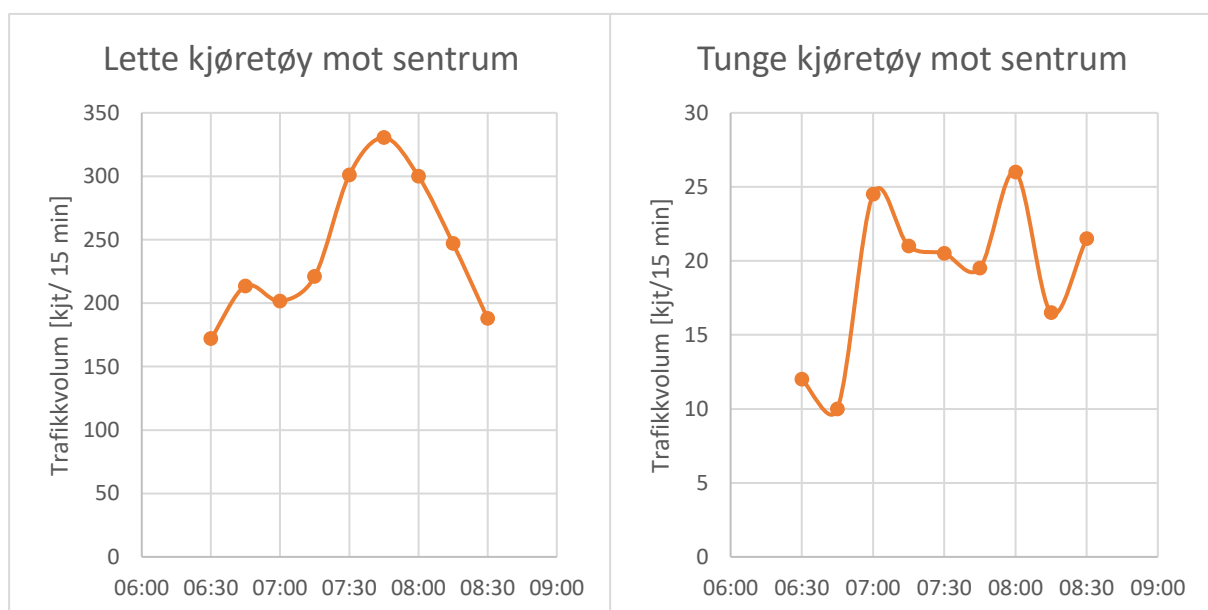
7.1.2 Trafikk på E6 syd mot Trondheim sentrum

Trafikkvolumet på E6 syd mot Trondheim sentrum over morgenrushperioden er vist i figur 7-5 med 5 minutters oppløsning. Det er relativt lite trafikk gjennom hele perioden fra 06:35 til 08:40, men perioden fra 07:30 til 08:15 er noe mer belastet. Etter 08:15 avtar trafikken igjen. Figuren viser at trafikkvolumet i de høyest belastede periodene ligger i overkant av 1400 kjt/t. Da trafikken i snittet disponerer to kjørefelt, viser dette til en overflødig kapasitet i vegnettet. Det framkommer en tydelig skjevfordeling mellom det fastsatte tilbudet og den registrerte etterspørselen ved Sluppenrampene.



Figur 7-5: Gjennomsnittlig trafikkvolum mot Trondheim sentrum basert på registreringer på 5-minuttersintervall. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Trafikksammensetningen domineres av lette kjøretøy, og trafikkveksten mot rushtoppen gjenspeiles tydelig i trafikkvolumet for de lette kjøretøyene, vist i figur 7-6. Figuren viser også hvordan tungbilvolumet i stor grad varierer over rushperioden. Tungbilandelen mot Trondheim sentrum er noe lavere enn på avkjøringsrampen, og basert på de totale trafikkvolumene i perioden 06:30 til 08:45 er den gjennomsnittlige tungbilandelen beregnet til å være ca. 7,3 %.

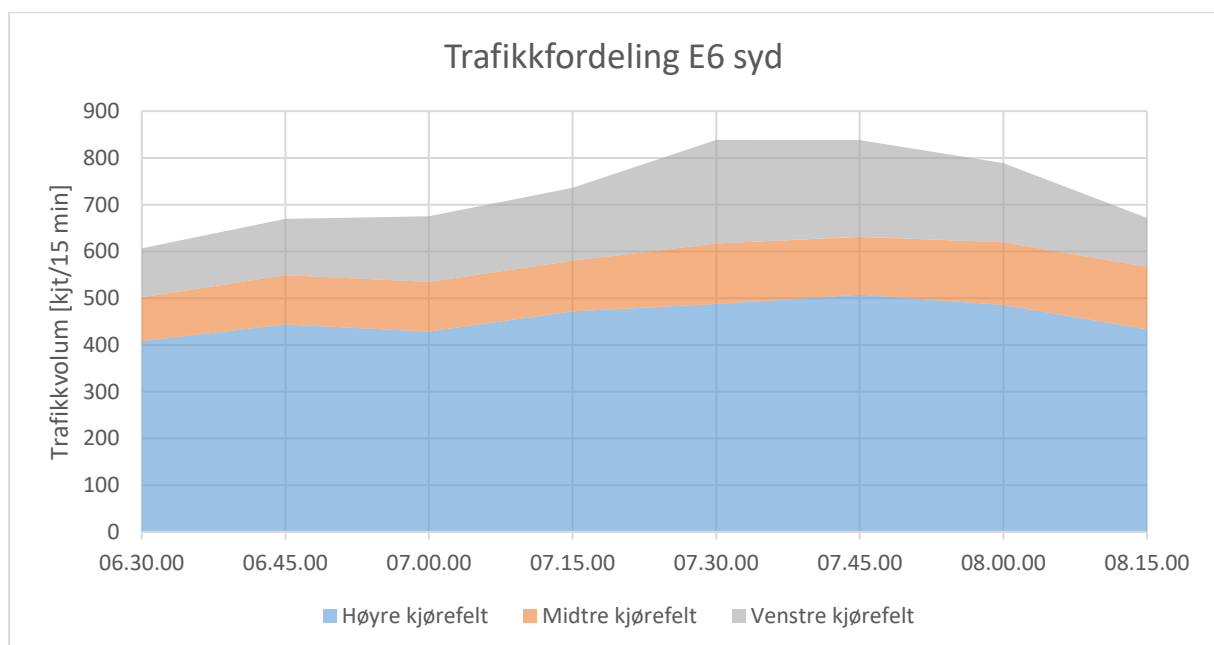


Figur 7-6: Trafikkvolum for henholdsvis lette og tunge kjøretøy mot Trondheim sentrum med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

7.1.3 Trafikkfordeling

De manuelle videoregistreringene viser at trafikkfordelingen i morgenrushet er veldig ulik kapasitetsfordelingen gitt av antall kjørefelt i hver retning. Figur 7-7 viser hvordan trafikken fordeler seg over de ulike kjørefeltene rett i forkant av avkjøringsrampen. Det antas at trafikken i høyre kjørefelt vil fortsette på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen, mens trafikken i midtre og venstre kjørefelt vil fortsette mot Trondheim sentrum.

Den maksimale kapasiteten for et enkelt kjørefelt er forventet å ligge på ca. 450-500 kjt/15min. Figur 7-7 viser dermed hvordan høyre kjørefelt ligger opp mot og på kapasitetsgrensen gjennom nesten hele morgenrushperioden. Trafikken i midtre kjørefelt er lite påvirket gjennom rushperioden, og ligger stabilt på 100-135 kjt/15min. Samtidig kommer rushtoppen tydeligere frem i venstre kjørefelt der trafikkvolumet nesten doubler seg rundt 07:30 sammenlignet med både starten og slutten av perioden. Dette er en indikasjon på at den saktegående trafikken i høyre kjørefelt innvirker på feltvalget til trafikken som skal mot sentrum. Midtre kjørefelt vil i perioder fungere som en buffersone som skiller mellom de to trafikkstrømmene, der sjåførenes handlingsmønster kan fremstå som mindre forutsigbart enn i de resterende kjørefeltene.



Figur 7-7: Fordeling av trafikkvolum mellom kjørefeltene rett i forkant av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Andelen av det totale trafikkvolumet som fortsetter mot henholdsvis avkjøringsrampen og Trondheim sentrum er presentert i tabell 7-2. Andelen som fortsetter mot avkjøringsrampen ligger i overkant av 60 %, med de høyeste verdiene i begynnelsen av rushperioden og de laveste i rushtoppen. Dette har trolig sammenheng med en flatere rushtopp for trafikken som skal til E6 Omkjøringsvegen da trafikken blir fordelt utover en lengre periode på grunn av kapasitetsproblemer, mens rushtoppen for trafikken mot Trondheim sentrum er noe spissere da kapasiteten legger minimale føringer for fordelingen.

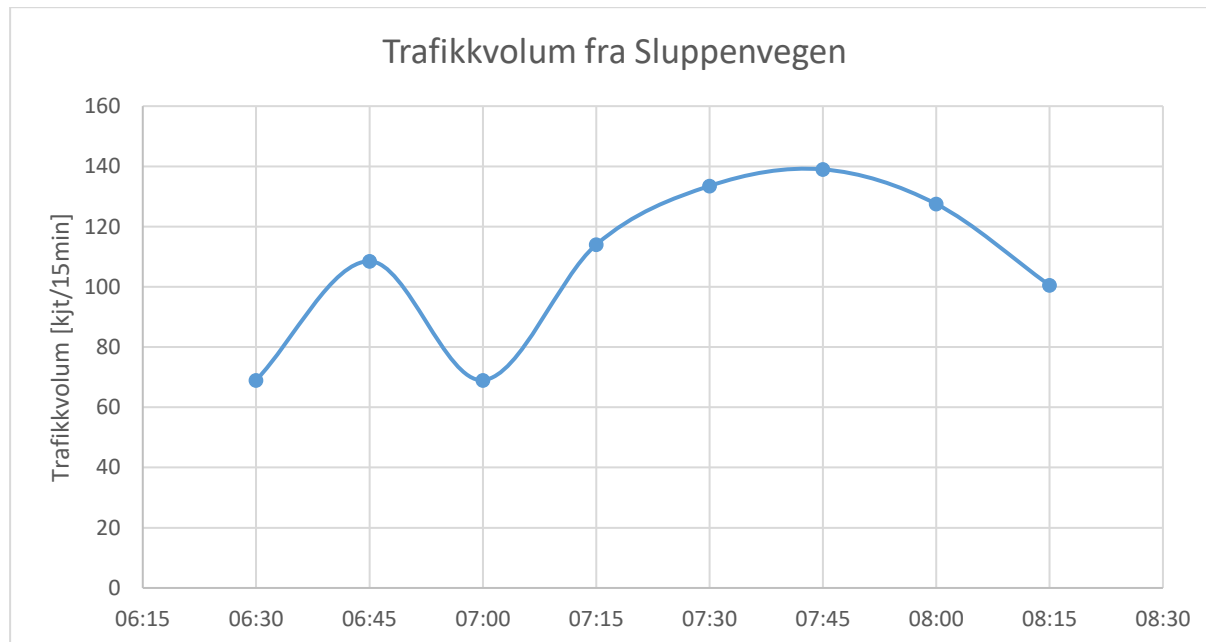
Basert på de totale trafikkvolumene i perioden fra 06:30 til 08:30 er den gjennomsnittlige andelen som benytter avkjøringsrampen beregnet til å være 62,9 %. De resterende 37,1 % vil være trafikk mot Trondheim sentrum. Fordelingen av tungtransporten følger i stor grad det samme mønsteret som den resterende trafikken, men det er en noe større andel til avkjøringsrampen. Oppstrøms for avkjøringsrampen ligger tungbilandelen på 8,2 % gjennom morgenrushet.

Tabell 7-2: Fordeling av trafikkvolum mellom avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og E6 syd videre mot Trondheim sentrum, gitt med kvartersoppløsning.

Starttidspunkt	Totalt trafikkvolum [kjt/15 min]	Andel avkjøringsrampe	Andel mot sentrum
06:30	607	67,2 %	32,8 %
06:45	670	66,2 %	33,8 %
07:00	675	63,5 %	36,5 %
07:15	736	64,1 %	35,9 %
07:30	839	58,1 %	41,9 %
07:45	838	60,6 %	39,4 %
08:00	789	61,6 %	38,4 %
08:15	672	64,6 %	35,4 %
Trafikkfordeling, gjennomsnittlig andel:		62,9 %	37,1 %

7.1.4 Påkjøringsrampen fra Sluppenvegen

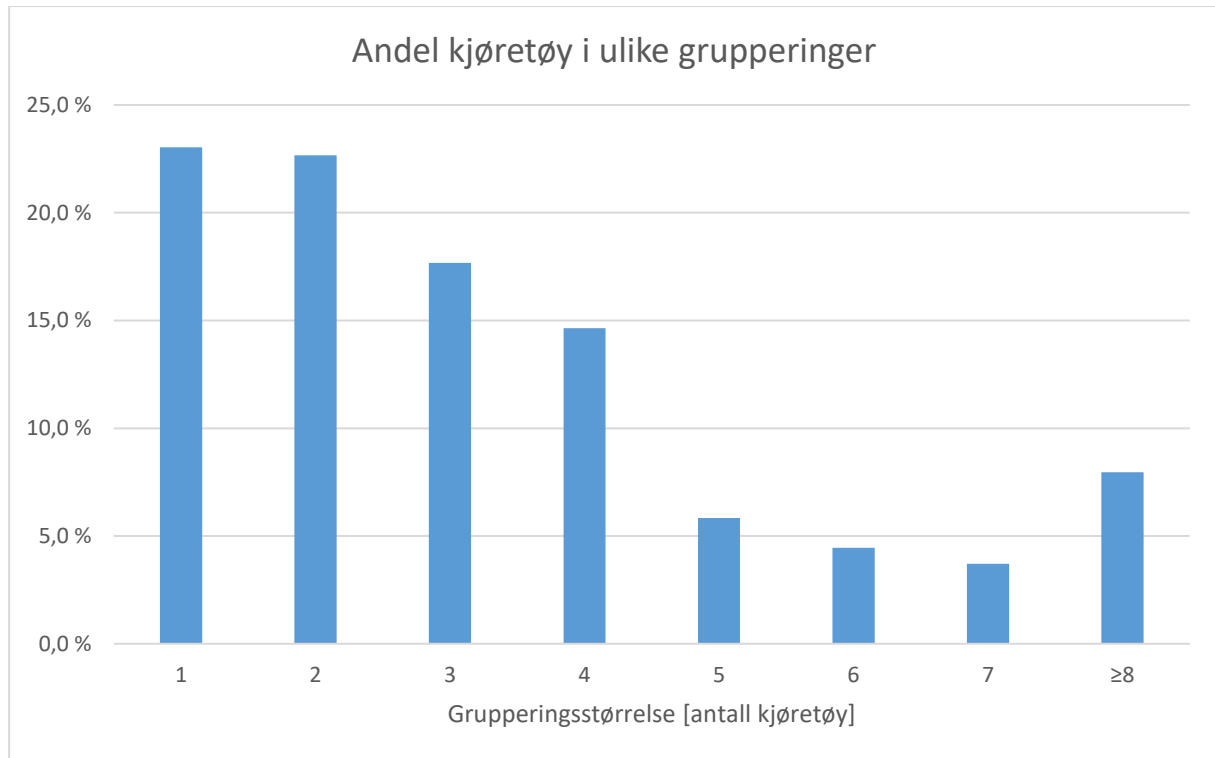
Trafikken som kommer fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen har liten direkte betydning for trafikksituasjonen på og oppstrøms for avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Trafikkstrømmen kan likevel ha en indirekte påvirkning på utviklingen ved at kjøretøyene fra avkjøringsrampen i perioder hindres i å gjennomføre et feltskifte mot høyre etter at de to rampene møtes. Tall på trafikkmengden fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen er dermed nødvendig som grunnlag for simuleringsmodellen, og er vist i figur 7-8. Trafikktoppen forekommer i samme periode som på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen.



Figur 7-8: Trafikkvolum fra de manuelle registreringene på påkjøringsrampen fra Sluppenvegen. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Selv om trafikkvolumet er relativt lavt kan påvirkningen fra trafikkstrømmen forsterkes da trafikken ofte kommer gruppevis. I perioder med store grupperinger vil trafikken kunne gi tilsvarende påvirkning som om strekningen hadde hatt tett trafikk. Hvis kjøretøyene hadde blitt fordelt jevnt over perioden ville den gjennomsnittlige tidsluken mellom kjøretøyene vært på 8,6 sekunder.

Basert på de registrerte tidslukene, beregnet på samme måte som for tidslukene på avkjøringsrampen, kommer andelen kjøretøy i ulike grupperinger tydeligere frem. Dette er presentert i figur 7-9, hvor en tidsluke på under 6 sekunder mellom hvert kjøretøy er satt som grense for at kjøretøyene skal regnes som en gruppering. Figuren viser at over 50 % av alle kjøretøy på avkjøringsrampen fra Sluppenvegen kommer i grupperinger på tre eller flere kjøretøy. Tidslukene mellom de enkelte grupperingene er relativt store og ligger i snitt på 15,5 sekunder. Til sammenligning har kjøretøyene internt i en gruppering en gjennomsnittlig tidsluke på 2,8 sekunder.

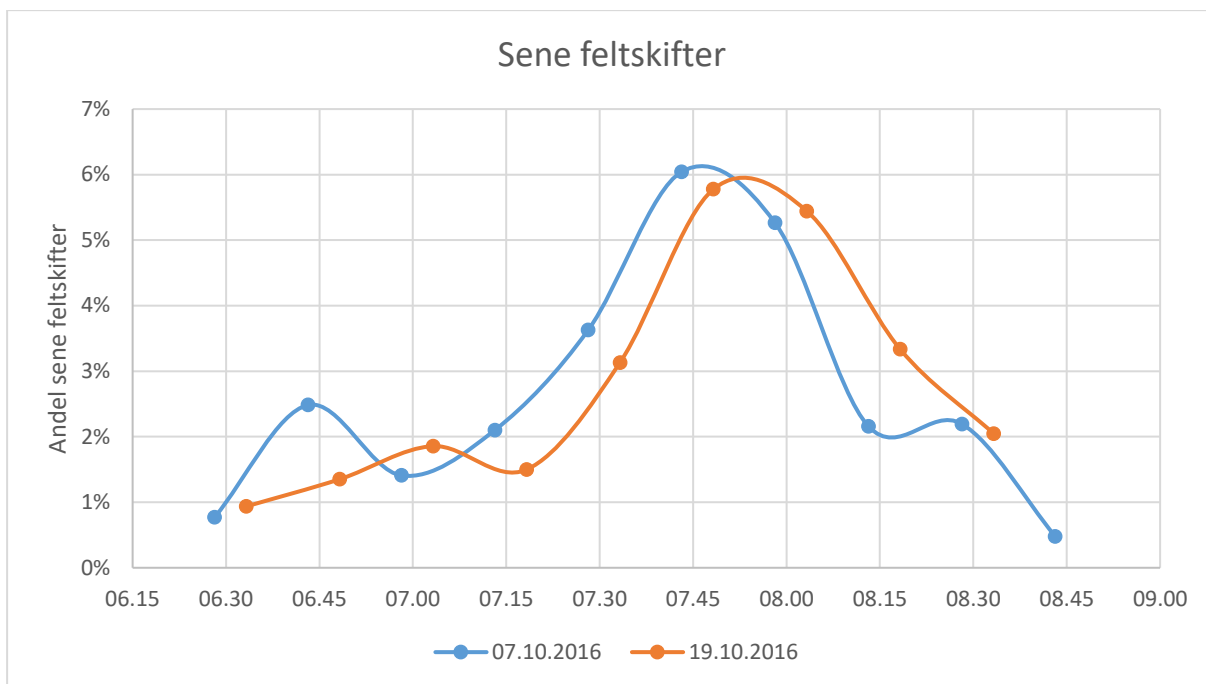


Figur 7-9: Andel kjøretøy i ulike grupperingsstørrelser på påkjøringsrampen fra Sluppenvegen.

7.1.5 Sene feltskifter

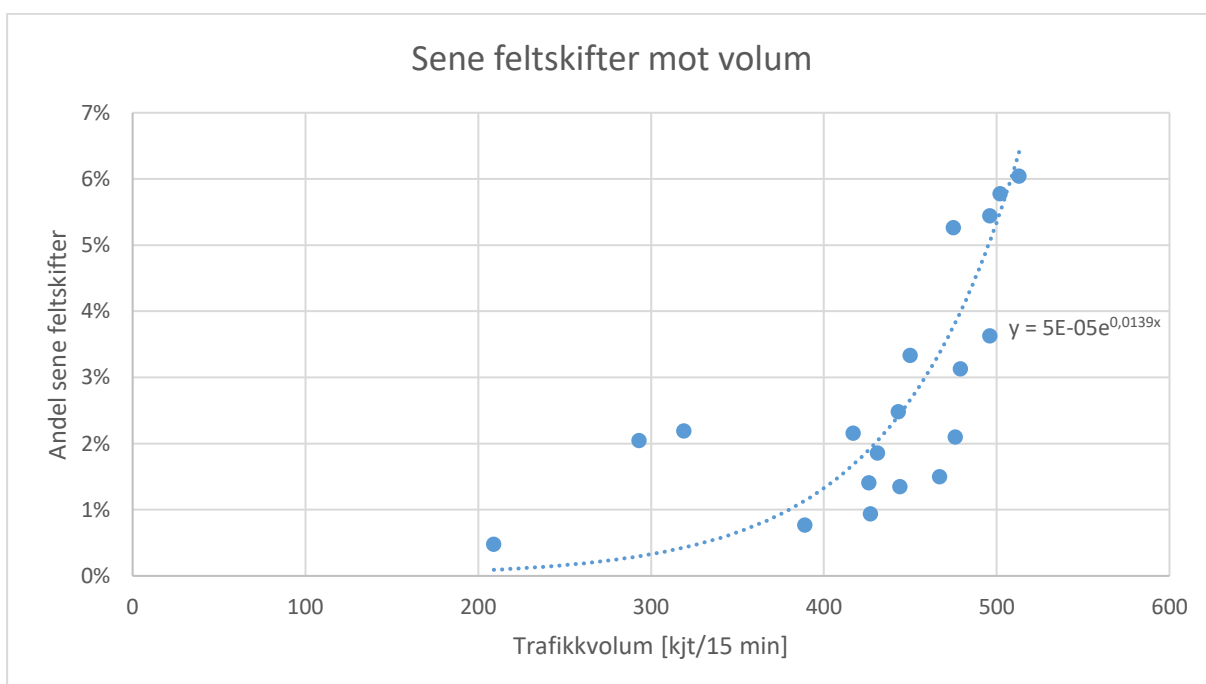
Antallet sene feltskifter i forkant av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen har en direkte sammenheng med trafikkvolumet på selve avkjøringsrampen. Forekomsten øker ved en økning i trafikkvolum på og i forkant av avkjøringsrampen. Figur 7-10 viser hvor stor andel av trafikken på avkjøringsrampen som gjennomfører et sent feltskifte gjennom morgenrushet for hver av registreringsdagene. Den største andelen sene feltskifter forekommer i perioden rundt 07:50 og 08:00, og utgjorde ca. 6 % av all trafikken som skulle på rampen. Da toppunktene for registreringsdagene forekommer på litt ulike tidspunkt tyder dette på at de trafikale forholdene innvirker på hyppigheten av sene feltskifter.

I det høyest belastede kvarteret blir det i gjennomsnitt gjennomført 2 sene feltskifter i minuttet. Samtidig er andelen sene feltskifter minimal ved lave trafikkvolum i forkant og i etterkant av morgenrushet. Dette har sammenheng med at det ikke er noe å tjene på å kjøre forbi trafikken i høyre kjørefelt over Kroppan bru ved lave trafikkvolum, da alle kjørefeltene holder tilnærmet samme hastighet. Ved høye trafikkvolum vil det derimot være mulig å oppnå marginale tidsbesparelser, da trafikken i høyre kjørefelt holder lavere hastigheter over Kroppan bru enn de resterende kjørefeltene.



Figur 7-10: Sene feltskifter som en andel av trafikkvolumet på avkjøringsrampen for hver av registreringsdagene, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Ved å fremstille andelene som en funksjon av trafikkvolumet på avkjøringsrampen er det mulig å se at sammenhengen mellom de to parameterne følger en tilnærmet eksponentiell vekst. Dette er vist i figur 7-11, sammen med en tilpasset eksponentiell funksjon. Det er naturlig å anta at veksten stoppes eller begrenses når trafikkvolumet på avkjøringsrampen nærmer seg kapasiteten. Ved å følge den eksponentielle funksjonen vil dette inntreffe ved ca. 7 %, som vil tilsvare et trafikkvolum på ca. 520 kjt/15min. Kjøretoy som legger seg inn etter at denne grensen er nådd vil forstyrre trafikkstrømmen og dermed redusere det korresponderende trafikkvolumet.



Figur 7-11: Sammenhengen mellom andelen sene feltskifter og trafikkvolumet på avkjøringsrampen.

7.1.6 Bussregistreringer

Fra de manuelle registreringene ble det gjennomført registreringer knyttet til bussenes ankomst og avgang. Hver buss ble registrert med tidsstempel på formatet tt:mm:ss, noe som gjorde det mulig å kartlegge hvor mange busser som i gjennomsnitt betjente holdeplassen innenfor hvert 15-minuttersintervall. Da de manuelle registreringene ble avsluttet før 08:30 er verdier for det siste intervallet utelatt. På grunn av kameradekkingen var det ikke mulig å finne fordelingen av busser mellom sentrum og E6 Omkjøringsvegen.

Antall busser innenfor hvert 15-minuttersintervall var relativt stabilt over registreringsperioden. Det ble derfor beregnet en felles avgangsfrekvens med tilhørende standardavvik gjeldende for hele perioden. Frekvensen ble basert på det totale gjennomsnittet av antall busser innenfor hvert kvarter. Basert på tidsstempelet var det mulig å beregne tidsluken mellom hver bussavgang. Tidslukene ble videre benyttet til å beregne et standardavvik knyttet til frekvensen. I tabell 7-3 er resultatet fra de forskjellige beregningene gjengitt.

Tabell 7-3: Gjennomsnittlig avgangsfrekvens og standardavvik basert på de manuelle registreringene. Registreringene er gitt på intervallenes starttidspunkt.

Starttidspunkt	Gjennomsnittlig antall busser per 15 min	Gjennomsnittlig antall busser	Frekvens	Standardavvik
07:00	13	12,2	01:14	01:18
07:15	11			
07:30	14,5			
07:45	10,5			
08:00	12			
08:15	-			
Total	61			

Tabellen viser at det i snitt er én bussavgang hvert 1 minutt og 14 sekund i perioden mellom 07:00 og 08:15. Videre er standardavviket gitt i tilsvarende størrelsesorden, noe som viser til at flere bussavganger kan gå samtidig.

Gjennomsnittlig oppholdstid for hver buss ble beregnet ved bruk av tidsdifferansen mellom ankomst og avgang. Videre ble det estimert at ca. 10 sekunder faller bort til inn- og utkjøring fra holdeplassen. Utregningene ble dermed gjort ved bruk av følgende ligning:

$$t_{opph.} = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_{ut,i} - t_{inn,i}) - 10]}{n}$$

Resultatet av beregningene, med det tilknyttede standardavviket, er gjengitt i tabell 7-4.

Tabell 7-4: Gjennomsnittlig oppholdstid og standardavvik basert på manuelle registreringer.

Dato	Oppholdstid [s]	Standardavvik [s]
07.10.2016	19	8
19.10.2016	24	5
Snitt	21	7

Tabellen viser at den gjennomsnittlige oppholdstiden ligger på 21 sekunder med et standardavvik på 7 sekunder. Fra tallene kan det konkluderes med at passasjerbyttet foregår relativt effektivt. Videre vil også disse forholdene kunne bidra til at flere bussavganger går samtidig.

Antall bussavganger som går tilnærmet samtidig ble følgelig kartlagt. Det ble vurdert slik at en registrert tidsluke mellom avganger på 10 sekunder eller lavere kan anses som at bussene kjører ut samtidig. Valg av kriterium til tidsluker baserer seg på antakelsen om at det vil være få kjøretøy som kan benytte seg av lukene som oppstår mellom bussene og at trafikkstrømmen i høyre kjørefelt fortsatt vil kunne anses som avbrutt.

Fra registreringer gjennomført 07.10.16 ble det avdekket åtte tilfeller der to busser kjørte ut samtidig og ett tilfelle der tre busser kjørte ut samtidig. Dette viser til at 19 av totalt 70 busser hadde avgang samtidig, noe som utgjør ca. 27 % av alle avgangene. Fra registreringene gjennomført 19.10.16 ble det kun avdekket 3 tilfeller der to busser kjørte ut samtidig. Dette viser til at 6 av totalt 62 hadde avgang samtidig, noe som utgjør ca. 10 % av alle avgangene.

Analysen konkluderer med at det foreligger mange tilfeldigheter knyttet til bussenes ankomst og avgang. Bussenes innvirkning på den totale trafikkavviklingen vil følgelig kunne variere mye mellom dagene, men vil i stor grad avhenge av trafikkbildet for øvrig.

7.2 Rutetider

Basert på informasjon hentet fra hjemmesiden til AtB har bussavgangene mot sentrum blitt kartlagt for perioden 06:30 til 08:30, og er gjengitt i vedlegg 4. Det ble valgt å skille periodene med og uten dekning fra de manuelle registreringene i videre beregninger av gjennomsnittlig antall avganger, frekvens og standardavvik for å ha et korrekt sammenligningsgrunnlag. Resultatet fra beregningene er gjengitt i tabell 7-5.

Tabell 7-5: Avganger til Trondheim sentrum basert på rutetider hentet fra AtB. Registreringene er gitt på intervallenens starttidspunkt.

Starttidspunkt	Antall busser	Gjennomsnitt	Frekvens	Standardavvik
06:30	7	6	00:02:30	00.02.23
06:45	5			
07:00	12	12,7	00:01:11	00.01.01
07:15	11			
07:30	19			
07:45	9			
08:00	14			
08:15	11			
Total	88	11	00:01:22	00:01:19

Fra tabellen kan man se at avgangsfrekvensen er tilnærmet halvert i perioden 06:30 til 07:00 sammenlignet med perioden 07:00 til 08:30. Ved å sammenligne tidsperioden fra 07:00 til 08:30 med de overlappende manuelle registreringene, ser man at det gjennomsnittlige antallet avganger er noe høyere basert på rutetidene. Dette kan skyldes at ikke alle bussene stoppet ved holdeplassen. Avgangsfrekvensen gitt av rutetidene og de manuelle tellingene ligger likevel innenfor samme størrelsesorden.

En tilsvarende kartlegging av bussavgangene som går til E6 Omkjøringsvegen ble også gjennomført. Da det kun er tre busser som benytter seg av E6 Omkjøringsvegen i den gitte tidsperioden, der avgangene fordeler seg ujevnt over morgenrushet, vil bruk av avgangsfrekvens og standardavvik gi en misvisende representasjon av den faktiske situasjonen. Det ble derfor valgt å presentere den faktiske tiden mellom hver av avgangene, som vist i tabell 7-6.

Tabell 7-6: Avganger til E6 Omkjøringsvegen basert på rutetider hentet fra AtB.

Klokkeslett	Rute	Tid mellom avgang
06:30	90	
07:11	310	00:41:00
07:22	90	00:11:00

Videre kan det konkluderes med at andelen busser som benytter seg av Kroppanbrua bussholdeplass og skal videre på E6 Omkjøringsvegen er veldig lav gjennom morgenrushet.

7.3 Trafikkregistreringsstasjoner

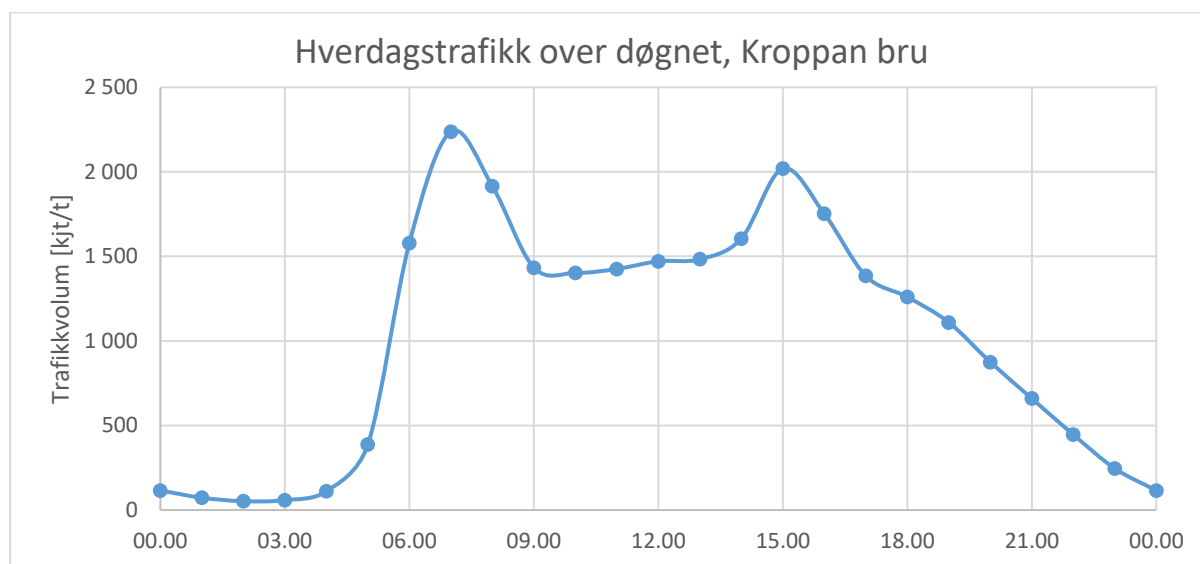
Ved bruk av registreringer hentet fra trafikkregistreringsstasjonene er det mulig å avdekke forhold og sammenhenger i trafikkbildet som vanskelig lar seg observere og tallfeste direkte. Videre vil de trafikale forholdene ved trafikkregistreringsstasjonene på Kroppan bru og Sunnland presenteres.

7.3.1 Kroppan bru

I behandlingen av dataene fra trafikkregistreringsstasjon på Kroppan bru ble det fokusert på enkeltkjøretøydatabe, da timesgjennomsnitt ble for grov tidsinndeling til å beskrive rushtidssituasjonen. Timesgjennomsnittene ble likevel brukt til å vise noen overordnede trender over døgnet.

7.3.1.1 Timesgjennomsnitt

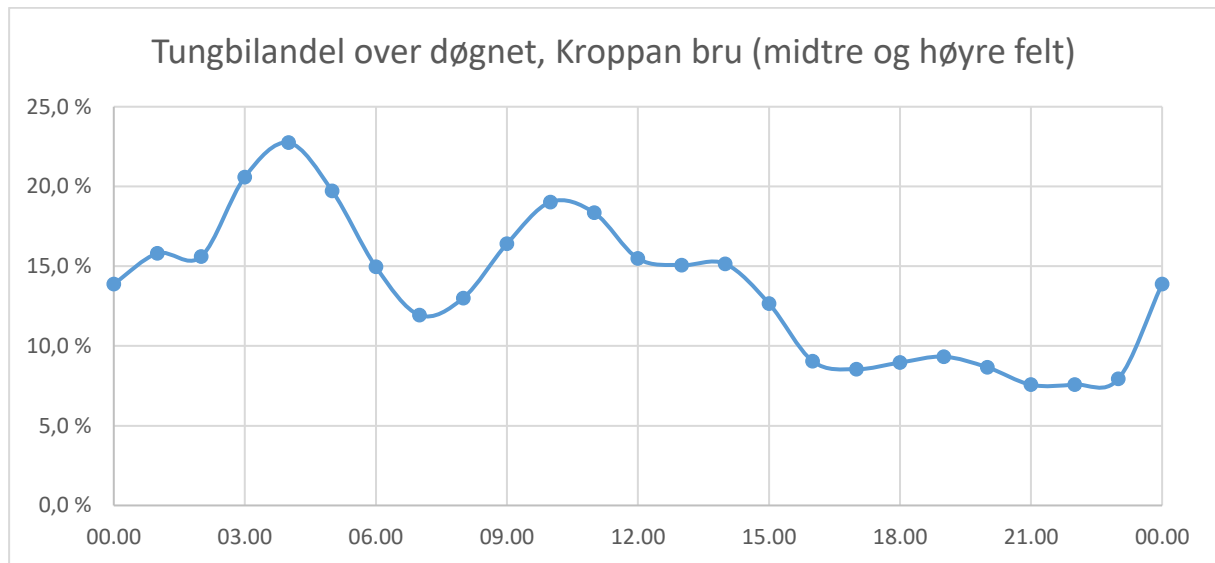
Registreringer fra trafikkregistreringsstasjon på Kroppan bru viser at perioden med høyest belastning er morgenrushet i tidsrommet mellom 07:00 og 08:00. Dette er illustrert i figur 7-12, som viser gjennomsnittlig trafikkvolum over døgnet for hverdager. Gjennomsnittet baserer seg på i underkant av 14 døgn med registreringer i midtre og høyre kjørefelt. Den totale trafikkmengden som passerer gjennom snittet vil være noe høyere, da trafikken i venstre kjørefelt ikke har blitt registrert.



Figur 7-12: Gjennomsnittlig hverdagstrafikk over døgnet registrert på Kroppan bru i midtre og høyre kjørefelt, gitt med timesoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt

I henhold til Statens vegvesens registreringsmetoder er kjøretøy over 5,6 meter definert som tunge kjøretøy (Statens vegvesen, 2014b). Basert på lengdemålingene i datasettet er tungbilandelen over døgnet beregnet. Resultatet, gjengitt i figur 7-13, viser at tungbilandelen reduseres i morgenrushet, og ligger på 11,9 % mellom 07:00 og 08:00. Det er naturlig å anta at trafikken i venstre kjørefelt domineres

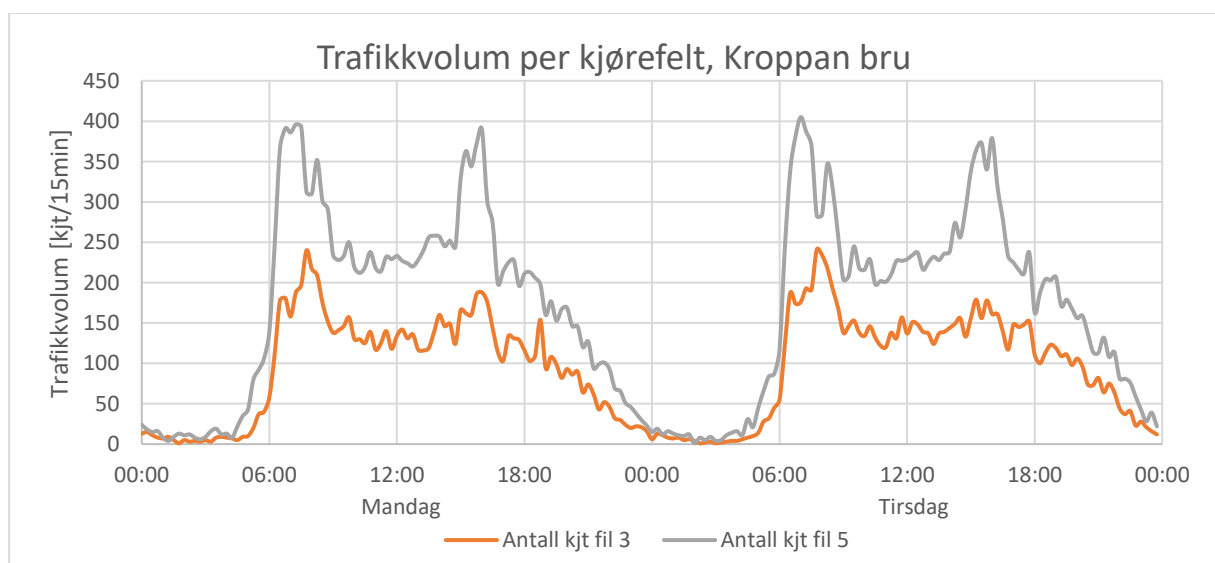
av lette kjøretøy, da dette er en strekning med tre kjørefelt. Tungbilandelen i snittet kan dermed antas å være noe lavere, da trafikken i venstre kjørefelt ikke er med i beregningene.



Figur 7-13: Gjennomsnittlig tungbilandel over døgnet for hverdager registrert på Kroppan bru i midtre og høyre kjørefelt, gitt med timesoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

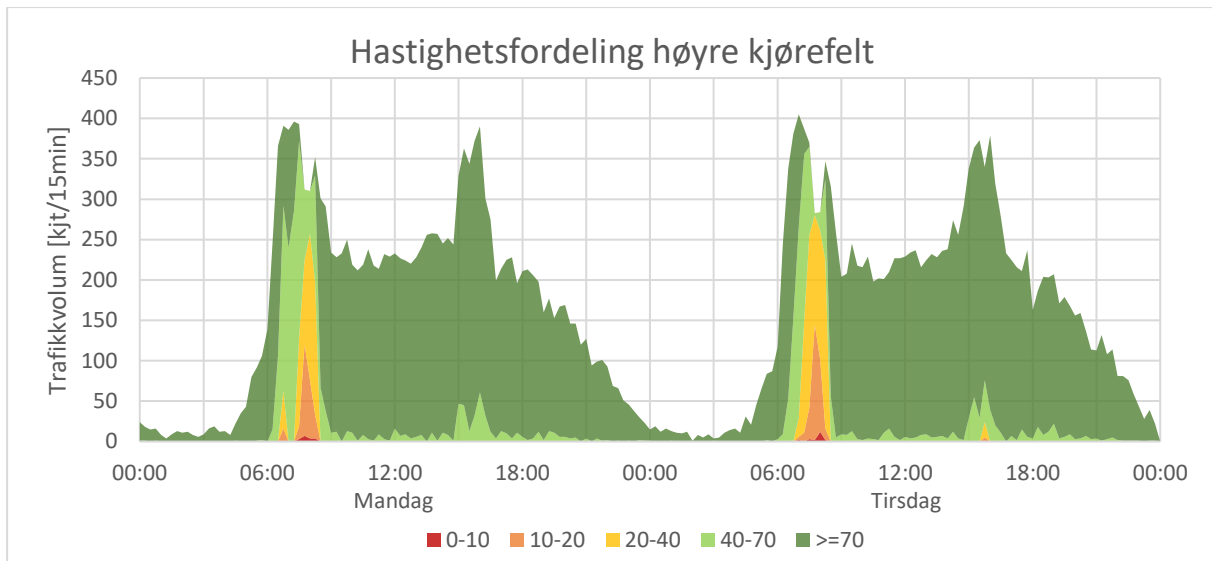
7.3.1.2 Enkeltkjøretøy

Enkeltkjøretøydatasettet inneholdt registreringer for to hverdager, en mandag og en tirsdag. Som nevnt tidligere var alle registreringene fra venstre kjørefelt ustabile, og disse er dermed utelatt i sin helhet. Basert på registreringene er trafikkvolumet per kjørefelt fremstilt med kvartersoppløsning i figur 7-14, som viser at trafikkvolumet er størst i høyre kjørefelt. Trafikken i midtre kjørefelt kan til en viss grad oppfattes som en reaksjon på trafikken i høyre kjørefelt, der veksten og nedbyggingen i midtre kjørefelt skjer over en kortere periode, samtidig som toppen er litt forskjøvet. Morgenrushtoppene kommer likevel tydelig frem i begge kjørefeltene, men ettermiddagsrushet blir noe mer utjevnet i midtre kjørefelt. Registreringene viser også en antydning til to topper i morgenrushet på samme måte som de manuelle videoregistreringene viste for trafikken på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen.



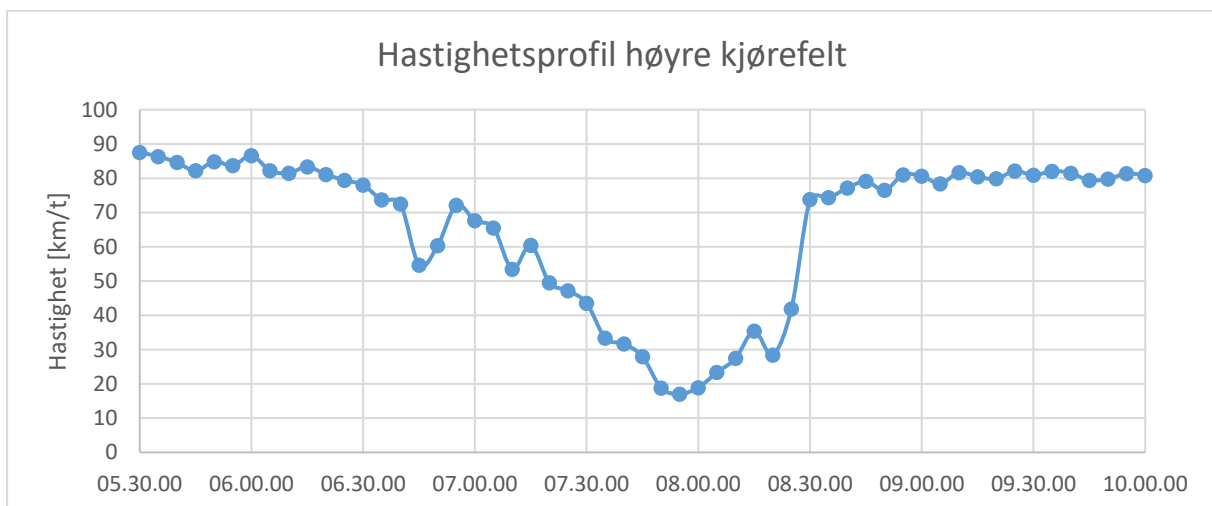
Figur 7-14: Trafikkvolum per kjørefelt på Kroppan bru over døgnet for mandag 24.10.16 (t.v) og tirsdag 25.10.16 (t.h), gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Ved å se nærmere på hastighetsfordelingen i høyre kjørefelt kommer det tydelig frem at morgenrushtoppen preges av redusert hastighet, i motsetning til ettermiddagsrushtoppen. Dette er vist i figur 7-15. Hastigheten reduseres på det verste helt ned mot 0 km/t, men for trafikken totalt ligger den laveste gjennomsnittshastigheten over 15 minutter på ca. 20 km/t.



Figur 7-15: Hastighetsfordelingen i høyre kjørefelt på Kroppan bru, vist som antall kjøretøy per kvarter fordelt på ulike hastighetsklasser. Hastighetene er gitt i km/t. Registreringene viser mandag 24.10.16 (t.v) og tirsdag 25.10.16 (t.h), og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Dette kommer tydeligere frem ved å se på hastighetsprofilen i høyre kjørefelt med en oppløsning på 5 minutter, vist i figur 7-16. Hastighetsprofilen er basert på gjennomsnittet av alle enkelthastighetene i hvert tidsintervall for de to registreringsdagene. Beregningene bygger på antakelsen om at den målte punkthastigheten for enkeltkjøretøyene er tilnærmet lik strekningshastigheten, og registreringene er deretter aggregert til en oppløsning på 5 minutter ved bruk av harmonisk gjennomsnitt.



Figur 7-16: Gjennomsnittlig hastighetsprofil i morgenrusket for høyre kjørefelt på Kroppan bru basert på registreringer fra mandag 24.10.16 og tirsdag 25.10.16, gitt med en oppløsning på 5 minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Med utgangspunkt i den beregnede strekningshastigheten (u) og det registrerte trafikkvolumet (q) er tettheten (k) beregnet ved hjelp av den fundamentale sammenhengen:

$$q = u \cdot k$$

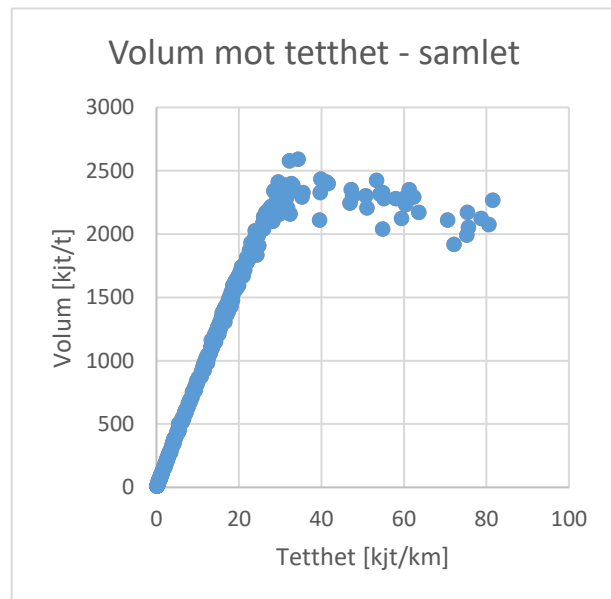
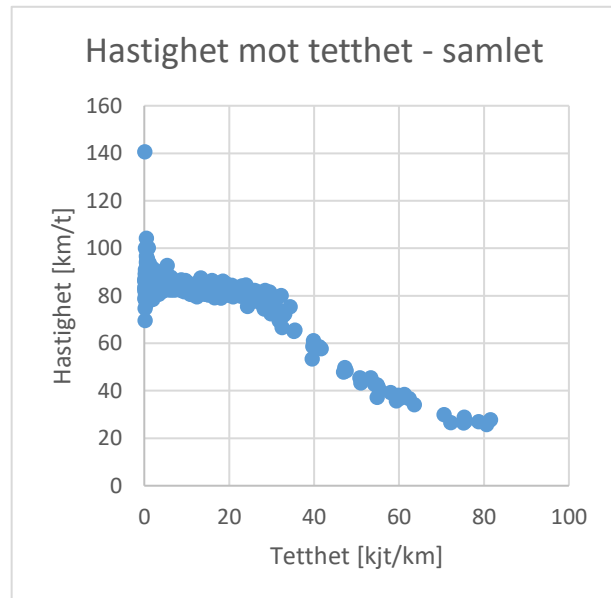
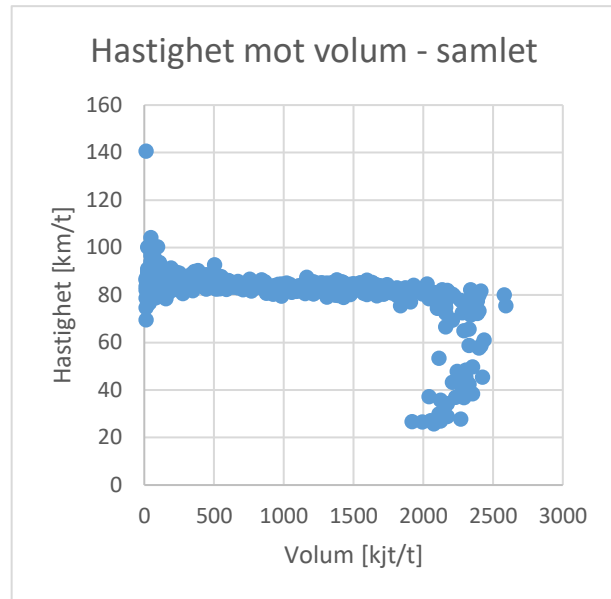
Resultatet basert på beregninger med 5 minutters oppløsning er gitt i figur 7-17 og figur 7-18 for henholdsvis midtre og høyre kjørefelt samlet og hver for seg.

For midtre og høyre kjørefelt samlet opprettholdes en hastighet i overkant av fartsgrensen på 80 km/t for volum helt opp til 2000 kjt/t. For volum over 2000 kjt/t kan det virke som trafikken nærmer seg kapasitetsgrensen, da avviklingskvaliteten reduseres. Ved å se på kjørefeltene hver for seg kommer det tydelig frem at det fremdeles er overskuddskapasitet i midtre kjørefelt, mens de lave hastighetene og avviklingsproblemene er å finne i høyre kjørefelt. Hastigheten i midtre kjørefelt reduseres ved noe lavere volum enn for høyre kjørefelt, noe som kan indikere at trafikken i midtre kjørefelt blir påvirket av at trafikken i høyre kjørefelt går saktere. Kapasitetsmessig er det ingen grunn til at kjøretøyene i midtre kjørefelt ikke skal kunne opprettholde hastigheten.

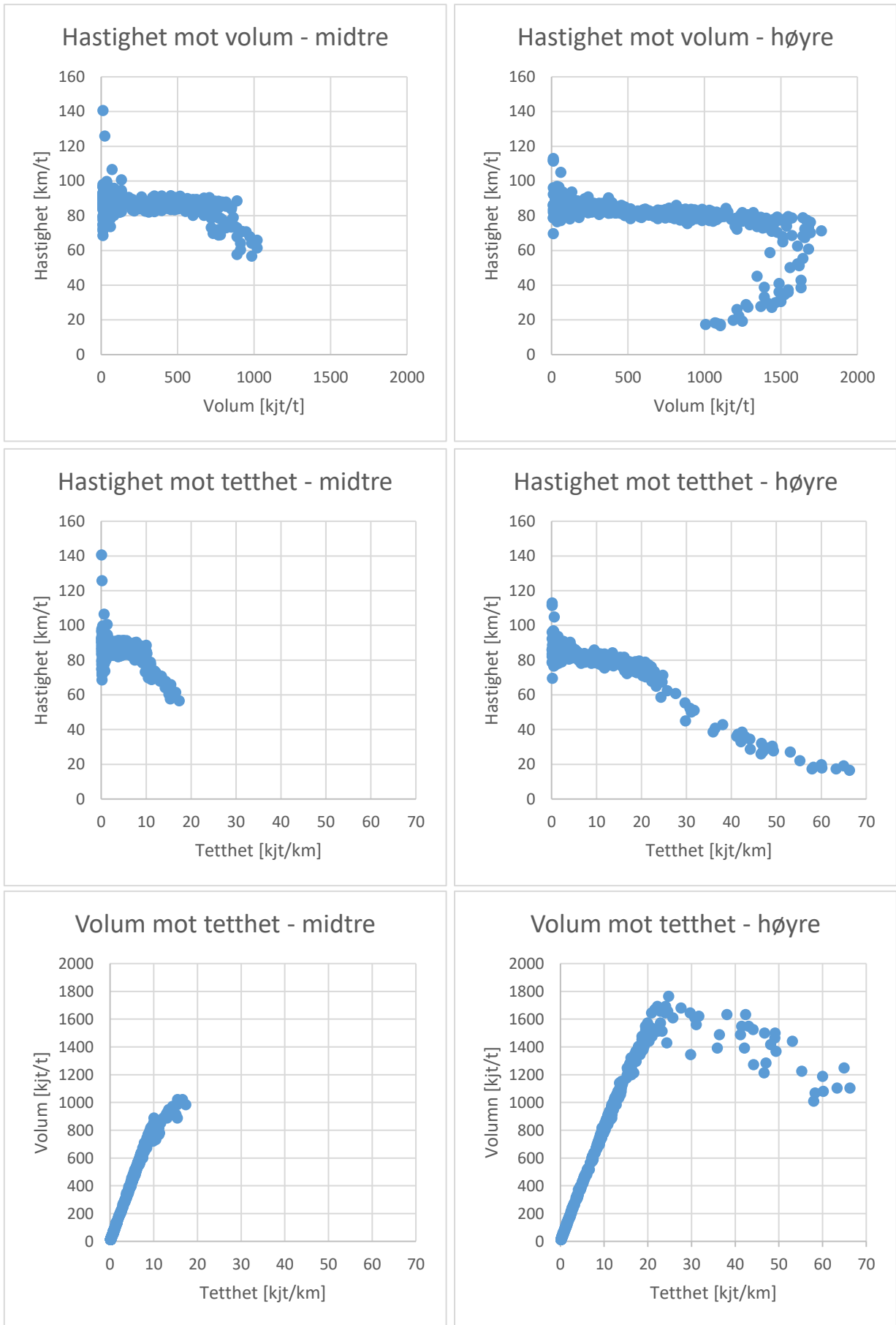
Høyre kjørefelt når den øvre kapasitetsgrensen ved trafikkvolum i overkant av 1700 kjt/t, men ved de laveste hastighetene i sammenbruddssituasjonen oppnås kun en gjennomstrømning på 1000 kjt/t.

Gjennom grafene som viser tetthetssammenhengene kommer det også tydelig frem at det er få trafikale problemer i midtre kjørefelt, samtidig som høyre kjørefelt preges av dårlig avvikling. Der midtre kjørefelt på det høyeste oppnår en tetthet på i underkant av 20 kjt/km oppnår høyre kjørefelt på det meste over 60 kjt/km. Basert på avdekkede sammenhenger vil den optimale tettheten for høyre kjørefelt ligge på ca. 30 kjt/km, som korresponderer med en hastighet på ca. 60 km/t.

På et overordnet nivå viser registreringene fra Kroppan bru at de trafikale problemene oppstrøms for avkjøringsrampen strekker seg helt tilbake til trafikkregistreringsstasjonen. Samtidig er problemene i all hovedsak forbeholdt høyre kjørefelt. Dette kan ha sammenheng med den store andelen av trafikken som skal til avkjøringsrampen for å fortsette på E6 Omkjøringsvegen.



Figur 7-17: Volum-, hastighet- og tetthetssammenhenger på Kroppan bru for midtre og høyre kjørefelt samlet.

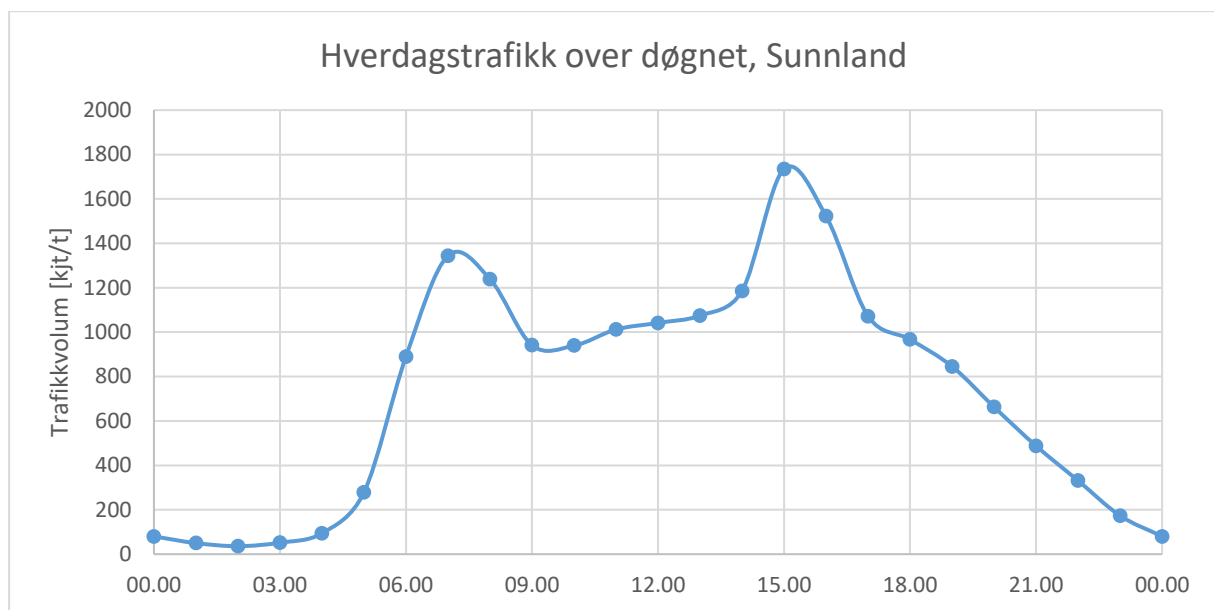


Figur 7-18: Volum-, hastighet- og tetthetssammenhenger på Kroppan bru for midtre og høyre kjørefelt hver for seg.

7.3.2 Sunnland

Potensielle analyser basert på dataene fra trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland reduseres grunnet muligheten til av- og påkjøring fra Bratsbergvegen og Sluppenvegen, som ligger mellom registreringsstasjonene. Dette innebærer en økning i antall trafikkstrømmer som må tas hensyn til. Det er derfor ikke mulig å benytte trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland for å finne ut hvor mange kjøretøy som kjører fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan Bru til E6 Omkjøringsvegen uten å gjennomføre trafikkregistreringer på rampene knyttet til Bratsbergvegen og Sluppenvegen. Området nedstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen ble i liten grad dekket under datainnsamlingen. Dette medfører at det ikke er mulig å registrere eller estimere trafikken knyttet til av- og påkjøring fra Bratsbergvegen. Informasjon hentet fra trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland er dermed kun tenkt benyttet videre til å avgjøre om hvorvidt det er utstrakte problemer nedstrøms for avkjøringsrampen.

Med grunnlag i timesregistreringene er gjennomsnittlig trafikkvolum over døgnet for hverdager beregnet og illustrert i figur 7-19. Grunnlaget for gjennomsnittet er registreringer fra 21 døgn i nordgående retning. Resultatet viser at det maksimale trafikkvolumet i morgenrushet er i underkant av 1400 kjt/t fordelt på to kjørefelt. Ved å anta en tidsluke på 2 - 2,5 sekunder mellom kjøretøyene i ett kjørefelt vil kapasiteten på en flerfeltsveg være 1500-1800 kjt/t per kjørefelt. Trafikkvolumet på Sunnland gir dermed ingen antydning til at det er avviklingsproblemer nedstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen i morgenrushet, da det er langt igjen til kapasitetsgrensen.

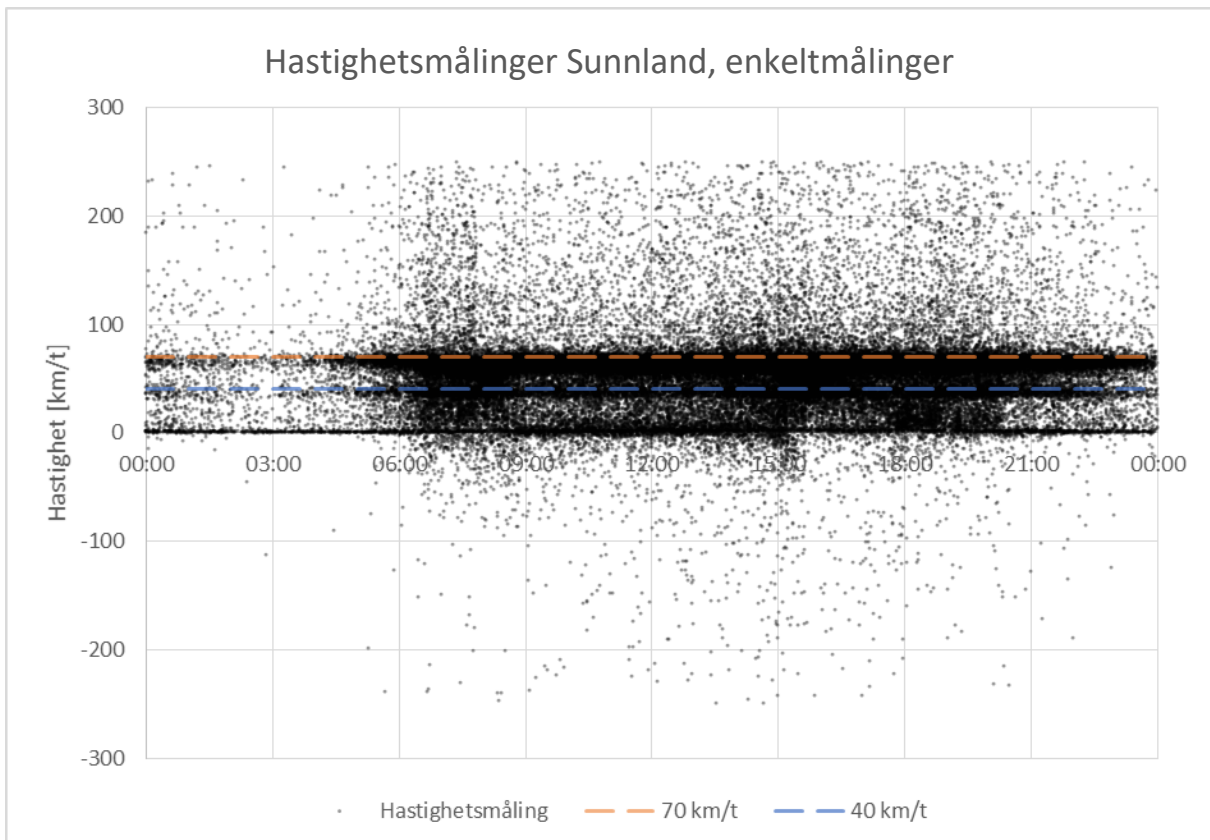


Figur 7-19: Gjennomsnittlig hverdagstrafikk over døgnet registrert på Sunnland i nordgående retning, gitt med timesoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Ved å se på målingene for enkeltkjøretøy kommer det frem at de er både ustabile og lite pålitelige. En betydelig andel av hastighetsmålingene er enten urealistisk lave, med verdier mindre eller lik null, eller urealistisk høye. Spredningen av enkeltmålingene over døgnet i nordgående retning, gjennom alle registreringsdagene, er vist i figur 7-20. Det er en tydelig samling rundt 70 km/t gjennom hele døgnet, noe som er naturlig da dette er fartsgrensen og registreringsstasjonen er lokalisert sammen med et ATK-punkt. Det er også en tydelig samling rundt 40 km/t gjennom hele døgnet. Denne er noe mer urealistisk, men kan f.eks. skyldes kort avstand mellom påkjøringsrampen og trafikkregistreringsstasjonen, samt kjøretøy som benytter busslommen like ved. Samlingen av målinger rundt 0 km/t er derimot usannsynlig stor og vedvarende over døgnet. Dette gjelder også spredningen av negative

målinger og urealistisk høye målinger. Da de resterende kategoriene er av tilsvarende kvalitet er datasettet ansett som uegnet for bruk i analysen.

Timesgjennomsnittet presentert tidligere består av aggregerte verdier for enkeltkjøretøy. Da datasettet inneholder i overkant av 100 000 enkeltregistreringer blir ekstremverdiene som avdekkes i enkeltmålingene utlignet ved aggregering og feilmålingene vil ikke bli like tydelig representert. Da registreringene er ustabile foreligger det også en muligheten for at enkelte kjøretøy ikke har blitt registrert. Illustrasjonen av trafikkfordelingen over døgnet kan følgelig vise til et lavere trafikkvolum, samt en mulig feil fordeling, sammenlignet med virkeligheten.



Figur 7-20: Fordelingen av hastighetsmålinger fra enkeltkjøretøy hentet fra trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland i nordgående retning.

Selv om timesgjennomsnittet indikerer at det er kapasitetsoverskudd på Sunnland, vil usikkerheten knyttet til de registrerte dataene være for stor til å kunne si med sikkerhet at det ikke er avviklingsproblemer på strekningen nedstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen.

7.4 Bomsnittsregistreringer

Grunnet tekniske problemer knyttet til registreringer i venstre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru, foreligger det ingen tall for det totale trafikkvolumet på E6 syd. Bomsnittet på Tonstad registrerer all trafikk som ferdes på E6 syd, som videre fordeles på tre ulike trafikkstrømmer i analyseområdet. Da bomsnittet på Sluppen kun registrerer kjøretøy som skal videre mot sentrum innebærer dette at to av trafikkstrømmene er ukjente. Dette gjelder avkjøringsrampene til henholdsvis Osloveien og E6 Omkjøringsvegen, som er markert rødt i figur 7-21.

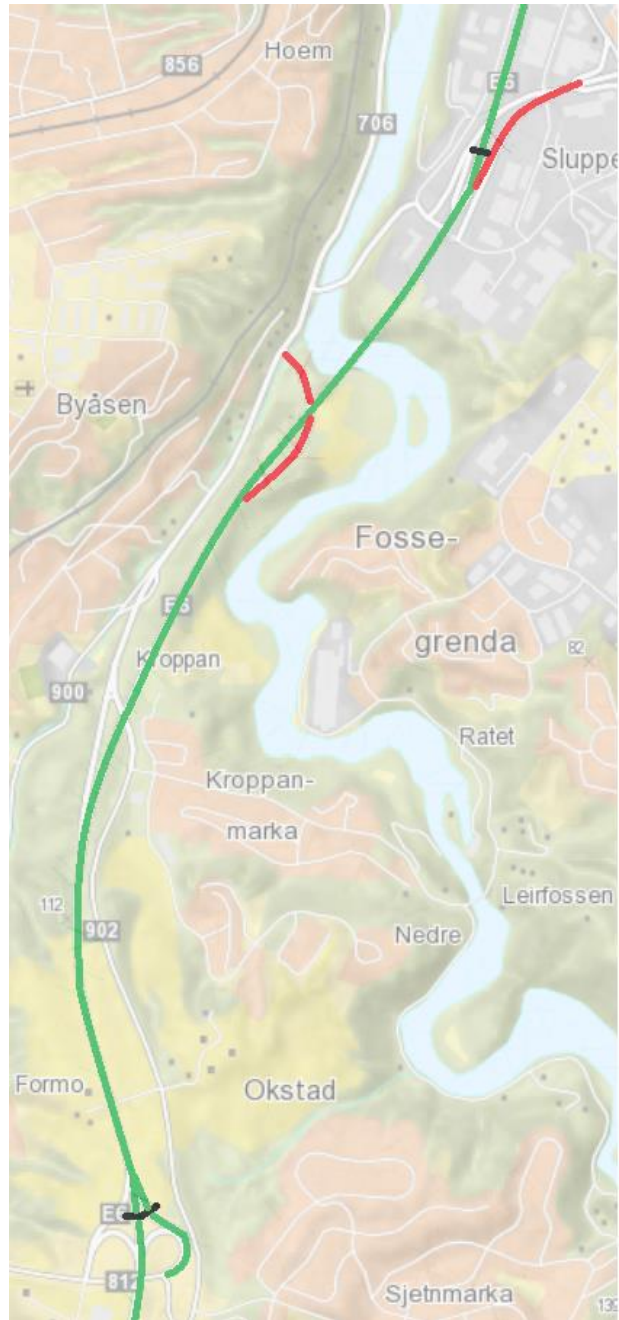
Ved bruk av trafikkvolum hentet fra bomsnittet på Sluppen og Tonstad, ble trafikkfordelingen som forekommer under et gjennomsnittlig yrkesdøgn på de to avkjøringsrampene estimert, etterfulgt av en sammenligning med de manuelle videoregistreringene. Til slutt ble differansen mellom resultatet fra bomsnittsregistreringene og registreringene fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru estimert.

7.4.1 Estimering av trafikkfordelingen på avkjøringsrampen til Osloveien

Estimeringen av trafikkfordelingen gjennom døgnet på avkjøringsrampen til Osloveien ble basert på bomsnittsregistreringene og trafikkvolum hentet fra NVDB. Databanken viser til en estimert årsdøgntrafikk på 1820 kjøretøy, der andelen tunge kjøretøy står for ca. 10 % av den totale trafikken (NVDB, jan. 2017).

Videre er trafikkvolumet på avkjøringsrampen til Osloveien antatt å følge tilsvarende mønster som den resterende trafikken registrert på Tonstad. Estimeringen av trafikkvolumet vil derfor ta utgangspunkt i trafikkvolumet gitt ved bomsnittet på Tonstad. For å kunne gjennomføre estimatet for både korte og lange kjøretøy er det nødvendig å kategorisere kjøretøyene som er registrert som ukjente, da denne kategorien utgjør 9,6 % av alle registreringene.

Tungbilandelen på strekningen mellom Tonstad og Sluppen ble fra de manuelle videoregistreringene estimert til å utgjøre 8,2 % av den totale trafikken gjennom morgenrushet. Da trafikkvolumet på avkjøringsrampen til Osloveien er svært lav, antas det at tungbilandelen på Tonstad vil være av tilsvarende størrelsesorden. Ved å beregne forholdet mellom de kjente kategoriene registrert på Tonstad vil andelen tunge kjøretøy utgjøre 8,8 % av den totale trafikken gjennom morgenrushet. Da tungbilandelen er noe høyere enn den som ble avdekket gjennom de manuelle registreringene, tyder dette på at den ukjente kategorien i hovedsak består av lette kjøretøy. Det ble derfor gjennomført en sammenligning der den ukjente kategorien inkluderes i de lette kjøretøyene. Resultatet fra de to sammenligningene er gjengitt i tabell 7-7.



Figur 7-21: Utsnitt av analyseområdet, der bomstasjonene er markert i svart, hovedtraséen i grønt og avkjøringsrampene i rødt. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket)

Tabell 7-7: Tungebilandel gitt av manuelle videoregistreringer, forholdet mellom kjente kjøretøysklasser, samt ved inkludering av ukjente kjøretøy i kategorien bestående av lette kjøretøy.

Klokkeslett	Manuelle registreringer	Ekskl. ukjente kjøretøy	Inkl. ukjente kjøretøy
06:30	8,4 %	7,3 %	6,8 %
06:45	6,4 %	7,7 %	7,2 %
07:00	9,4 %	9,3 %	8,7 %
07:15	9,3 %	8,8 %	8,2 %
07:30	6,7 %	7,1 %	6,7 %
07:45	5,7 %	7,2 %	6,8 %
08:00	8,4 %	9,6 %	8,9 %
08:15	9,6 %	10,8 %	9,9 %
08:30	11,5 %	12,7 %	11,4 %
Total	8,2 %	8,8 %	8,1 %

Tabellen viser at tungebilandelen er noe høyere i de manuelle videoregistreringene ved begynnelsen av morgenrushet sammenlignet med tungebilandelen gitt ved å inkludere den ukjente kategorien i lette kjøretøyene. Videre er det et godt samsvar mellom de to tungebilandelen, der differansen gjennom hele morgenrushet utgjør 0,1 prosentpoeng. For videre bruk av trafikk tallene fra Tonstad gjøres det derfor en forenkling der det antas at alle ukjente kjøretøy er definert som lette kjøretøy. Dette medfører videre at den totale tungebilandelen registrert på Tonstad gjennom døgnet vil ligge på ca. 9 %.

For å estimere hvordan trafikkvolumet på avkjøringsrampen til Osloveien varierer over døgnet var det nødvendig å inkludere trafikkfordelingen registrert på Tonstad. Dette innebærer at trafikkvolumet (q), for hver kjøretøyklasse (kk), innenfor hvert tidsintervall beregnes som en prosentandel av den totale trafikken gjennom døgnet. Dette resulterte i følgende sammenheng:

$$q_{kk,Osloveien}(t) = \dot{A}DT_{Osloveien} \cdot \frac{q_{kk,Tonstad}(t)}{q_{døgn,Tonstad}}$$

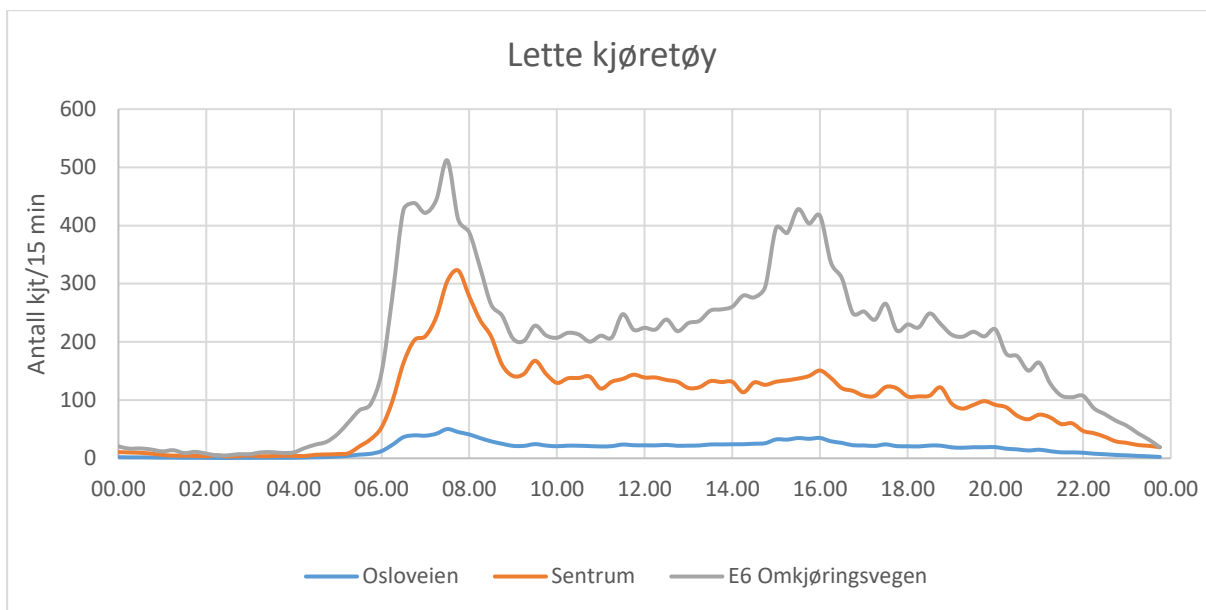
Ligningen ble benyttet til å finne trafikkfordelingen innenfor hver av de to kjøretøyklassene med en oppløsning på 15 minutter. Resultatet ble videre benyttet i estimeringen av trafikkfordelingen på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og presenteres i neste delkapittel. I ettertid ble det oppdaget at trafikkvolumet på Tonstad ble basert på verdier fra kun én dag og ikke gjennomsnittsverdiene. Dette medfører en følgefeil der estimatet for andelen lette og tunge kjøretøy avviker med henholdsvis -0,2 % og +0,2 % fra gjennomsnittlige verdier. Feilen tilsvarer ca. 4 kjøretøy over døgnet, og er dermed ansett som ubetydelig.

7.4.2 Estimering av trafikkfordelingen på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen

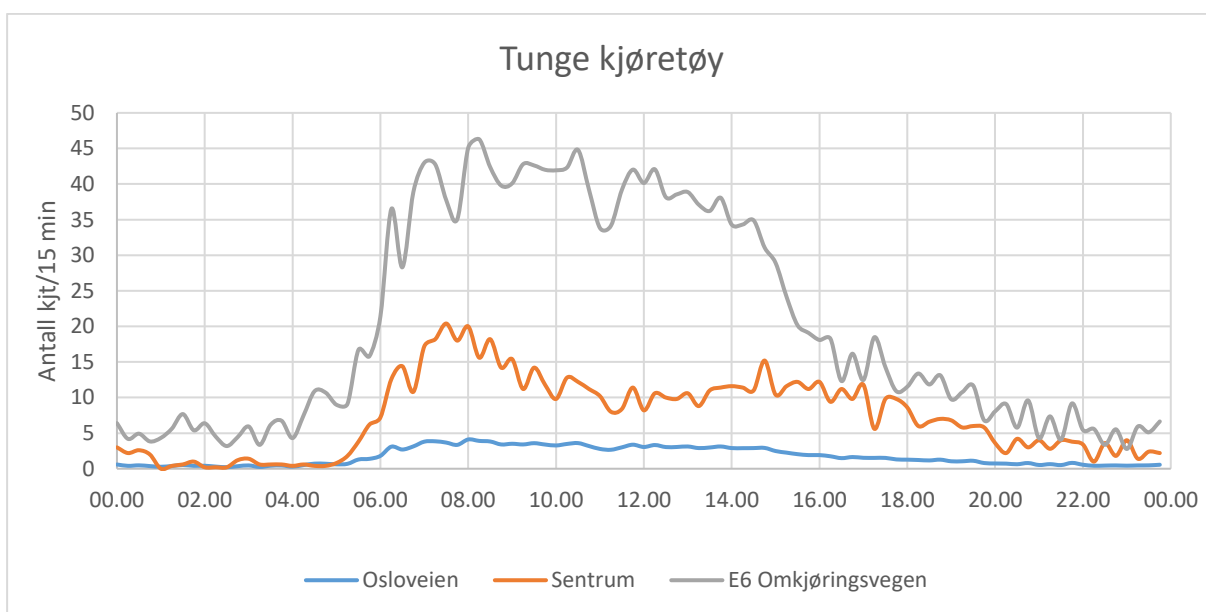
Med antakelsen om at alle ukjente kjøretøy er kategorisert som lette kjøretøy er fordelingen mellom kjøretøyklassene ved bomsnittet på Tonstad og Sluppen ansett som kjent. Da trafikkfordelingen på avkjøringsrampen til Osloveien har blitt estimert var det mulig å beregne den tilsvarende fordelingen på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Balanseregnskapet benytter det kjente trafikkvolumet (q) for de tre kartlagte trafikkstrømmene og er gitt som:

$$q_{Omkjøringsvegen}(t) = q_{Tonstad}(t) - q_{Osloveien}(t) - q_{Sentrum}(t)$$

Ligningen ble benyttet til å finne trafikkfordelingen innenfor hver av de to kjøretøyklassene med en oppløsning på 15 minutter. Estimatet for de tre trafikkstrømmene, fordelt på kjøretøyklasse, er illustrert i figur 7-22 og figur 7-23.



Figur 7-22: Estimert fordeling av lette kjøretøy fra Tonstad, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.



Figur 7-23: Estimert fordeling av tunge kjøretøy fra Tonstad, gitt med kvartersoppløsning. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

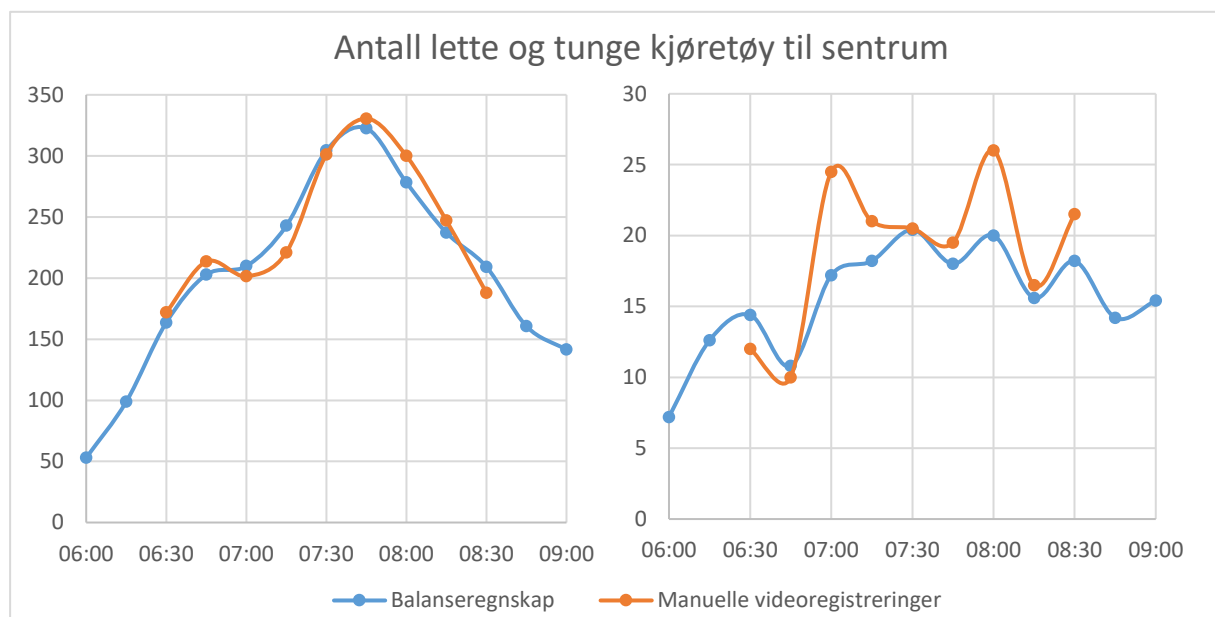
Trafikkvolumet på avkjøringsrampen til Osloveien holder seg relativt stabilt uten noen definerte topper, og er i stor grad en gjenspeiling av de trafikale forholdene på Tonstad. De estimerte trafikkstrømmene mot sentrum og E6 Omkjøringsvegen viser den samme trenden som ble kartlagt fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Fra 06:45 til 07:45 forekommer den største etterspørselen fra Tonstad til E6 Omkjøringsvegen og utgjør ca. 2000 kjøretøy. Innenfor dette intervallet utgjør perioden 07:30-07:45 kvarteret med størst etterspørsel, tilsvarende et trafikkvolum på 550 kjt/15 min (2200 kjt/t). Den største etterspørselen mot Trondheim sentrum begynner 30 minutter senere og utgjør 1225 kjøretøy. Innenfor dette intervallet utgjør perioden 07:45-08:00 kvarteret med størst etterspørsel, tilsvarende et trafikkvolum på 340 kjt/15 min (1360 kjt/t). Dette kan være en indikasjon på at trafikantene som skal til E6 Omkjøringsvegen har tilpasset kjøremønsteret for å unngå periodene med store avviklingsproblemer.

Ved å kartlegge trafikstrømmene kommer det tydelig frem at ettermiddagsrushet kun knyttes til en økning av trafikk som skal på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Trafikken mot sentrum holder seg relativt stabilt etter morgenrushet før den reduseres utover kvelden. Figur 7-23 viser at det er et betydelig antall tunge kjøretøy skal på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen i perioden mellom 06:00 og 16:00. Over døgnet vil antallet tunge kjøretøy på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen utgjøre 69 % av det totale antallet tunge kjøretøy i analyseområdet. Dette kan ha en sammenheng med at E6 Omkjøringsvegen er hovedforbindelsen mellom Nord- og Sør-Norge, samt at industriområdene i stor grad er plassert utenfor sentrum.

7.4.3 Sammenligning med manuelle videoregistreringer

Det ble gjennomført en sammenligning mellom de estimerte trafikstrømmene og de manuelle videoregistreringene for å sikre at det er samsvar mellom de to datasettene gjennom morgenrushet. En oversikt over verdier fra sammenligningen er gjengitt i vedlegg 5.

Figur 7-24 viser alle kjøretøyene som kjører mot sentrum, der det skilles mellom lette og tunge kjøretøy. Til venstre i figuren vises alle registreringer av lette kjøretøy, der det er en svært god overensstemmelse mellom trafikkvolumene innenfor hvert intervall. For tunge kjøretøy, vist til høyre, ser man en noe større variasjon mellom de manuelle videoregistreringene og balanseregnskapet. Dette skyldes i stor grad at det er færre registrerte kjøretøy, noe som medfører at hver enkelt registrering gir større utslag. Det foreligger også noen usikkerheter knyttet til forskjell i definisjonen av tunge kjøretøy mellom de manuelle og maskinelle registreringene, samt antakelsen om at alle ukjente kjøretøy kategoriseres som lette kjøretøy.

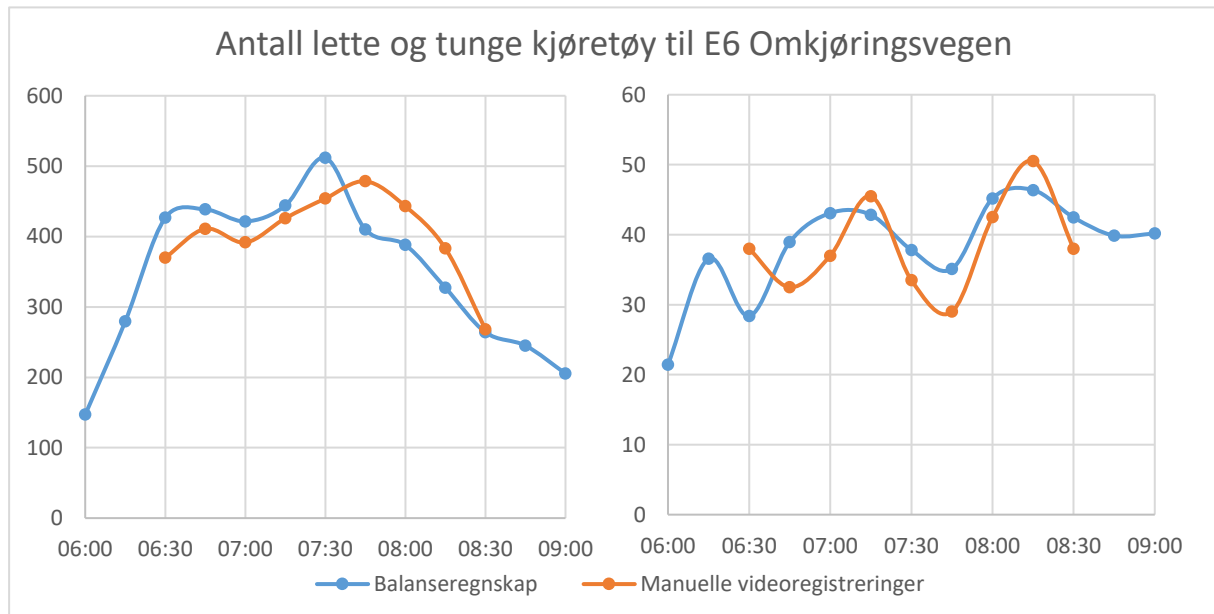


Figur 7-24: Sammenligning av trafikkvolum mot sentrum for henholdsvis lette og tunge kjøretøy, gitt av balanseregnskap og manuelle registreringer. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Ved å sammenligne trafikkvolumet gjennom hele morgenrushet ble det konkludert med at balanseregnskapet estimerte 4 færre lette kjøretøy og 19 færre tunge kjøretøy enn hva som er gitt av de manuelle videoregistreringene. Da det er benyttet gjennomsnittstall fra forskjellige tidsperioder viser dette til et godt samsvar mellom registreringene og et stabilt trafikkvolum i rushperioden.

I figur 7-25 er det tilsvarende resultatet for trafikkvolumet som går til E6 Omkjøringsvegen illustrert. Til venstre i figuren vises registreringer av lette kjøretøy, der det fremkommer en tydelig forskyving og utjevning av ekstremalpunktet for de manuelle registreringene sammenlignet med de estimerte

trafikk tallene fra balanseregnskapet. Dette viser til at etterspørselen, gitt av trafikkvolumet på Tonstad, er større enn kapasiteten på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og at det i perioden mellom 07:30 og 08:00 oppstår tydelige avviklingsproblemer i høyre kjørefelt. Dette kommer ikke like tydelig frem i registreringene for de tunge kjøretøyene, vist til høyre i figuren. Estimeringen av tunge kjøretøy på rampen til E6 Omkjøringsvegen vil i stor grad preges av de samme usikkerhetene som for trafikken mot sentrum.



Figur 7-25: Sammenligning av trafikkvolum på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen for henholdsvis lette og tunge kjøretøy, gitt av balanseregnskap og manuelle videoregistreringer. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Ved å sammenligne trafikkvolumet gjennom hele morgenrushet ble det konkludert med at balanseregnskapet estimerte 7 flere lette kjøretøy og 14 flere tunge kjøretøy enn hva som er gitt av de manuelle videoregistreringene. Da det er benyttet gjennomsnittstall fra forskjellige tidsperioder viser dette til et godt samsvar mellom registreringene og et stabilt trafikkvolum i rushperioden.

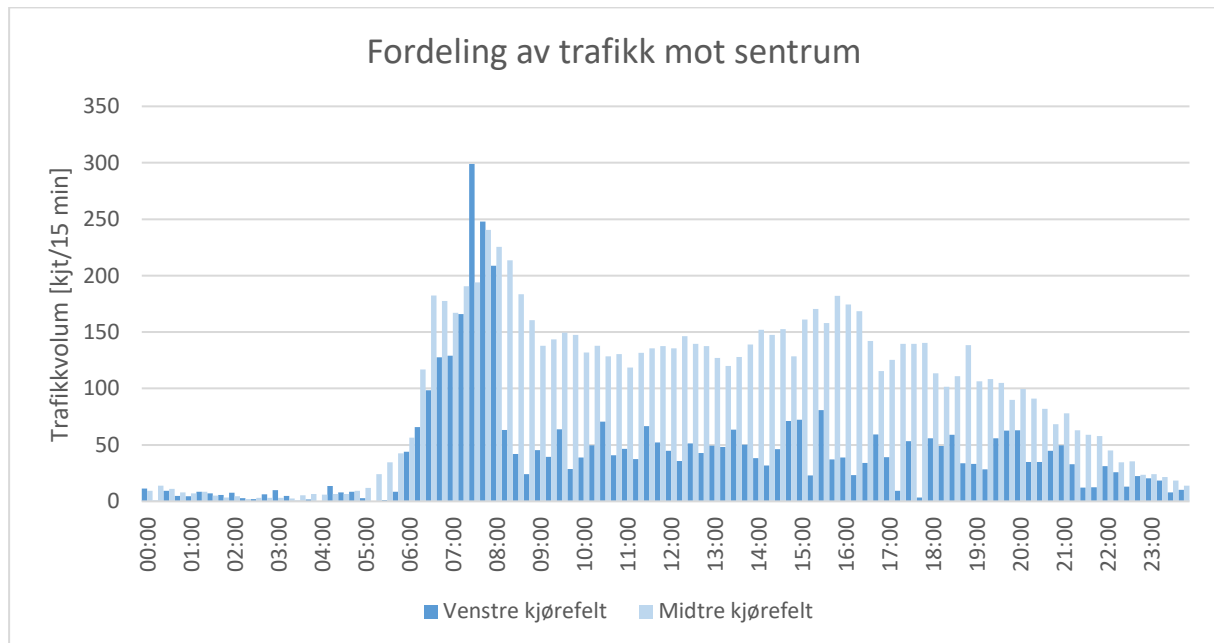
Resultatet fra balanseregnskapet basert på trafikk tall hentet fra bomsnittet på Tonstad og Sluppen stemmer godt med trafikk tall hentet fra de manuelle registreringene. Dette viser videre til en stabil situasjon på strekninger der man oppnår tilsvarende volum og hendelsesforløp ved registreringer gjort i forskjellige perioder. Det har nå blitt verifisert hvilken størrelsesorden trafikkvolumet på strekningen skal ligge på.

Da balanseregnskapet inneholder mer detaljert data enn de manuelle registreringene vil balanseregnskapet legges til grunn for simuleringsmodellen. Dette innebærer at alle verdier som blir benyttet baserer seg på gjennomsnittstall som i stor grad representerer en mer generell situasjon på Sluppen.

7.4.4 Sammenligning med registreringer fra Kroppan bru

Ved å sammenligne det estimerte trafikkvolumet mellom Tonstad og Sluppen med registreringene fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru vil man få en indikasjon på hvor mange kjøretøy som lå i venstre kjørefelt og dermed ikke ble registrert. Differansen mellom de to datasettetene ligger på ca. 4000 kjøretøy gjennom døgnet, der perioden mellom 06:30 og 08:45 utgjør i underkant av 1400 kjøretøy. Basert på estimatene viser dette til at 35 % av all trafikk i venstre kjørefelt forekommer gjennom morgenrushet.

Fra figur 7-26 fremkommer det tydelig at trafikkvolumet i venstre kjørefelt øker gjennom morgenrushet sammenlignet med resten av døgnet. Den største andelen kjøretøy i venstre kjørefelt oppstår kl. 07:30 og utgjør 61 % av alle kjøretøy mot sentrum. Fordelingen gjennom morgenrushet kan forklares av økt trafikk mot sentrum, samt kødannelsen i høyre kjørefelt innenfor denne perioden, som innvirker på førernes feltplassering. Den gjennomsnittlige fordelingen av trafikken mot sentrum gjennom hele døgnet er henholdsvis 31 % og 69 % i venstre og midtre kjørefelt.



Figur 7-26: Fordeling av trafikk mellom venstre og midtre kjørefelt gjennom døgnet. Registreringene er gitt med kvartersoppløsning og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt

7.5 Reisetidsregistreringer

Reisetidsregistreringene ble benyttet til å kartlegge forventet reisetid, forsinkelse og strekningshastighet over strekningen mellom Tonstadkrysset og E6 Omkjøringsvegen. Videre ble karakteristikkene ved morgenrushet analysert nærmere, da denne perioden skal benyttes videre i en kalibrerings- og valideringsfase under oppbyggingen av simuleringsmodellen.

Datasettet inneholder kontinuerlige registreringer for perioden mellom 07.-19.02.17, men det var behov for mindre korrigeringer av datasettet i henhold til de feil og mangler som ble konstatert i kapittel 6.5.

En ny verdi for normal reisetid (t_N) på strekningen ble beregnet ved bruk av skiltet hastighet. Over strekningen er to fartssoner definert, der de første 3140 meterne har en skiltet hastighet på 80 km/t. De resterende 100 meterne på avkjøringsrampen er skiltet til 70 km/t. Normal reisetid ble beregnet ved bruk av forholdet mellom strekning (s) og skiltet hastighet (u), der ligningen er gitt som:

$$t_N = \frac{s_1}{u_1} + \frac{s_2}{u_2}$$

Beregningen viser til at den normale reisetiden over strekningen utgjør 146,4 sekunder. Denne vil videre legges til grunn for beregning av forsinkelsen (d), gitt som differansen mellom reell reisetid (t_R), hentet direkte fra datasettet, og den normale reisetiden.

$$d_i = t_{Ri} - t_N$$

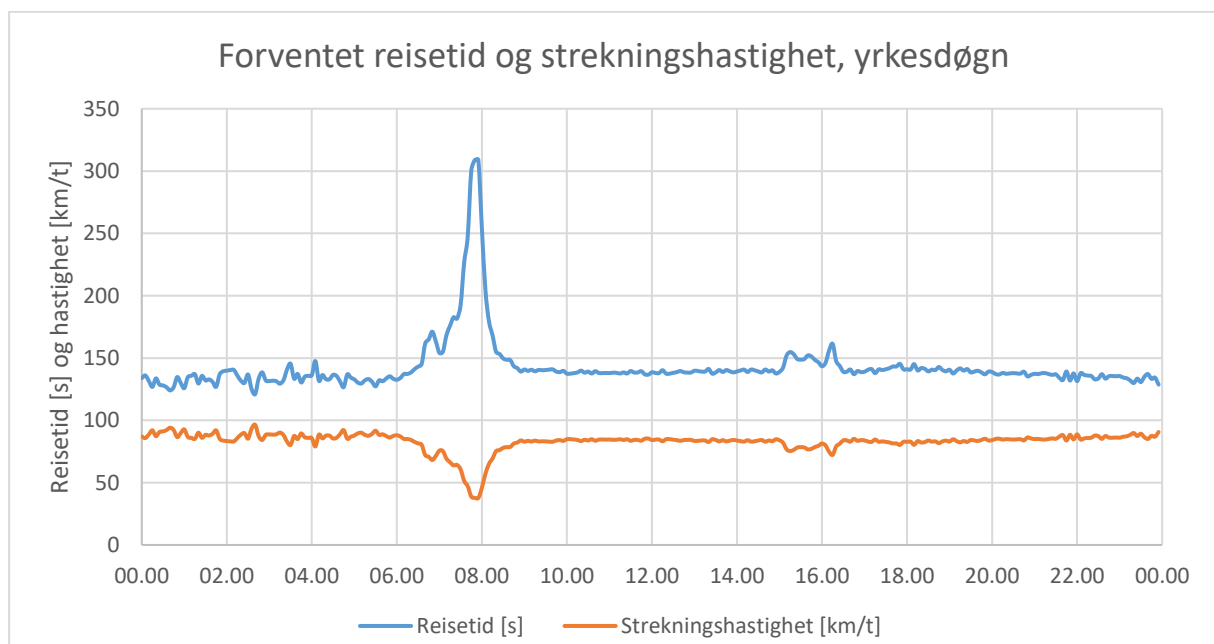
Avstanden mellom registreringspunktene ble korrigert og følgelig måtte en ny strekningshastighet (\bar{u}_s) beregnes:

$$\bar{u}_{si} = \frac{t_{Ri}}{S}$$

Som følge av korrigeringen ble strekningshastighet i gjennomsnitt redusert med i underkant av 5 km/t.

Gjennom databehandlingen ble det avdekket at det manglet registreringer for kl. 02:00 da det ikke var trafikk innenfor dette intervallet. Reisetiden, og følgelig strekningshastigheten, ble derfor stipulert ved å beregne gjennomsnittet av reisetiden i intervallet før og etter. Reisetiden ble følgelig satt til 139,8 sekunder, med en korresponderende strekningshastighet på 83,4 km/t. Registreringer gjennomført i helger ble utelatt da det ikke er forventet større avviklingsproblemer i denne perioden.

Resultatene av beregningene knyttet til forventet reisetid og strekningshastighet for et gjennomsnittlig yrkesdøgn er fremstilt i figur 7-27, og baserer seg på registreringer fra ni yrkesdøgn i februar 2017.



Figur 7-27: Forventet reisetid og strekningshastighet basert på reisetidsregistreringer fra ni yrkesdøgn, gitt med en oppløsning på fem minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

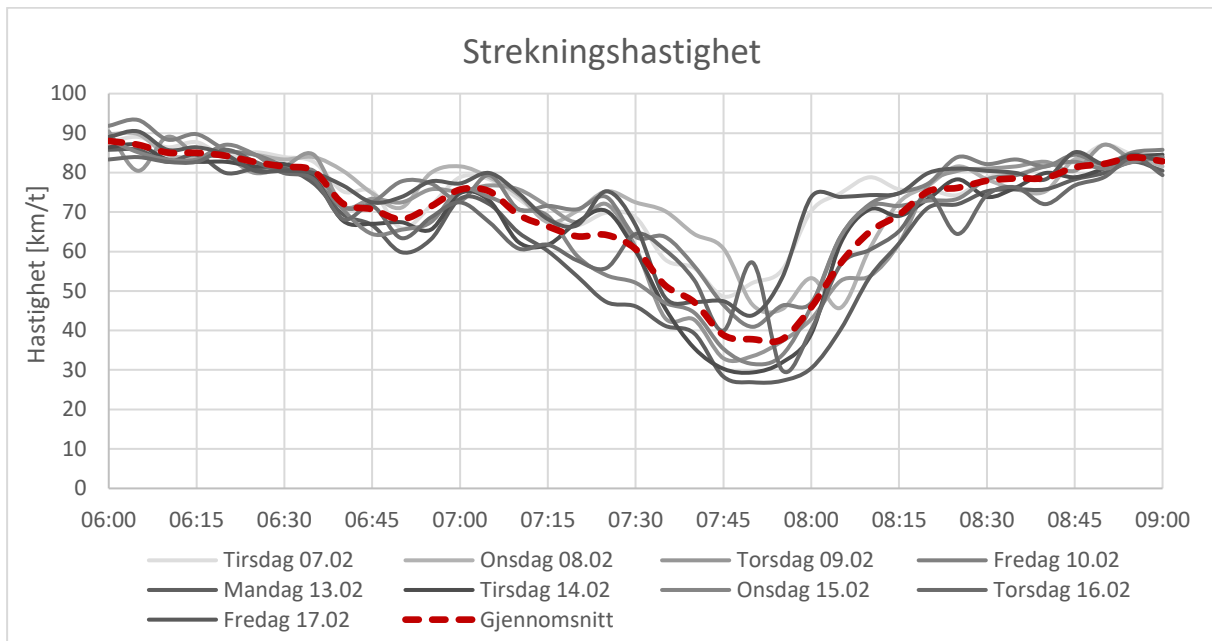
Figuren viser at det oppstår små variasjoner mellom reisetidsmålingene og den korresponderende strekningshastigheten gjennom natten. Dette skyldes i hovedsak at perioden preges av få målingen grunnet lite trafikk. I tillegg er det forventet en større spredning mellom enkeltmålingene da hastighetsvariasjonen er større på natten.

Rundt kl. 06:00 kan man se at reisetiden begynner å øke frem til den største forsinkelsen i systemet oppstår rundt kl. 08:00. Ved ekstremalpunktet ligger den gjennomsnittlige reisetiden på 309 sekunder og den korresponderende strekningshastighet på 37,7 km/t. Da dataene er basert på ni yrkesdøgn viser dette til at avviklingsproblemer under morgenrushet varierer lite over tid. Reisetiden reduseres brått etter at toppunktet er nådd, og etter kl. 08:30 er det ingen tendenser til avviklingsproblemer på strekningen.

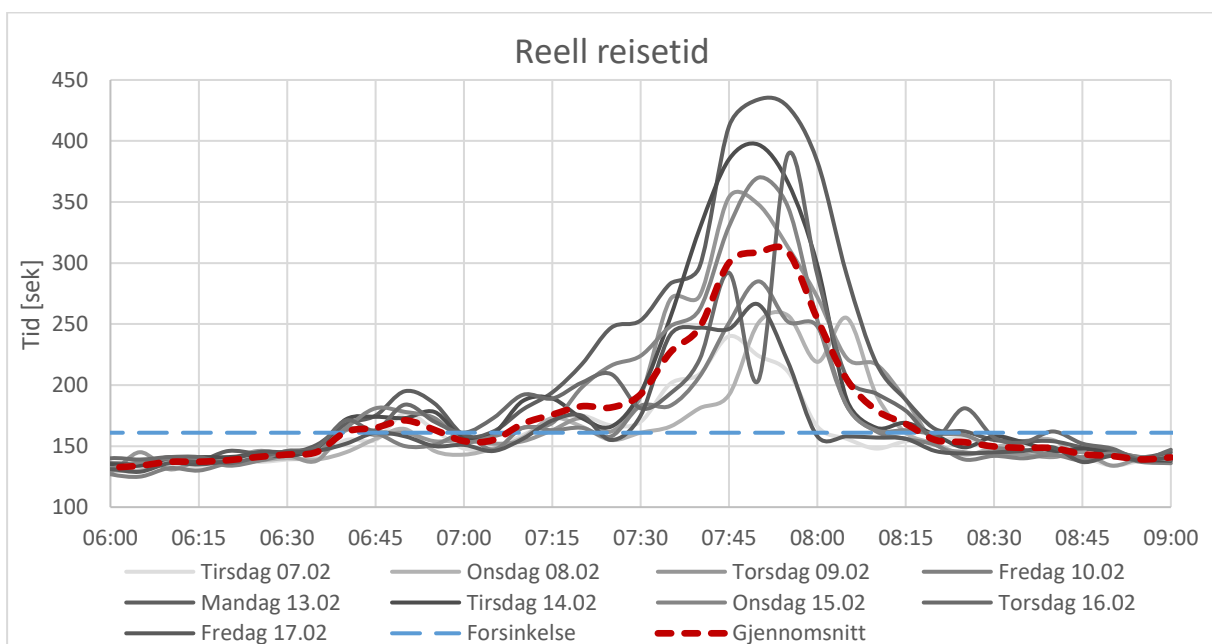
Reisetiden holder seg tilnærmet konstant på i underkant av 140 sekunder i perioden 09:00 til 15:00, noe som viser til at de fleste sjåførene holder høy hastighet. Videre viser figuren at det ikke oppstår noen avviklingsproblemer i denne perioden.

Ettermiddagsrushet får et lite utslag i perioden 15:00 til 16:30, der den største forsinkelsen fra normal reisetid ligger på 10 sekunder. Dette viser tydelig at det ikke oppstår noen avviklingsproblemer på strekningen gjennom ettermiddagsrushet. Kveldsperioden har store likheter med trafikken på formiddagen, men man kan se en minimal hastighetsøkning utover natten.

Strekningshastigheten og reisetiden varierer mellom de ulike yrkesdøgnene. Figur 7-28 viser strekningshastigheten i morgenrushet for hvert av de ni yrkesdøgnene fremstilt sammen med den gjennomsnittlige strekningshastigheten. Videre er den korresponderende reisetiden for de samme dagene vist i figur 7-29, sammen med den gjennomsnittlige reisetiden og grensen for normal reisetid på strekningen.



Figur 7-28: Strekningshastighet hentet for ni ulike yrkesdøgn i februar 2017, gitt med en oppløsning på fem minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.



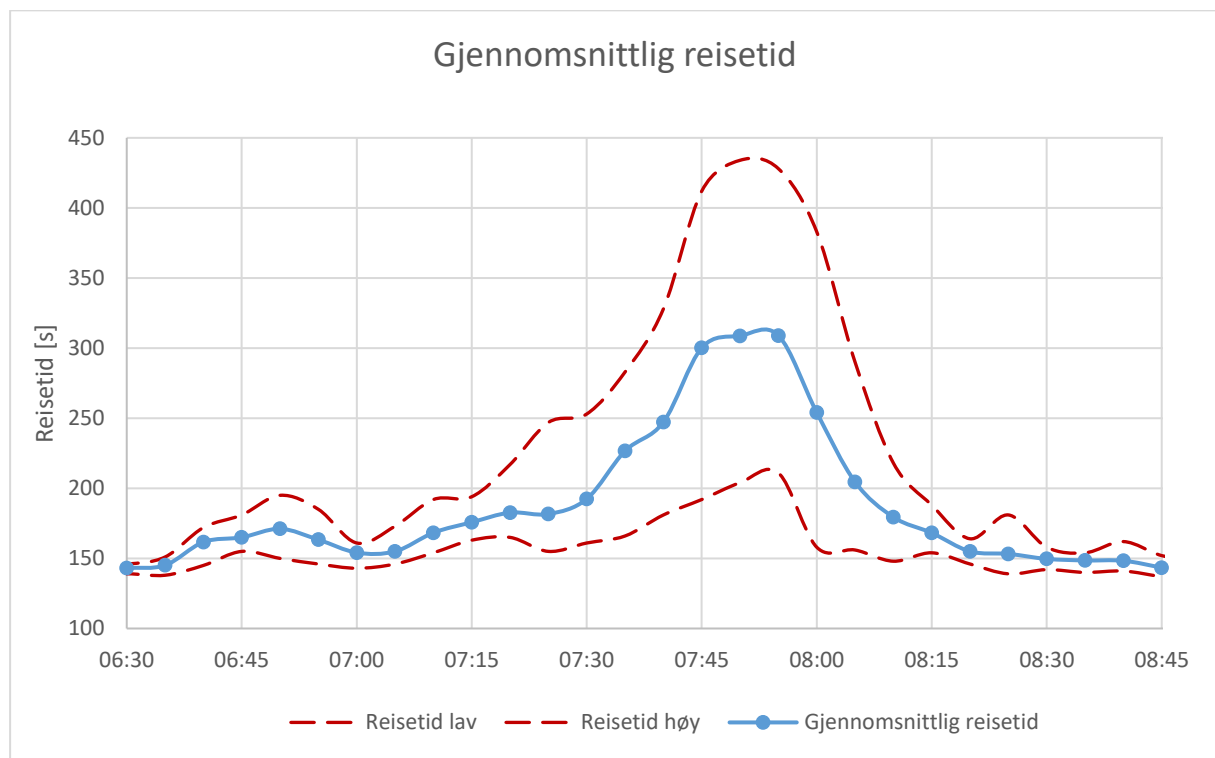
Figur 7-29: Reell reisetid hentet for ni ulike yrkesdøgn i februar 2017, gitt med en oppløsning på fem minutter. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Figurene viser at avviklingsproblemene øker betraktelig fra kl. 07:25 og den maksimale reisetiden oppstår i perioden mellom 07:45 og 08:00. Etter dette skjer det en effektiv reduksjon av reisetid som varer i ca. 10 til 20 minutter, der variasjonen skyldes graden av kødannelse og avviklingsproblemer i forkant.

Mandag 13.02.17 kommer klart verst ut i henhold til reisetid med et toppunkt kl. 07:50, der den gjennomsnittlige reisetiden i dette tidsintervallet ligger på 434 sekunder. Dette kommer også tydelig frem på strekningshastigheten, der det forekommer en periode på 15 minutter i tidsrommet 07:45 til 08:00 der hastigheten i snitt ligger under 30 km/t.

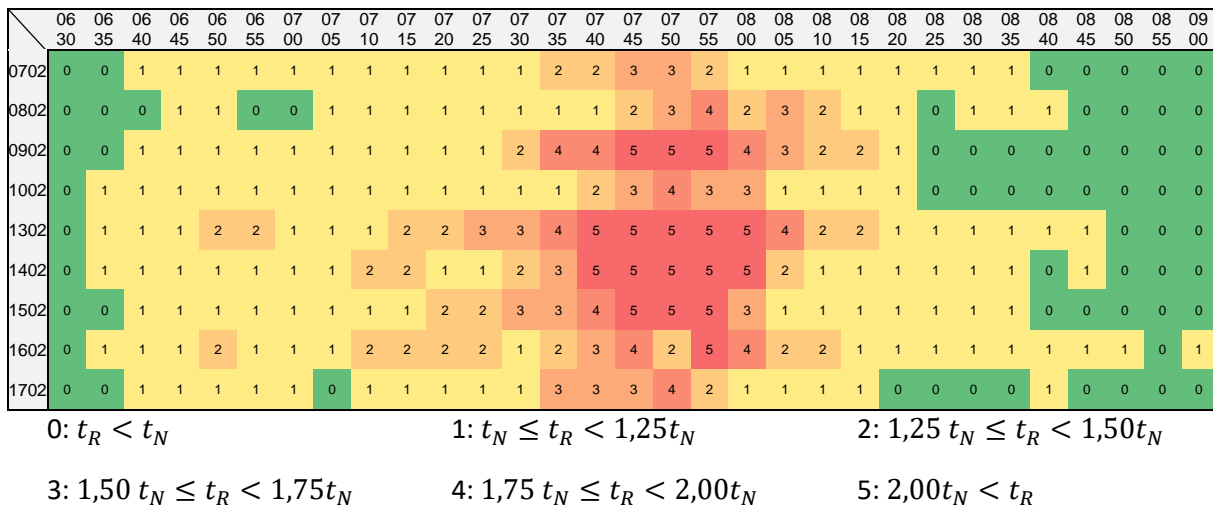
Tirsdag 07.02.17 kommer best ut i henhold til reisetid, der et toppunkt oppnås kl. 07:45 med en gjennomsnittlig reisetid på 240 sekunder. Den korresponderende strekningshastigheten ligger i samme tidsrom på 48,6 km/t.

For å gi en enklere illustrasjon over hvordan den forventede reisetiden endrer seg gjennom morgenrushet har den gjennomsnittlige reisetiden blitt fremstilt i figur 7-30, sammen med ekstremalverdiene for reisetiden i tilsvarende tidsintervall. En oversikt over gjennomsnittlige verdier for reell reisetid, forsinkelse og strekningshastighet for perioden 06:00 til 09:00 er gitt i vedlegg 6.



Figur 7-30: Gjennomsnittlig reisetid basert på ni yrkesdøgn i februar 2017, sammen med ekstremalverdiene for reisetiden i tilsvarende tidsintervall. Registreringene er gitt med en oppløsning på fem minutter og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

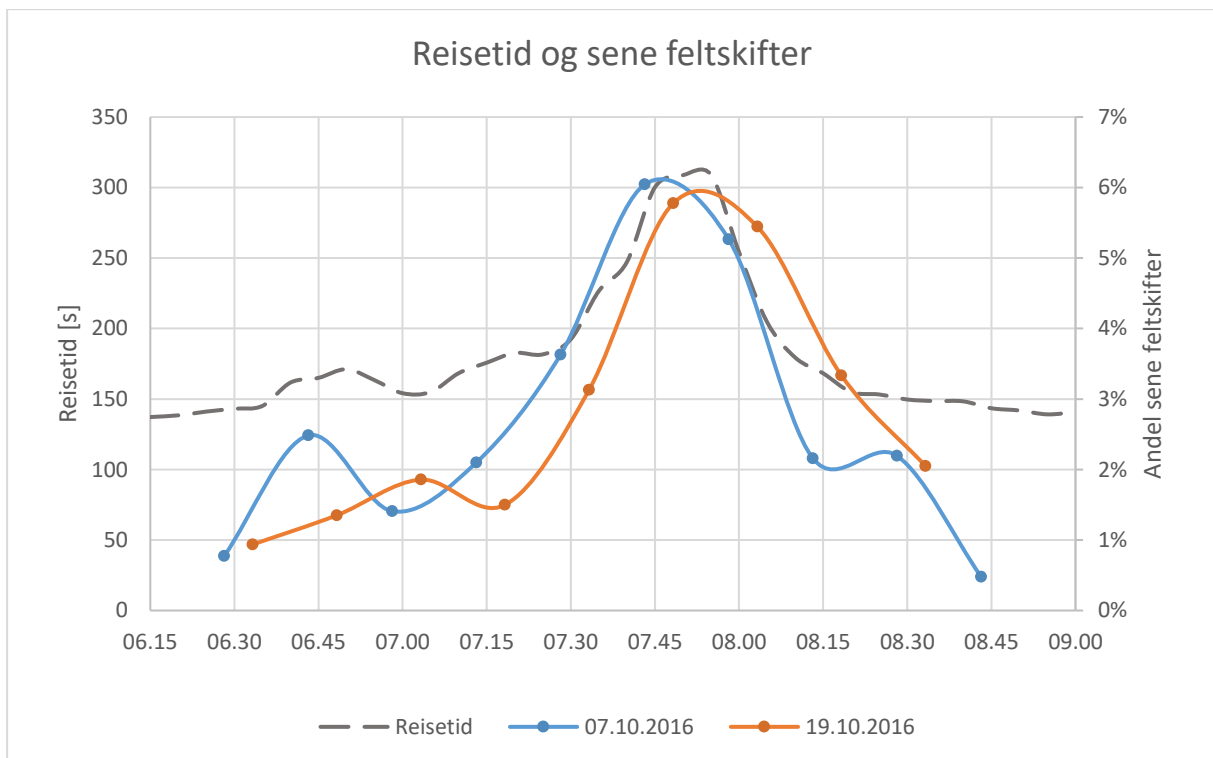
Videre er det laget en illustrasjon over forsinkelsen som oppstår i morgenrushet for hver av de analyserte yrkesdøgnene gjengitt i figur 7-31. Kolonnene viser til klokkeslett mens radene viser til gjeldende dato. De ulike kategoriene baseres på forholdet mellom den reelle reisetiden, t_R , og den normale reisetiden, t_N .



Figur 7-31: Illustrasjon over grad av forsinkelse mellom tidspunkt og dager. Registreringene er gitt med en oppløsning på fem minutter og er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.

Basert på figurene kan det konkluderes med at det fremkommer tydelige avviklingsproblemer i perioden mellom 07:35 og 08:05, og at dette er forhold som i mer eller mindre grad er gjeldende for alle dagene.

Reisetid gir en god indikasjon på hvordan de trafikale forholdene endrer seg over morgenrushet. Det ble derfor gjennomført en sammenligning av den gjennomsnittlige reisetiden på strekningen mellom Tonstad og Sluppen med andelen sene feltskifter, illustrert i figur 7-32. Figuren viser at det er en klar sammenheng mellom reisetiden og sene feltskifter, der begge faktorene kan knyttes til avviklingskvaliteten og forsinkelsen som oppstår i systemet.



Figur 7-32: Sammenhengen mellom andelen sene feltskifter og reisetiden på strekningen mellom Tonstad og Sluppen.

7.6 Geometrisk utforming

De geometriske forholdene knyttet til vegnettet kan sette føringer eller innvirke på trafikksituasjoner som oppstår. I tilknytning til analyseområdet på Sluppen er det derfor nødvendig å se på utformingen av bussholdeplassen og stigningsforholdene på rampene til E6 Omkjøringsvegen for å avgjøre hvilken innvirkning dette kan ha på den totale trafikkavviklingen.

7.6.1 Bussholdeplass

Bussholdeplassen «Kroppanbrua (K)» i nordgående retning er utformet som en busslomme separert med en trafikkøy fra hovedvegen. Busslommen ble målt til å være ca. 50 meter lang, noe som tillater at tre til fire busser kan benytte stoppet samtidig, avhengig av bussenes størrelse.

Utformingen tillater bussene å bevege seg uavhengig av foranliggende kjøretøy, noe som reduserer tidsbruken ved holdeplassen. Videre vil utformingen kunne hindre at det oppstår en større konsentrasjon av busser som skal inn på hovedvegen samtidig, noe som følgelig kunne fått en negativ innvirkning på den totale trafikkavviklingen.

7.6.2 Stigningsforhold

Stigningsforholdene på Sluppenrampene ble beregnet ved bruk av innsamlet data knyttet til lengdemål og høydeverdier. Det foreligger noe usikkerheter rundt de innsamlede verdiene og bør derfor leses som en tilnærming til de faktiske forholdene. Resultatet er gjengitt i tabell 7-8.

Tabell 7-8: Oversikt over målte verdier til bruk i estimeringen av de ulike stigningsforholdene.

Delstrekning	Lengde [m]	Starthøyde [m]	Slutthøyde [m]	Δh [m]	Stigning [%]
Avkjøringsrampe E6	122	29,1	30,0	0,9	0,74 %
Påkjøringsrampe Sluppenvegen	277	25,8	30,0	4,2	1,52 %
E6 Omkjøringsvegen	246	30,0	35,9	5,9	2,40 %

Fra tabellen kan man se at den største stigningen er knyttet til vegstrekningen etter at rampene flettes sammen og går videre som E6 Omkjøringsvegen, noe som kan ha positiv innvirkning på den totale trafikkavviklingen i de tilfellene der det er lite trafikk som kommer fra Sluppenvegen. Videre er det ikke forventet at stigningsforholdene vil skape vesentlige akselerasjonsproblemer. Det antas derfor at situasjon 1, beskrevet i kapittel 5, i liten grad vil innvirke på den totale trafikkavviklingen.

8 Teori

Det er flere teoretiske modeller og sammenhenger som kan benyttes for å forklare eller illustrere trafikksituasjonen på Sluppen. Videre er teorien bak fire ulike grupper med aktuelle modeller presentert. Den første gruppen er trafikkstrømsmodeller, som er teorier som beskriver sammenhengen mellom volum, hastighet og tetthet på en vegstrekning. Den andre gruppen er sjokkbølgeteori som beskriver forplantningen av sjokkbølger i homogene trafikkstrømmer. Videre presenteres et utvalg *Car-following*-modeller som beskriver adferden til enkeltkjøretøy som følger etter et foranliggende kjøretøy. Den siste gruppen som er presentert er kontinuitetsteori. Her er det fokusert på et spesialtilfelle av en kontinuitetsteori for trafikkdynamikk på motorveger med spesialfelt utviklet av Daganzo (1997).

8.1 Trafikkstrømsmodeller

Det foreligger tre fundamentale trafikkarakteristikker som ofte benyttes innenfor trafikkteoretiske tilnærminger. Dette er trafikkvolum (q) gitt som antall kjøretøy per time, strekningshastighet (u_s) gitt som kilometer per time og tetthet (k) gitt som kjøretøy per kilometer. Sammen utgjør de den fundamentale sammenhengen:

$$q[kjt/t] = u_s[km/t] \cdot k[kjt/km]$$

Basert på dette forholdet har det blitt utviklet flere ulike trafikkstrømsmodeller. En trafikkstrømsmodell er en makroskopisk tilnærming til virkeligheten, noe som innebærer at trafikk beskrives som strømmer fremfor enkeltindividens bidrag til den totale trafikkavviklingen. Det foreligger derfor noen begrensninger i henhold til hvor slike modeller vil kunne gi en god tilnærming til observerbar data. Analyseområdet burde følgelig bestå av uavbrutte trafikkstrømmer og benyttes derfor ofte på motorveger med planfrie krysningspunkt.

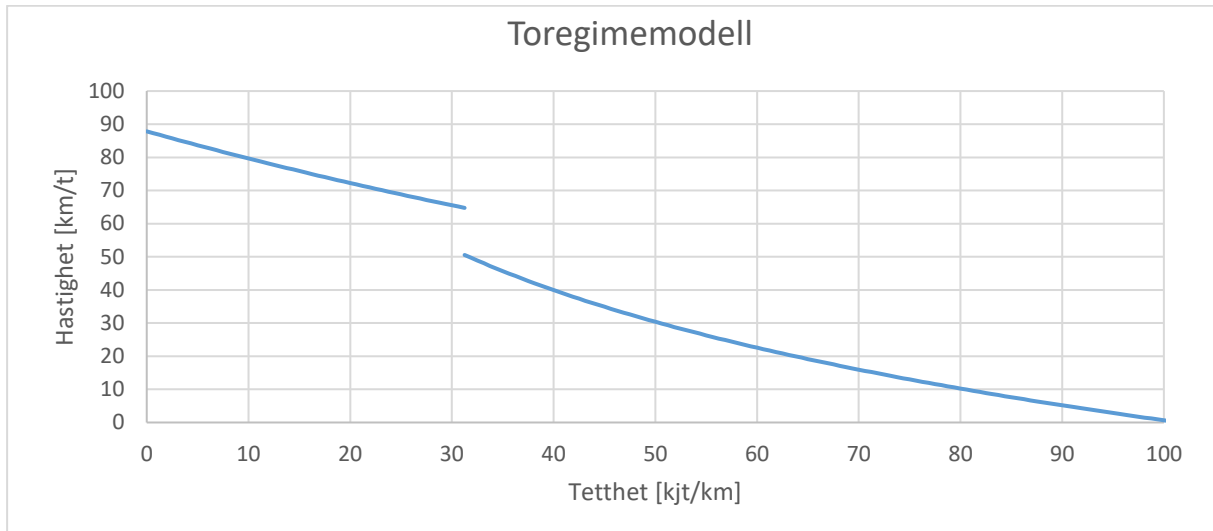
Videre vil et utvalg modeller bli presentert etterfulgt av en gjennomgang av lokasjonens betydning ved registrering av trafikkarakteristikker for trafikkstrømmer ved en flaskehals. Begge delkapitlene bygger på informasjon hentet fra May (1990).

8.1.1 Ulike modeller

Det har blitt presentert mange ulike trafikkstrømsmodeller gjennom tidene, med forskjellige tilnærminger og angrepspunkt. På et overordnet nivå kan det skilles mellom enkeltregimemodeller, multiregimemodeller og tredimensjonale modeller.

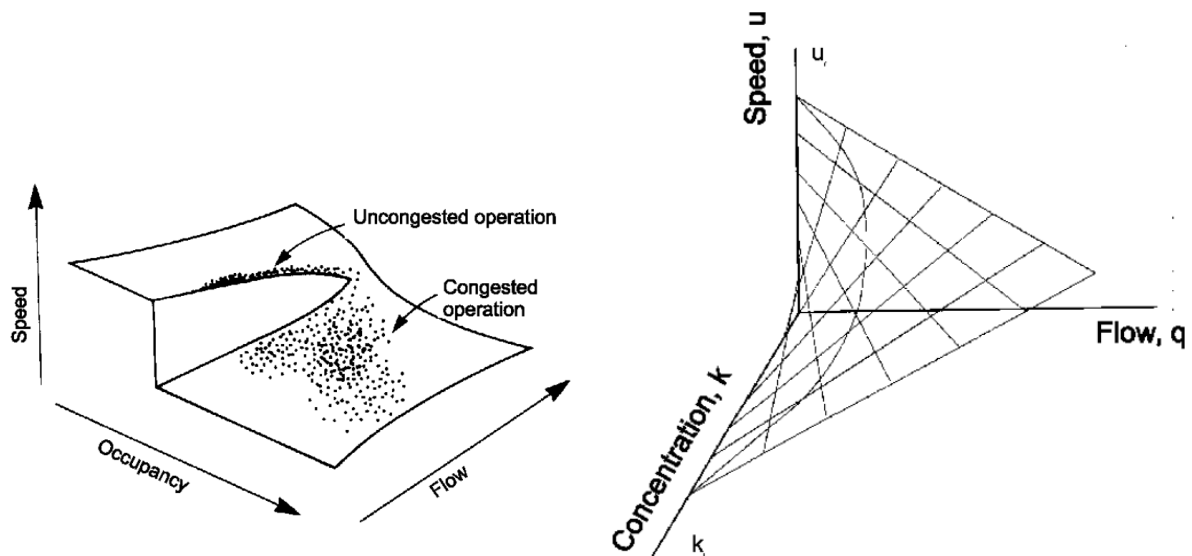
Enkeltregimemodeller forsøker å beskrive hvordan forholdet mellom hastighet og tetthet endrer seg ved bruk av én matematisk sammenheng. Modellene baserer seg på en antagelse om at den matematiske tilnærmingen kan benyttes for å beskrive de trafikale endringene over hele spekteret av strømningsforhold.

Multiregimemodeller benytter to eller flere ulike matematiske sammenhenger for å beskrive hvordan trafikken oppfører seg ved ulike hastighet- og tetthetsforhold. Tilnærmingene baserer seg på at det oppstår en diskontinuitet i beskrivelsen av forholdet mellom de fundamentale parameterne. For modeller som benytter seg av to ligninger for å beskrive trafikkkstrømmer blir skillet ofte lagt mellom et fri flyt-regime og et overbelastet regime. En illustrasjon på en toregimemodell er vist i figur 8-1.



Figur 8-1: Illustrasjon av forholdet mellom hastighet og tetthet gitt av en toregimemodell.

Tredimensjonale modeller benytter seg av ligningssett som beskriver et plan der sammenhengen mellom volum, hastighet og tetthet blir estimert samtidig. En illustrasjon på hvordan en slik sammenheng kan være er vist i figur 8-2.



Figur 8-2: Illustrasjon av tredimensjonale trafikkkstrømsmodeller (Kilde: Hall, 1975).

Videre vil en mer detaljert beskrivelse av teoretiske tilnærminger til trafikkkstrømmer basere seg på anvendelsen av fire ulike enkeltregimemodeller.

Greenshield

Den første enkeltregimemodellen ble utledet av Greenshield i 1934. Greenshield konkluderte med at hastigheten kunne beskrives ut ifra et lineært forhold til tetthet. Modellen krever kjennskap til hastigheten ved fri flyt (u_f) og tettheten ved stillestående trafikk (k_j). Parameteren for hastigheten er relativt enkel å estimere basert på observasjoner i felt, skiltet fartsgrense, samt vegføring og -standard. Tettheten ved stillestående trafikk er vanskeligere å oppdrive basert på observasjoner, men vil kunne estimeres ved bruk av gjennomsnittlig kjøretøyslengde og avstand til foranliggende kjøretøy. Forholdet mellom hastighet og tetthet kan uttrykkes som følgende:

$$u(k) = u_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right)$$

$$k(u) = k_j \left(1 - \frac{u}{u_f} \right)$$

Basert på sammenhengen som ble utledet av Greenshield vil den optimale tettheten, der volumet når sitt toppunkt, tilsvare halvparten av tettheten ved stillestående kø. Sammenlignet med virkelige målinger vil modellen enten undervurdere den maksimale tettheten eller overvurdere den optimale tettheten.

Greenberg

En ny modell ble foreslått av Greenberg etter at han gjennomførte en studie der det ble rettet mer fokus mot de sterkt trafikkerte periodene. Fra observasjonene ble det konkludert at en ikke-lineær tilnærming kunne gi en bedre beskrivelse av forholdet mellom hastighet og tetthet. Ved å benytte tilnærminger fra hydrodynamisk analogi utledet Greenberg et formelverk for en ny tilnærming til trafikkstrømmer ved å kombinere ligningene for å beskrive bevegelse og kontinuitet for en endimensjonal komprimerbar strøm. Forholdet mellom hastighet og tetthet ble da uttrykt som følgende:

$$u(k) = u_o \cdot \ln \left(\frac{k_j}{k} \right)$$

$$k(u) = k_j \cdot e^{-\frac{u}{u_o}}$$

Tilsvarende som for Greenshields modell oppstår det problem knyttet til estimeringen av den maksimale tettheten (k_j). Videre er det nødvendig å estimere en optimal hastighet (u_o), noe som vanskeligere lar seg observere sammenlignet med hastighet ved fri flyt. En svakhet ved modellen er at hastigheten ved fri flyt går mot uendelig da tetthetsvariabelen i den logaritmiske delen av uttrykket går mot null.

Underwood

Underwood valgte å fokusere mer på fri flyt-regimet og foreslo en modell med følgende hastighet- og tetthetssammenheng:

$$u(k) = u_f \cdot e^{-\frac{k}{k_o}}$$

$$k(u) = k_o \cdot \ln \left(\frac{u_f}{u} \right)$$

Modellen krever kjennskap til de to parameterne hastighet ved fri flyt (u_f) og optimal tetthet (k_o). Fra tidligere modeller har det blitt konstatert at hastigheten ved fri flyt er relativt enkel å estimere. Passende verdier for den optimale tettheten er derimot vanskeligere å observere i felt og vil kunne variere mellom ulike vegmiljø. En svakhet ved modellen er at tettheten ved tilnærmet stillestående trafikk går mot uendelig da hastighetsvariabelen i den logaritmiske delen av uttrykket går mot null.

Northwestern

En fjerde modell ble foreslått av Drake et al. (1967) ved Northwestern University, da de hadde observert at de fleste hastighet- og tetthetsforholdene dannet en S-formet kurve. Følgende ligninger ble foreslått:

$$u(k) = u_f \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_o}\right)^2}$$

$$k(u) = k_o \sqrt{2 \ln \left(\frac{u_f}{u}\right)}$$

Tilsvarende som for Underwoods tilnærming krever modellen kjennskap til parameterne for hastighet ved fri flyt (u_f) og optimal tetthet (k_o). Også her vil tettheten ved tilnærmet stillestående trafikk gå mot uendelig, da hastighetsvariabelen i den logaritmiske delen av uttrykket går mot null.

May (1990) gjennomførte en sammenligning av de fire ulike modellene ved bruk av virkelige data hentet fra en motorveg med en skiltet hastighet på 55 miles per hour, tilsvarende ca. 90 km/t. For å tilpasse modellene til datasettet benyttet May seg av beste regresjonstilpasning for hver modell, hvilket innebærer at verdien av tilsvarende parametre kunne variere mellom to modeller. Modellene kan også testes ved å estimere de ulike parameterne basert på det virkelige datasettet, men dette ble ikke gjennomført i denne sammenligningen.

Modellenes prediksjon av de ulike trafikkarakteristikkene basert på regresjonstilpasninger, samt modellenes gjennomsnittlige avvik fra det virkelige datasettet ble sammenlignet, og er gjengitt i tabell 8-1.

Tabell 8-1: Sammenligning av enkeltregimemodellers prediksjon av de ulike trafikkarakteristikkene ved tilpasning til et virkelig datasett. Volum er gitt som veh/h, tettheten som veh/mi og hastigheten i mi/h. (Kilde: May, 1990)

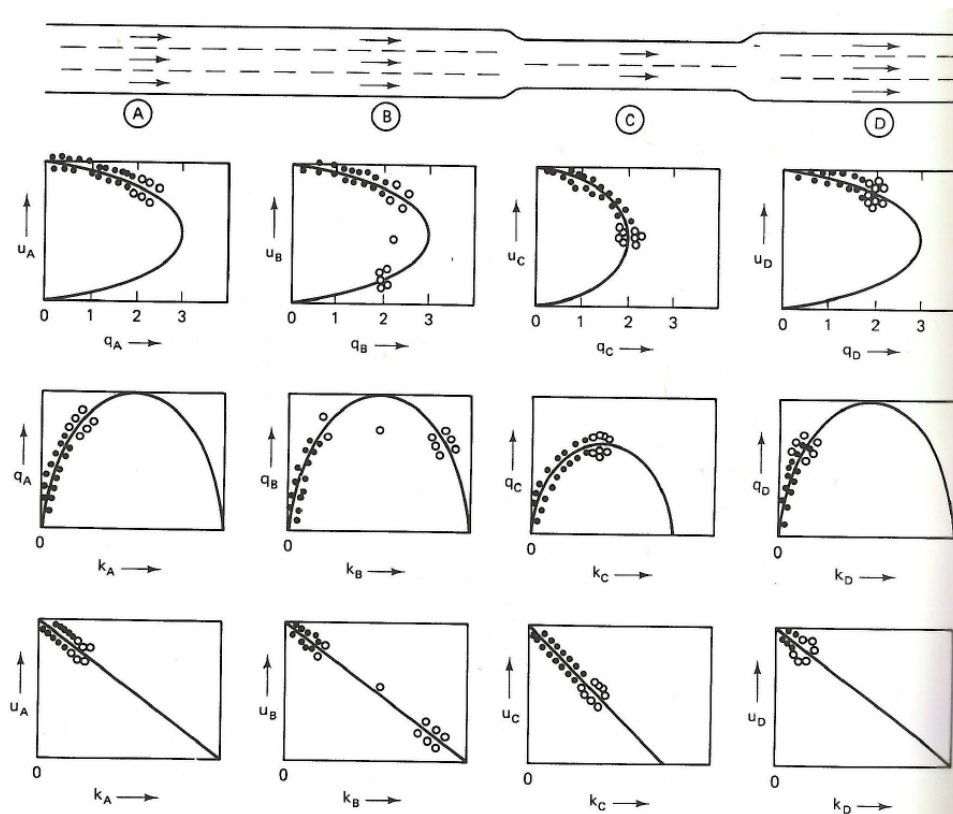
Trafikkarakteristikk	Datasett	Enkeltregimemodeller			
		Greenshield	Greenberg	Underwood	Northwestern
Maksimalt volum, q_m	1800 - 2000	1800	1565	1590	1810
Hastighet ved fri flyt, u_f	50 - 55	57	∞	75	49
Optimal hastighet, u_o	28 - 38	29	23	28	30
Køtetthet, k_j	185 - 250	125	185	∞	∞
Optimal tetthet, k_o	48 - 65	62	68	57	61
Gjennomsnittlig avvik	-	4,7	5,4	5,0	4,6

Sammenligningen konkluderer med at Northwestern-modellen oppnår det laveste gjennomsnittlige avviket fra det virkelige datasettet. Det største gjennomsnittlige avviket fremkom i Greenberg-modellen.

8.1.2 Flaskehals og trafikkstrømmer

Lokasjon er viktig for innsamling av representativ data knyttet til volum, hastighet og tetthet. Dette ble illustrert av (May, 1990) gjennom et fiktivt eksempel som tar for seg en vegstrekning med en uavbrutt

trafikkstrøm, der en fysisk flaskehals i form av en feltreduksjon innvirker på den totale trafikkavviklingen i systemet. Vegstrekningen, samt de definerte punktene for datainnsamling er illustrert i figur 8-3.



Figur 8-3: Illustrasjon over innvirkningen en flaskehals har på forholdet mellom volum, hastighet og tetthet ved ulike lokasjoner. (Kilde: May, 1990)

For hvert definerte punkt langs vegstrekningen har det forventede forholdet mellom volum, hastighet og tetthet blitt illustrert sammen med Greenshields modell. De svarte punktene representerer registreringer i perioder med lave trafikkvolum opp mot kapasiteten av to kjørefelt. De hule punktene representerer registreringer i perioder med et trafikkvolum tilsvarende kapasiteten gitt av to og et halvt kjørefelt.

Punkt A ligger oppstrøms for influensområdet til flaskehalsen og påvirkes følgelig ikke av den reduserte kapasiteten når trafikkvolumet overskrider kapasiteten av to kjørefelt.

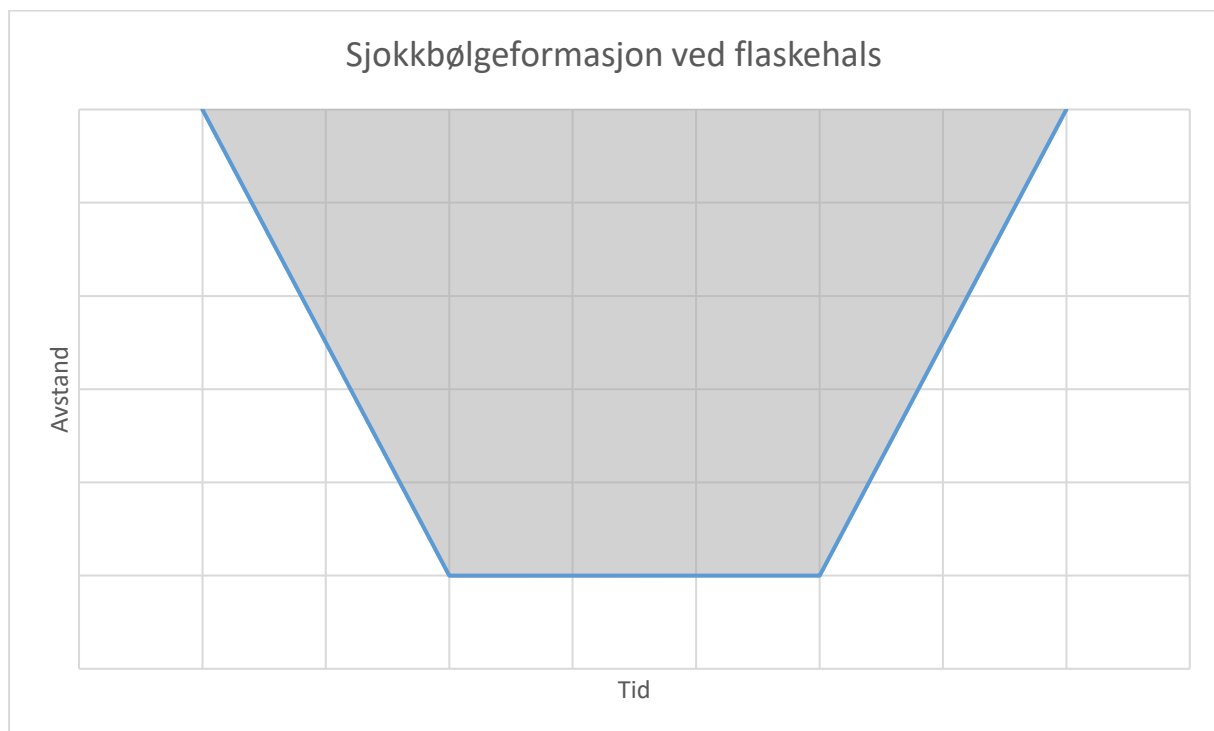
Punkt B er også plassert oppstrøms for flaskehalsen, men ligger innenfor influensområdet. Når trafikkvolumet overskrider kapasiteten gitt av flaskehalsen vil det oppstå en tilbakeblokkering i punkt B, med en resulterende reduksjon i hastighet og økning i tetthet. Datapunktene vil fordele seg mellom fri flyt-regimet og det overbelastede regimet i det trafikkvolumet overskrider kapasiteten i flaskehalsen.

Punkt C er den definerte flaskehalsen og har følgelig en redusert kapasitet sammenlignet med resten av systemet. Dette gjenspeiles i figuren ved at køtettheten og det maksimale trafikkvolumet blir redusert til 2/3 av gjeldende verdi for resten av systemet. Da kapasiteten på vegstrekningen nedstrøms for flaskehalsen øker til tre kjørefelt vil det ikke oppstå tilbakeblokkeringer i selve flaskehalsen. Trafikkvolumet vil holde seg stabilt rundt kapasitetsgrensen i perioder der volumet overskrider kapasiteten av to kjørefelt, noe som innebærer at punkt C vil operere med optimal hastighet og tetthet.

Punkt D vil som følge av flaskehalsen håndtere et maksimalt volum gitt av kapasiteten til to kjørefelt. Da vegstrekningen er dimensjonert med tre kjørefelt innebærer dette at det til enhver tid vil være tilgjengelig kapasitet som ikke er mulig å utnytte.

8.2 Sjokkbølgeteori

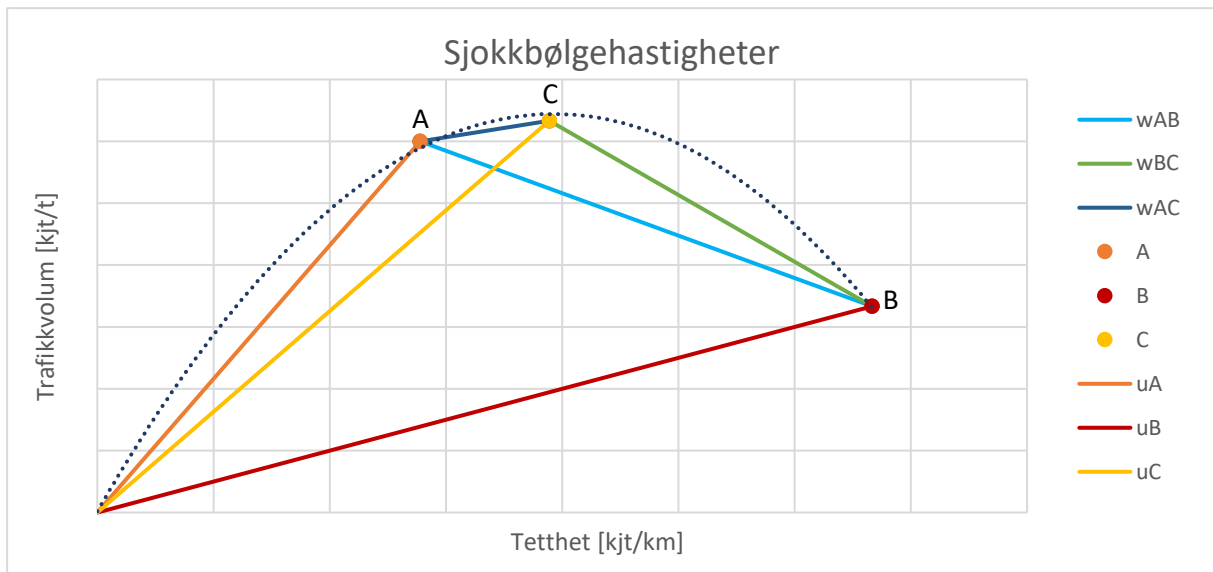
Kødannelse ved en flaskehals kan illustreres som sjokkbølger mellom homogene trafikkstrømmer. Sjokkbølgene representerer skillet mellom ulike volum-, hastighet-, og tetthetsrelasjoner ved forskjellige trafikksituasjoner. For flaskehals, der kapasiteten over tid er konstant, vil sjokkbølgeformasjonen forenklet sett følge mønsteret som er illustrert i figur 8-4 (May, 1990). Når etterspørselen overstiger kapasiteten vil det dannes en sjokkbølge som representerer skillet mellom køen som venter på å komme gjennom flaskehalsen og trafikken som ankommer køen. Denne bygger seg bakover relatert til flaskehalsens lokasjon. Over tid vil etterspørselen typisk reduseres, og når etterspørselen er lik kapasiteten vil det dannes en stasjonær sjokkbølge som markerer enden av køen. Når etterspørselen reduseres og blir lavere enn kapasiteten vil køen løses opp bakfra, og sjokkbølgen vil bevege seg mot flaskehalsens lokasjon helt til køen er løst opp.



Figur 8-4: Typisk mønster ved sjokkbølgeformasjon ved flaskehals med konstant kapasitet. (Basert på May, 1990)

Hvor fort og i hvilken retning sjokkbølgene forplanter seg avhenger av volum-, hastighet- og tetthetsrelasjonene for de ulike trafikksituasjonene. I et volum-tetthetsdiagram vil hastigheten og retningen på sjokkbølgene illustreres med helningen på linjen mellom punktene som representerer situasjonene sjokkbølgen går mellom. Hvis linja har en negativ helning vil sjokkbølgen forplante seg bakover i forhold til trafikken retning, og motsatt for positive helninger. Størrelsen på helninga representerer størrelsen på hastigheten. Tilsvarende vil linjene fra origo til situasjonspunktene representere hastigheten i situasjonene. Dette er illustrert i figur 8-5, der:

- A, B = situasjoner
- u = hastighet
- w = sjokkbølgehastighet



Figur 8-5: Illustrasjon av trafikkvolum, hastighet og tetthet ved ulike situasjoner og sjokkbølgehastigheten for overgangen mellom situasjonene. Situasjonene er illustrert på en Greenshield-kurve.

Ved å benytte en kontinuitetsbetraktning, og representere trafikkvolum med q og tetthet med k , kan sjokkbølgehastigheten til skillet mellom situasjon A og B uttrykkes som:

$$w_{AB} = \frac{q_A - q_B}{k_A - k_B} = \frac{\Delta q}{\Delta k}$$

Sjokkbølgeanalyse er en makroskopisk tilnærming som ser på gjennomsnittlige verdier for homogene trafikkstrømmer, og ikke verdier for enkeltkjøretøy. Dette gjør at kun konstante verdier eller umiddelbare endringer opptrer. Tilnærmingen i overgangene mellom situasjoner, der det typisk forekommer gradvise endringer i virkeligheten, blir dermed ikke nøyaktig. Dette gjør at trafikkstrømmene må ha en viss utstrekning med konstante uforstyrrede volum-tetthetssammenhenger over tid, for at tilnærmingen skal være god (May, 1990).

Videre vil effekten av en hendelse i trafikken som tvinger et kjøretøy til bremse ned og kjøre i en lavere hastighet i en gitt tid beskrives ved å benytte 3 definerte situasjoner.

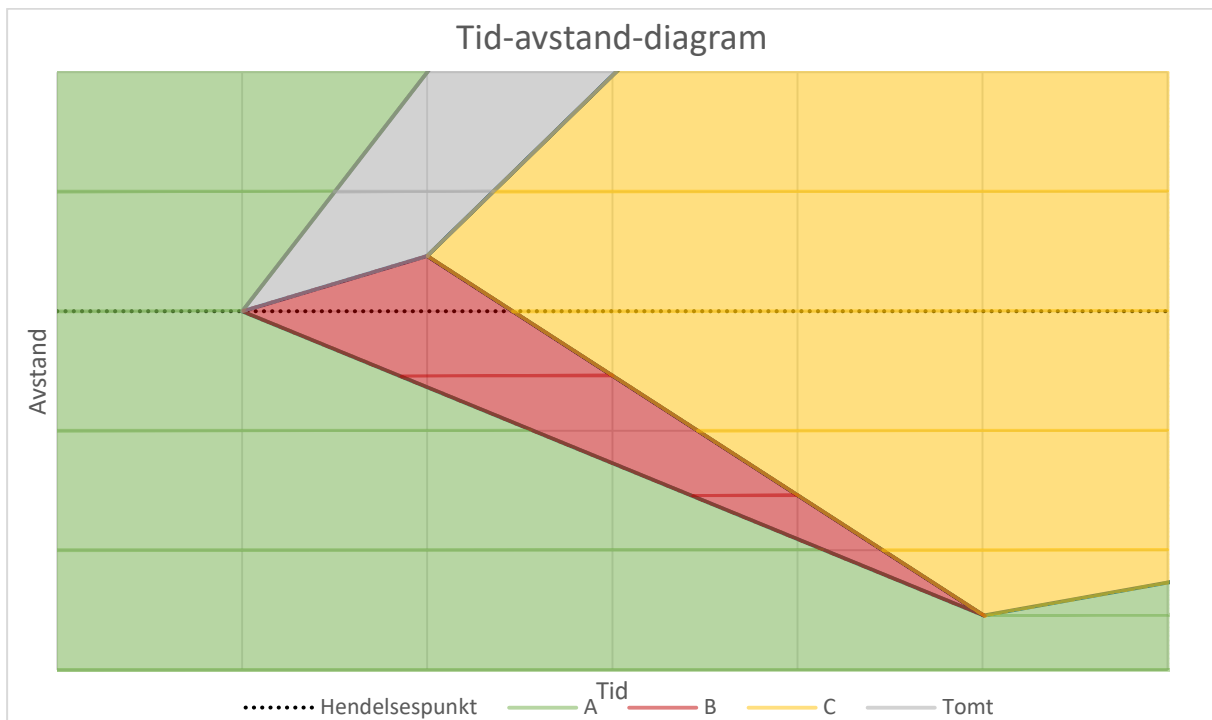
Før hendelsen er trafikken på strekningen i situasjon A, som er en høyt belastet situasjon, i friflytsregimet. I det hendelsen oppstår blir oppstrøms trafikk påvirket, og en sjokkbølge forplanter seg bakover i trafikken og markerer et skille mellom situasjon B (køen) og situasjon A oppstrøms. På samme tid dannes det et tomrom i forkant av «hendelseskjøretøyet», da foranliggende kjøretøy fortsetter uforstyrret videre. «Hendelseskjøretøyet» og bakenforliggende kjøretøy fortsetter med hastigheten til situasjon B.

«Hendelseskjøretøyet» kan etter den gitte tiden med lav hastighet akselerere igjen, og går dermed fra situasjon B til oppløsningssituasjonen C. I det dette skjer dannes en ny sjokkbølge, som beveger seg bakover og markerer skillet mellom situasjon B og C. «Hendelseskjøretøyet» fortsetter videre med hastigheten til situasjon C, og oppstrøms kjøretøy vil følge etter når de får muligheten til å akselerere. Ettersom hastigheten i situasjon C er lavere enn hastigheten i situasjon A vil tomrommet mellom situasjon A og situasjon C teoretisk sett aldri forsvinne hvis situasjonene forblir uforstyrret og ingen flere hendelser inntreffer.

Ettersom w_{AB} er lavere enn w_{BC} vil situasjon B etter en viss tid løses opp. Punktet der situasjonen løses opp danner da utgangspunktet for en ny sjokkbølge som markerer skillet mellom situasjon A og

situasjon C. Denne beveger seg i samme retning som trafikken, da gjennomstrømningen er større i situasjon C enn i situasjon A. Hvis situasjonene forblir uforstyrret og ingen flere hendelser oppstår vil situasjon C teoretisk sett aldri løses opp, da sjokkbølgehastigheten mellom situasjon A og situasjon C er lavere enn hastigheten i situasjon C.

Utviklingen av og skillet mellom de ulike situasjonene i eksempelet er illustrert i et tid-avstand-diagram i figur 8-6.



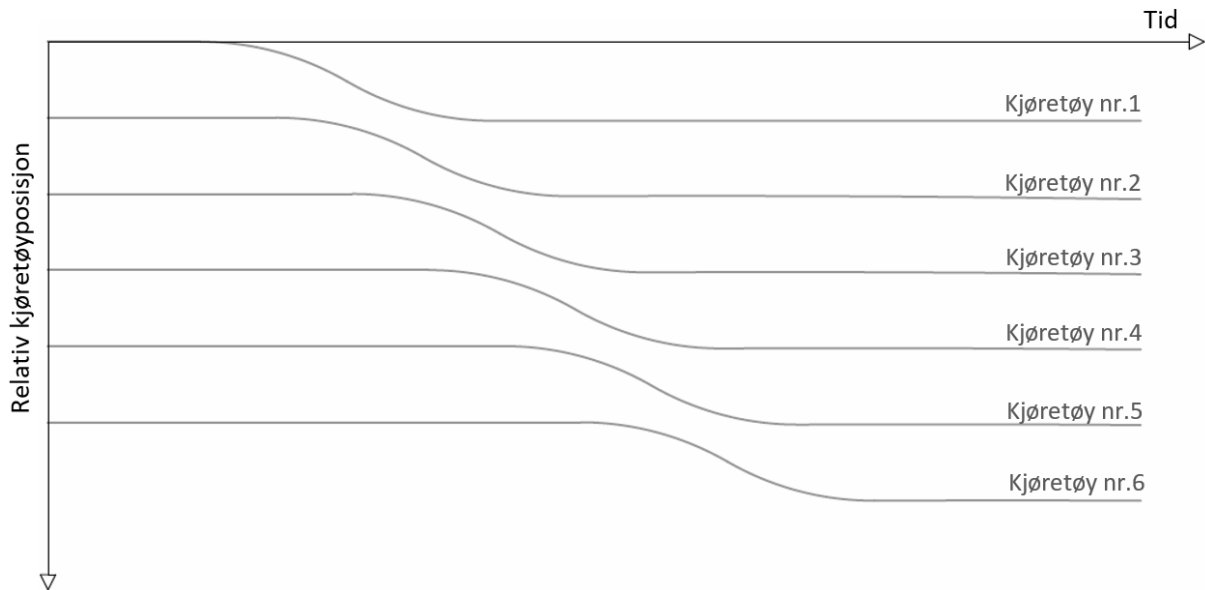
Figur 8-6: Tid-avstand-diagram som illustrerer utbredelsen av de ulike situasjonene ved sjokkbølgedannelse på grunn av et saktegående kjøretøy. Situasjon A (grønt) er en høyt belastet situasjon i friflytsregimet, situasjon B (rødt) er køsituasjonen og situasjon C (gult) er oppløsningssituasjonen. Det grå området illustrerer det teoretiske tomrommet som oppstår i forkant av det saktegående kjøretøyet.

Eksempelet over viser hvordan sjokkbølgene i teorien ville utbredt seg. Det er likevel noen elementer som ikke representerer virkeligheten like godt. Som nevnt tidligere er det kun homogene trafikkstrømmer som inkluderes. Dette gjør at adferden til de første kjøretøyene i hver trafikkstrøm ikke representeres like godt som de resterende kjøretøyene. Dette gjelder spesielt de første kjøretøyene ved oppløsningen av situasjon B. I virkeligheten ville det første kjøretøyet akselerert til en høyere hastighet enn i situasjon C, da det ikke ville vært hindringer nedstrøms for kjøretøyet som begrenser hastigheten. Dette gjør at tomrommet i forkant av «hendelseskjøretøyet», som i teorien aldri vil fylles opp, begynner å bli fylt opp umiddelbart etter at oppløsningen av situasjon B begynner.

8.3 Car-following

Car-following er en samlebetegnelse på en gruppe modeller med mikroskopisk detaljnivå som beskriver handlingsmønsteret til et kjøretøy som følger etter et annet kjøretøy. Det bakre kjøretøyet reagerer med enten akselerasjon eller retardasjon basert på handlingsmønsteret til kjøretøyet foran.

Ved å beregne reaksjonen for etterfølgende kjøretøy vil resultatet kunne fremstilles i et tid-avstand-diagram der den relative posisjonen mellom kjøretøyene over tid illustreres. Et eksempel på hvordan et slikt tid-avstand-diagram kan se ut er vist i figur 8-7.



Figur 8-7: Illustrasjon på fremstilling av en car-following-analyse i et tid-avstand-diagram

Hva som inkluderes i reaksjonsberegningene varierer fra modell til modell, men på et overordnet nivå kan modellene deles inn i fire forskjellige typer (Olstam og Tapani, 2004):

- GM-modeller
- Modeller basert på sikkerhetsavstand
- Terskelmodeller
- Modeller basert på uklar logikk

8.3.1 GM-modeller

GM-modellene er oppkalt etter General Motors, men går også under navnet GHR-modeller oppkalt etter Gazis, Herman og Rothery. Det er utviklet fem GM-modeller, som alle baserer seg på en kombinasjon av sensitivitet og stimuli (May, 1990). Forenklet kan modellene presenteres som:

$$\text{Reaksjon} = \text{Sensitivitet} \cdot \text{Stimuli}$$

Reaksjonsberegningene baserer seg på hastighetsforskjellen mellom kjøretøyene, samt en sensitivitetsfaktor. Sensitivitetsfaktoren kan igjen ta inn hastigheten til eget kjøretøy i tillegg til avstanden mellom kjøretøyene. De fem GM-modellene har ulik kompleksitet, men alle kan presenteres gjennom den generelle GM5-formelen (May, 1990):

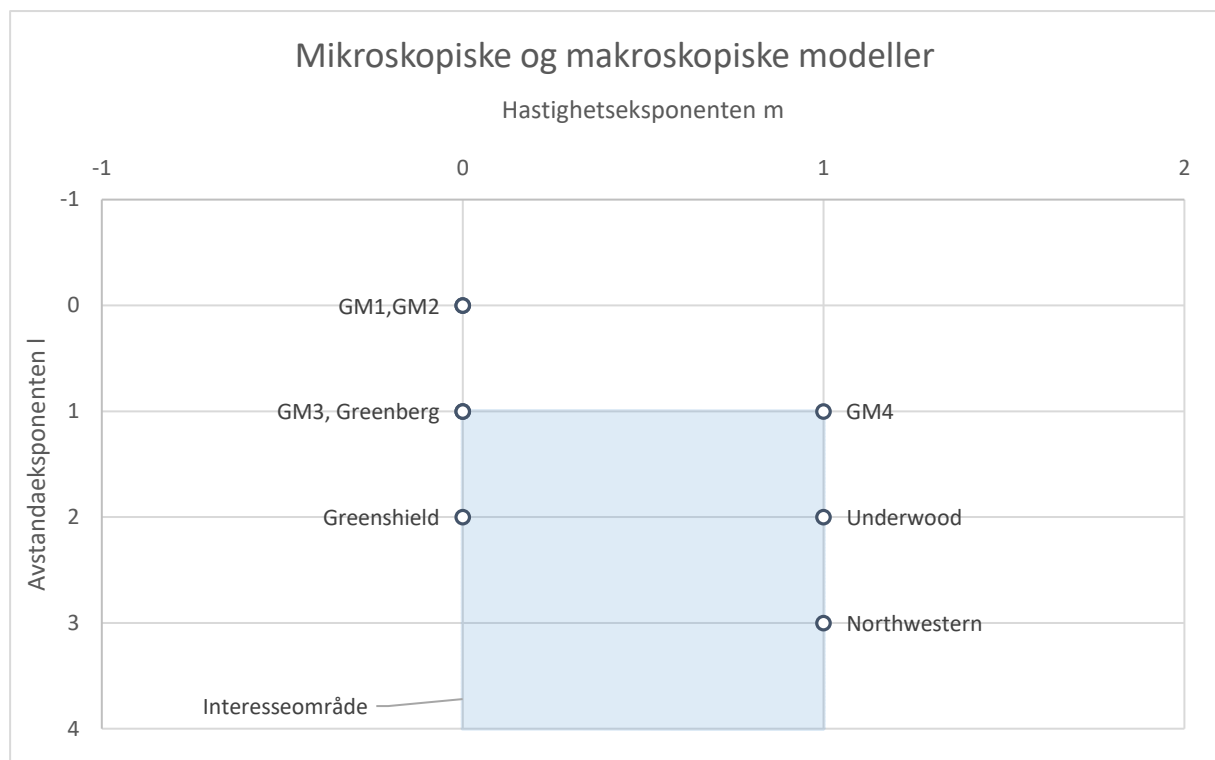
$$X_{n+1}''(t + \Delta t) = \frac{\alpha_{l,m} \cdot [X_{n+1}'(t + \Delta t)]^m}{[X_n(t) - X_{n+1}(t)]^l} \cdot [X_n'(t) - X_{n+1}'(t)]$$

Hvor:

X	Posisjon
X'	Hastighet
X''	Akselerasjon
n	Foranliggende kjøretøy
$n+1$	Etterfølgende kjøretøy
t	Tid
Δt	Reaksjonstid til føreren i etterfølgende kjøretøy
α	Sensitivitetskonstant
l	Avstandseksponent
m	Hastighetseksponent

Ved å sette l og m lik 0 og α til en konstant vil GM1-modellen bli gjenskapt. GM2-modellen har også l og m lik 0, men varierer α mellom to ulike verdier for å ha høyere sensitivitet når kjøretøyene er nærmere hverandre og lavere sensitivitet når kjøretøyene er lenger unna hverandre. Ved å sette $l = 1$, $m = 0$ og la α være én konstant igjen er GM3-modellen gjenskapt. GM4-modellen har $l = m = 1$, mens α fremdeles er en konstant.

Det er en direkte sammenheng mellom de mikroskopiske GM-modellene og de makroskopiske trafikkstrømsmodellene (May, 1990). Greenbergs modell for volum-, hastighet- og tetthets-sammenhenger vil for eksempel korrespondere med GM3 modellen. Sammenhengen mellom avstands- og hastighetseksponenten i GM-modellene og de makroskopiske modellene presentert av Greenberg, Greenshields, Underwood og Northwestern er presentert i figur 8-8. Området med modeller av størst interesse er området der $0 \leq m < 1$ og $l > 1$.



Figur 8-8: Sammenhengen mellom de mikroskopiske GM-modellene og de makroskopiske modellene presentert av Greenberg, Greenshield, Underwood og Northwestern. Interesseområdet er der $0 \leq m < 1$ og $l > 1$. (Basert på May, 1990)

Forskjellige valg av sensitivitetskonstanten og reaksjonstiden gir GM-modellene ulik stabilitet. Stabilitetsverdien beregnes som produktet av de to parameterne, og avgjør i hvor stor grad modellen vil oscillere. Hvis modellen kun ser på to kjøretøy som følger hverandre regnes stabiliteten som en lokal stabilitet, og ved økende stabilitetsverdi vil modellen gå fra å være ikke-oscillerende til dempet oscillerende og videre til økende oscillerende. Hvis modellen derimot ser på en uendelig rekke med kjøretøy vil stabiliteten være asymptotisk, og modellen vil ikke kunne være ikke-oscillerende, men går fra dempet til økende oscillerende ved økende stabilitetsverdi. (May, 1990)

8.3.2 Modeller basert på sikkerhetsavstand

Modeller som baserer seg på en sikkerhetsavstand legger til grunn en minimumsavstand mellom kjøretøyene for å unngå kollisjon. For å holde en avstand som er større enn sikkerhetsavstanden baserer formelverkene seg ofte på Newtons lover for bevegelse for å beregne parametere som avstand, hastighet, akselerasjon, bremselengde og reaksjonstid.

Et eksempel på en modell basert på sikkerhetsavstand er Pipes teori som tok utgangspunkt i følgende regel foreslått av California Motor Vehicle Code:

«A good rule for following another vehicle at a safe distance is to allow yourself at least the length of a car between your vehicle and the vehicle ahead for every ten miles per hour of speed at which you are traveling» - (May, 1990, s. 164)

Resultatet ble en sammenheng som avgjorde kjøretøyets avstandsluke som en funksjon av hastighet.

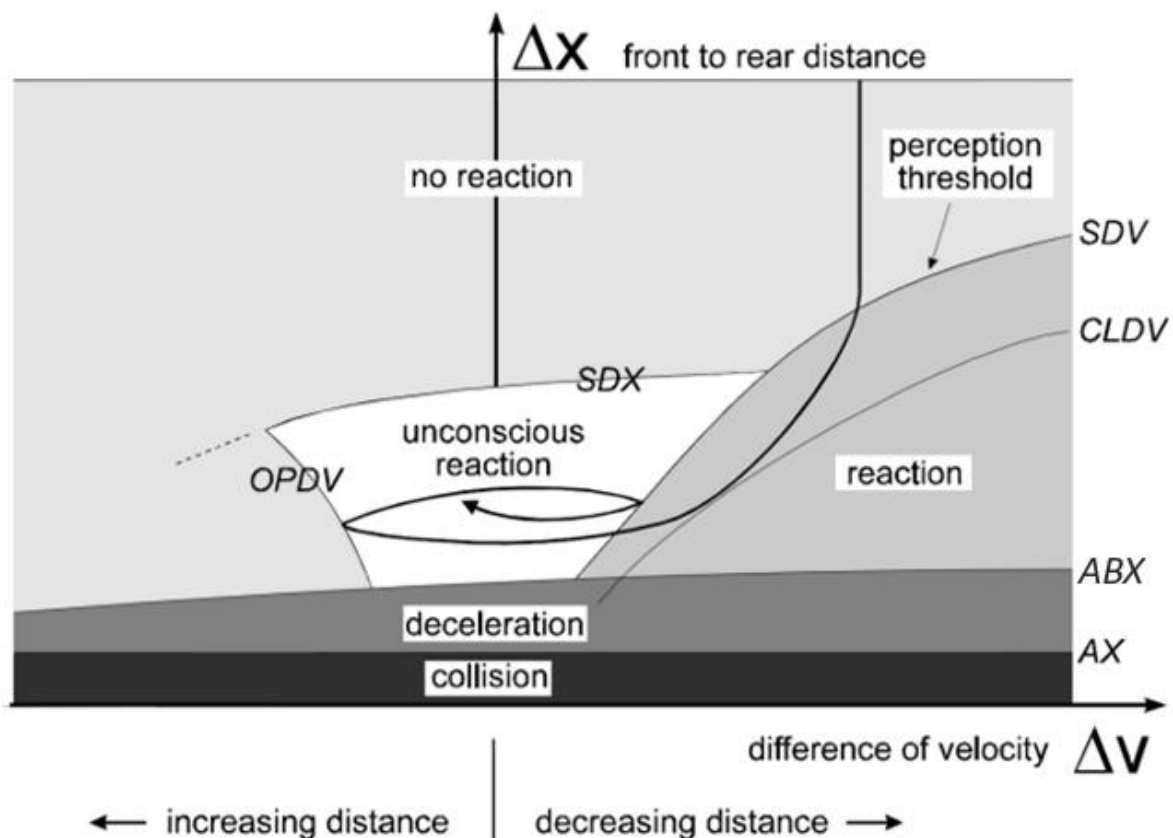
Forbes tok også utgangspunkt i en sikkerhetsavstand, men valgte å basere avstanden på nødvendig reaksjonstid for at kjøretøyet bak skulle oppfatte behovet for retardasjon og bremse. (May, 1990)

I 1981 presenterte Gipps en teori basert på sikkerhetsavstand (Olstam og Tapani, 2004). Denne har senere blitt videreutviklet og lagt til grunn i simuleringsverktøyet Aimsun (Transport Simulation Systems, 2017), og vil bli presentert i et senere kapittel.

8.3.3 Terskelmodeller

Terskelmodeller, eller psykofysiske modeller, avgjør behovet for reaksjon basert på terskelverdier. Hvis en terskelverdi blir passert vil reaksjonsmønsteret tilpasses den nye situasjonen kjøretøyet er i. Dette gjør at en minimumsverdi må passeres før noen form for reaksjon finner sted.

Et eksempel på en terskelmodell er Wiedemanns modell som er implementert i simuleringsverktøyet PTV Vissim (Olstam og Tapani, 2004). Figur 8-9 gir en kort oppsummering av modellens oppbygging.



Figur 8-9: Illustrasjon av Wiedemanns terskelmodell inkludert en illustrert kjørebane. (Kilde: Hoyer og Fellendorf, 1997)

De ulike forkortelsene i figuren kan forklares som:

AX ønsket avstand mellom fronten av to etterfølgende kjøretøy i en stillestående kø.

ABX minimal følgeavstand til foranliggende kjøretøy

SDV en oppfatningsterskel der det etterfølgende kjøretøyet bevisst observerer at det tar igjen det foranliggende kjøretøyet, og begynner å tilpasse hastigheten.

CLDV et handlingspunkt der det etterfølgende kjøretøyet bevisst observerer at det tar igjen det foranliggende kjøretøyet, og begynner å tilpasse hastigheten ved å benytte bremsene.

SDX en oppfatningsterskel som representerer maksimal følgeavstand.

OPDV et handlingspunkt der det etterfølgende kjøretøyet legger merke til at det holder en lavere hastighet enn kjøretøyet det følger, og begynner å akselerere.

8.3.4 Modeller basert på uklar logikk

Car-followingmodeller basert på uklar logikk dekker en bredere gruppe modeller. Dette er modeller som baserer seg på et sett med regler for å avgjøre når ulike handlinger skal utføres. Reglene kan være overlappende, og sannsynlighetsfordelinger kan benyttes til å avgjøre hvilken beslutning som blir tatt. Bakgrunnen for de ulike reglene kan være mer eller mindre teoretisk fundamentert, men modellene kan også være satt sammen av ulike modeller fra de tre andre gruppene.

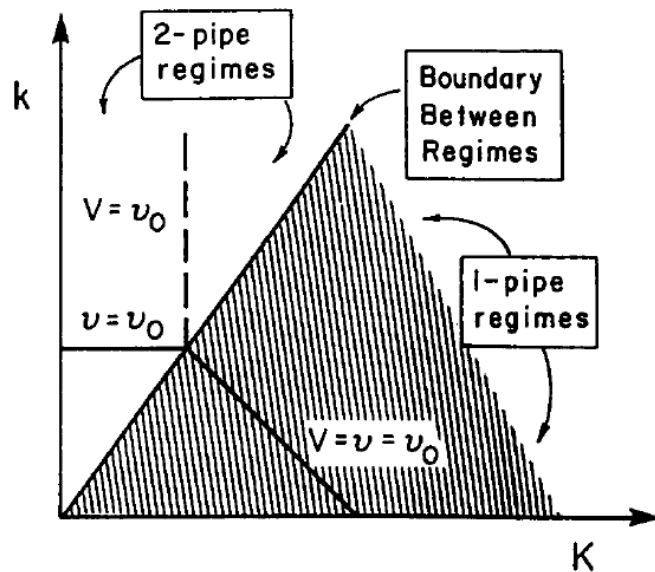
8.4 Kontinuitetsteori med spesialfelt

Med utgangspunkt i den kinematiske bølge-teorien presentert av Lighthill og Whitham (1955) og Richards (1956) (LWR-modellen) har Daganzo (1997) utviklet en egen kontinuitetsteori for trafikkdynamikk på motorveger med spesialfelt. Denne presenterer en generalisert teori for motorveger med to kjøretøytyper og et sett med kjørefelt som er reservert for en av disse. Spesialfeltene kan være typiske prioriterte kjørefelt som kollektivfelt eller sambruksfelt, men kan også være selvpålagte restriksjoner. Et eksempel på en selvpålagt restriksjon kan være trafikk oppstrøms for en overbelastet avkjøringsrampe på en motorveg, der trafikken som skal fortsette på avkjøringsrampen unngår kjørefeltene ytterst på motsatt side av avkjøringsrampen. Teorien åpner dermed for at LWR-modellen kan beskrive trafikk der trafikkforholdene mellom kjørefeltene er forskjellige og de to kjøretøytypene påvirkes ulikt.

I Daganzos teori er tettheten til de to kjøretøytypene formulert som to partielle differensialligninger som følger trafikkstrømmenes bevaringslover. I teoriens enkleste form vil det kun være behov for én tilleggsparameter utover behovet i grunnleggende kinematisk bølge-teori. Denne parameteren representerer andelen kjørefelt som er spesialfelt. Etter at initialbetingelsene er lagt til grunn for å løse differensialligningene kan de samlede resultatene fremstilles som enkle og intuitive diagrammer.

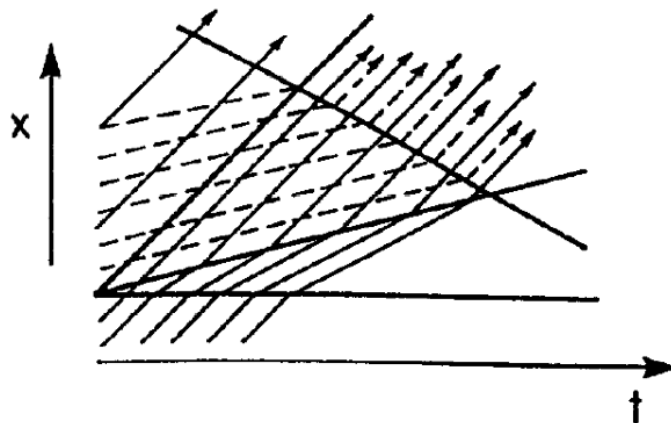
Formelverket som legges til grunn for beregningene avhenger av hvilken situasjon trafikken er i. Hvis trafikken som ikke har tilgang på spesialfeltene begynner å forme en kø i de vanlige kjørefeltene mens de resterende kjøretøyene benytter spesialfeltet, vil trafikken følge en 2-rørs analogi som er i tråd med Daganzos teori om spesialfelt. Her kan trafikken modelleres som to separate rør med hver sin væsketype og hver sin hastighet. I tilfeller der valg av kjørefelt ikke har betydning for fremkommeligheten, og en eventuell kø vil involvere begge kjøretøytypene, vil trafikken følge en 1-rørs analogi i tråd med LWR-modellen. Her kan trafikken modelleres som et rør med en blanding av de to væsketyper med én felles hastighet.

Trafikken vil kun kunne befinne seg i en av de to regimene, eller i en overgang mellom dem. Videre er overgangen antatt å være så brå at utstrekningen kan ignoreres. Ved å representere kjøretøy med tilgang til spesialfeltene med store bokstaver og de resterende med små bokstaver er overgangen mellom 2- og 1-rørs-regimene illustreres i figur 8-10.



Figur 8-10: Iso-kurver for hastighet i (K, k) -planet, med illustrasjon av skillet mellom 2- og 1-rørs-regimene. (Kilde: Daganzo, 1997)

Som et resultat vil det være mulig å tegne opp tid-avstand-diagrammer for å illustrere de ulike kjøretøyenes bevegelse gjennom ulike situasjoner over tid. Her vil de ulike kjøretøytypene kunne skilles fra hverandre, og fordelene gitt av spesialfeltene vil kunne illustreres som vist i figur 8-11. Heltrukne linjer med pil representerer kjøretøy med tilgang på spesialfeltene og stiplede linjer med pil representerer de resterende kjøretøyene. I begynnelsen befinner trafikken seg i et 2-rørs-regime. Her kommer det tydelig frem at kjøretøyene med tilgang på spesialfeltene har muligheten til å holde en høyere hastighet enn de resterende kjøretøyene. Til slutt ender trafikken i et 1-rørs-regime der alle kjøretøyene har samme hastighet.



Figur 8-11: Illustrasjon av de ulike kjøretøytypenes bevegelse gjennom ulike situasjoner fra et 2-rørs-regime til et 1-rørsregime. Heltrukne linjer med pil er kjøretøy med tilgang på spesialfeltene og stiplede linjer med pil er de resterende kjøretøyene. (Kilde: Daganzo, 1997)

Med utgangspunkt i Daganzos numeriske løsning har (Newell, 1999) laget en grafisk løsning for spesialtilfellet med kødannelse på en avkjøringsrampe fra en motorveg. Den grafiske løsningen skal gi en evaluering av den komplette køutviklingen. Illustrasjonen av problematikken ville vært tydeligere i den grafiske løsningen enn den numeriske prosedyren, men på samme tid vil den kunne være vanskeligere å implementere i mer komplekse situasjoner (Newell, 1999).

9 Teoretisk anvendelse

Da datainnsamlingen og analysen har foregått på et makroskopisk detaljnivå vil dette også være et naturlig detaljnivå i anvendelsen av de teoretiske modellene og sammenhengene. Videre er caseområdet beskrevet ved hjelp av trafikkstrømsmodeller med grunnlag i estimerte trafikk-karakteristikker. Sjøkkbølgedannelsen fra situasjon 2-4 er også illustrert gjennom en sjøkkbølgeanalyse basert på en forenkling til tre trafikksituasjoner. Da Car-following-teoriene er mikroskopiske modeller som ser på adferden til enkeltkjøretøy, vil det bli for omfattende å anvende dem for å beskrive trafikken i caseområdet uten å benytte simuleringsprogrammer for å modellere hele området. Dette er gjort og vil bli beskrevet i del B.

Det ville også vært interessant å benytte Daganzos numeriske og Newells grafiske løsninger for å analysere problematikken på Sluppen. Tatt i betraktning at de numeriske løsningene egner seg best til datasimulering av generelle klasser med strømningsmønstre og at de grafiske løsningene er vanskelige å implementere i mer komplekse situasjoner (Newell, 1999) vil bruken av modellene vanskelig la seg gjennomføre innenfor rammene av denne oppgaven.

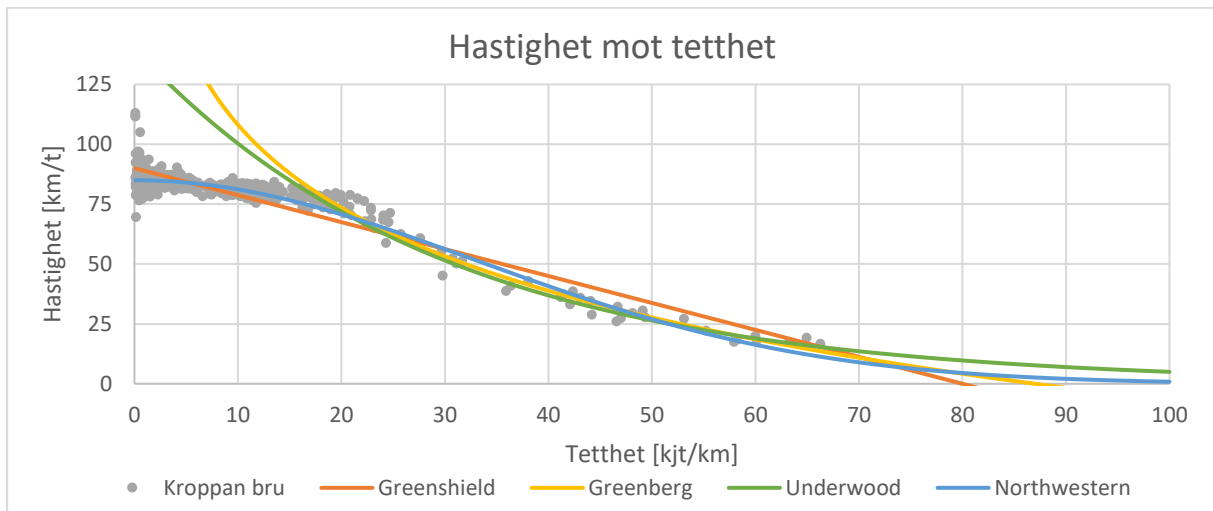
9.1 Anvendelse av trafikkstrømsmodeller

I kapittel 8.1 ble ulike trafikkstrømsmodeller, samt et fiktivt eksempel fra May (1990) knyttet til innvirkningen av en flaskehals på forholdet mellom volum, hastighet og tetthet presentert. For å kunne gi et bedre bilde av situasjonen som oppstår på strekningen mellom Tonstad og Sluppen gjennom morgenrushet er det ønskelig å tilegne en trafikkstrømsmodell til de registrerte dataene. Dataene som benyttes i sammenligningen er registreringer i høyre kjørefelt fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Modellene er tilpasset datagrunnlaget gitt av forholdet mellom hastighet og tetthet. De nødvendige trafikkarakteristikkene er videre bestemt ved bruk av en kvalitativ vurdering av modellenes overensstemmelse med datasettet. De benyttede verdiene er gjengitt i tabell 9-1.

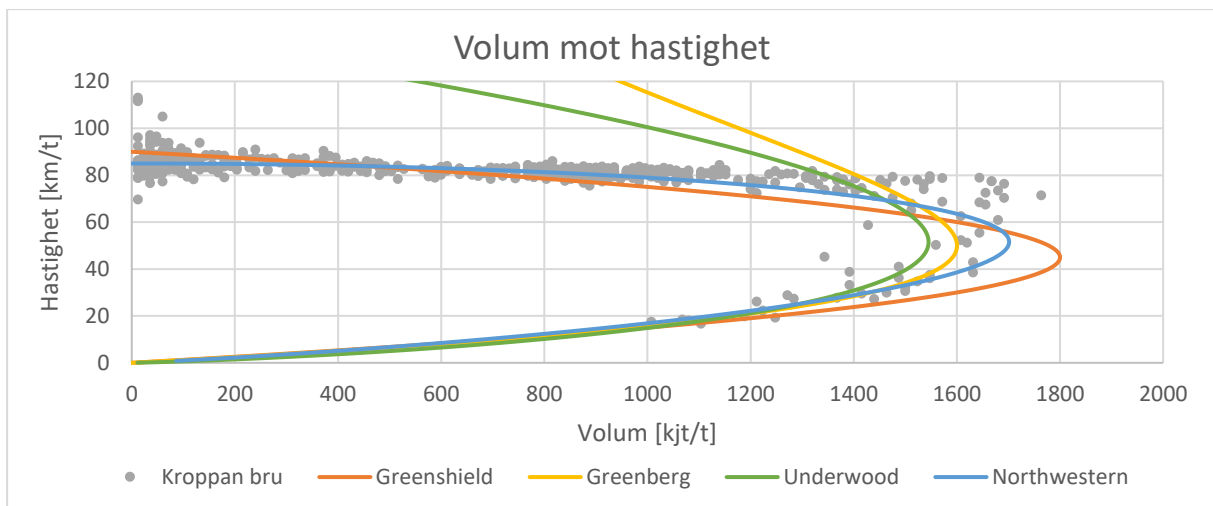
Tabell 9-1: Tilpasset verdi av de nødvendige trafikkarakteristikkene gitt for de ulike trafikkstrømsmodellene.

	Trafikkstrømsmodell			
Parameter	Greenshield	Greenberg	Underwood	Northwestern
u_f	90		140	85
u_o		50		
k_o			30	33
k_j	80	87		

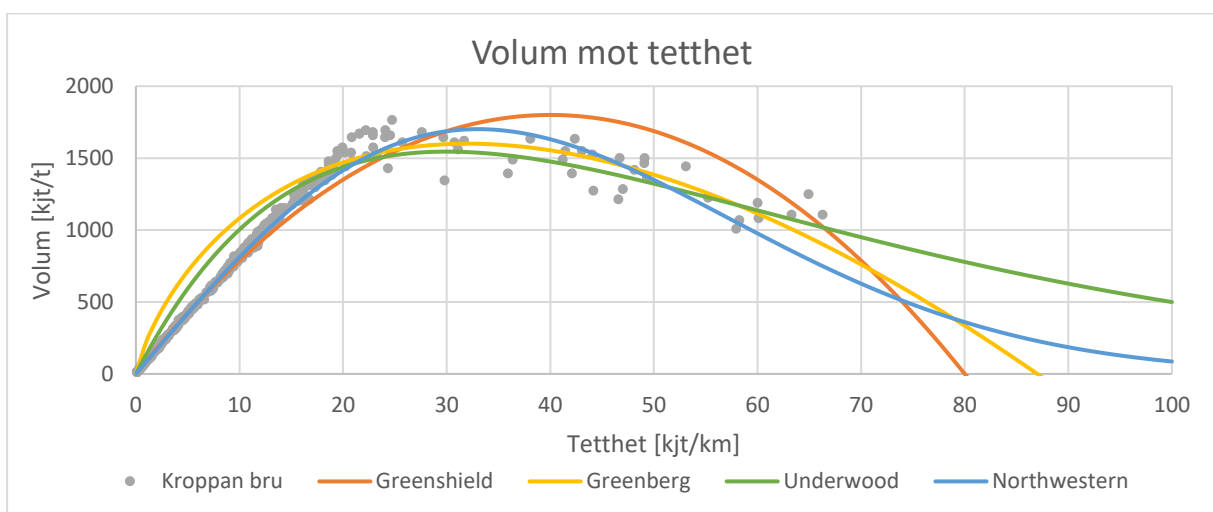
Modellenes tilpasning til de ulike volum-, hastighet- og tetthetsforholdene er illustrert i figur 9-1 til figur 9-3.



Figur 9-1: Trafikkstrømsmodellenes tilpasning til forholdet mellom hastighet og tetthet, gitt datagrunnlaget i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru, med en oppløsning på 5 minutter.



Figur 9-2: Trafikkstrømsmodellenes representasjon av forholdet mellom hastighet og volum, sammen med datagrunnlag i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Punktene er gitt med en oppløsning på 5 minutter.



Figur 9-3: Trafikkstrømsmodellenes representasjon av forholdet mellom volum og tetthet, sammen med datagrunnlag i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Punktene er gitt med en oppløsning på 5 minutter.

Datasettet hentet fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru inneholder registreringer for to yrkesdøgn og er gitt med en oppløsning på 5 minutter. Videre viser reduksjonen i hastighet og økningen i tetthet til at registreringsstasjonen ligger innenfor influensområdet til flaskehalsen gjennom morgenrushet. Varigheten og utstrekningen av influensområdet er likevel begrenset.

Basert på modellenes tilnærming til det virkelige datasettet på Kroppan bru ble det konkludert med at Northwestern ga den beste tilnærmingen til alle volum-, hastighet- og tetthetssammenhengene innenfor spekteret gitt av det virkelige datasettet.

Videre skal endringene i de trafikale forholdene over analysestrekningen illustreres ved bruk av en tilnærming til eksempelet om flaskehals og trafikkstrømmer presentert av (May, 1990). Dette krever kjennskap til endringen av volum-, hastighet- og tetthetssammenhengene over strekningen. Som grunnlag for dette ble 3 ulike delstrekninger mellom Tonstad og avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen definert basert på observasjoner i området.

Delstrekning 1 går fra krysset ved Tonstad til trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru og har en lengde på ca. 2390 meter. Fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru foreligger det registreringer på enkeltkjøretøynivå. Basert på analysene gjort tidligere, er det rimelig å anta at trafikken som ferdes på denne delstrekningen vil kunne kjøre i skiltet hastighet gjennom store deler av døgnet. Strekningen ligger på grensen til influensområdet til flaskehalsen og opplever en liten innvirkning i de verste periodene gjennom morgenrushet. Basert på eksempelet til May vil denne delstrekningen kunne anses som en blanding av strekning A og B.

Delstrekning 2 er definert fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru til innkjøringen til bussholdeplassen og har en lengde på ca. 350 meter. Fra befaringer ble det observert at køfronten ofte beveget seg mellom inn- og utkjøringen fra bussholdeplassen, og at køformasjonen strakk seg ut på bruene. Det er også forventet at en større andel av trafikken som skal til E6 Omkjøringsvegen velger å plassere seg i riktig kjørefelt over denne delstrekningen. Basert på eksempelet til May vil denne delstrekningen kunne anses som strekning B.

Delstrekning 3 er definert fra innkjøringen til bussholdeplassen til enden av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og har en lengde på ca. 520 meter. Da majoriteten av strekningen ligger nedstrøms for bussholdeplassen vil strekningen domineres av en køoppløsningssituasjon. Sjøkkbølgene som dannes av bussen ved inn- og utkjøring fra bussholdeplassen vil kun påvirke oppstrøms trafikk, og effekten på delstrekning 3 vil være minimal. Dette kan anses som strekning C i eksempelet til May.

Gjennom en forenklet estimering ble de nødvendige verdiene for volum, hastighet og tetthet i høyre kjørefelt beregnet for hver delstrekning. Estimatet benytter trafikk tall for antall kjøretøy som skal til E6 Omkjøringsvegen hentet fra bomsnittet på Tonstad, reisetidsregistreringer mellom Tonstad og avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen, og antall kjøretøy som ligger i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Andelen kjøretøy som benytter seg av sent feltskifte, hentet fra manuelle registreringer, er også lagt til grunn for estimeringen av trafikkvolumet på delstrekning 3. Alle datasettene er gjennomsnittlige kvartersverdier for yrkesdøgn.

Trafikkvolumet i høyre kjørefelt på delstrekning 1 er gitt av trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Videre ble en differansen mellom det kjente volumet som skal til E6 Omkjøringsvegen gitt ved Tonstad og registreringene i høyre kjørefelt på Kroppan bru beregnet. Denne trafikkmengden viser til antallet kjøretøy som legger seg inn i høyre kjørefelt over delstrekning 2 og 3. Andelen sene feltskifter på delstrekning 3 ble så beregnet ved bruk av den eksponentielle sammenheng mellom andelen sene feltskifter og trafikkvolumet på avkjøringsrampen, som ble funnet fra de manuelle videoregistreringene.

Estimert volum som skal fra Tonstad til E6 Omkjøringsvegen har ikke blitt justert i henhold til forventet forskyving mellom tidsintervall basert på reisetiden over strekningen. Trolig vil det ved høye volum oppstå forsinkelser gjennom systemet som fører til en større spredning av trafikkvolumet enn det som blir estimert. I perioden 07:30 til 07:45 er estimert trafikkvolumet på delstrekning 3 på 2232 kjt/t, noe som er å anse som høyere enn det som er praktisk mulig å oppnå med ett kjørefelt. Det ble derfor foretatt en manuell justering der trafikkvolumet kl. 07:30 ble satt ned til 2100 kjt/t og de resterende kjøretøyene ble overført til neste tidsintervall.

Strekningshastigheten mellom Tonstad og Kroppan bru er basert på tre ulike kriterier. Er strekningshastigheten over 80 km/t viser dette til at det ikke er noen avviklingsproblemer over hele analysestrekningen. Hastigheten for hver delstrekning blir følgelig satt til gjeldende strekningshastighet. Ligger strekningshastigheten mellom 66,7 km/t og 80 km/t, tilskrives delstrekning 1 en hastighet på 80 km/t, da det ikke er forventet at delstrekningen ligger innenfor influensområdet til flaskehalsen. Ved en hastighet under 66,7 km/t vil det være forventet at det foreligger noen avviklingsproblemer som i hovedsak gjelder for delstrekning 2 og 3, i tillegg til at deler av delstrekning 1 blir påvirket. Strekningshastigheten på delstrekning 1 antas da å være 20% høyere enn den registrerte strekningshastigheten.

Basert på reisetiden over analyseområdet, samt estimert hastigheten på delstrekning 1 er det mulig å beregne den resterende reisetiden som benyttes for å tilbakelegge delstrekning 2 og 3. Hvis strekningshastigheten skal være lik på de to delstrekningene må ca. 40 % av reisetiden benyttes på delstrekning 2 og 60 % av reisetiden på delstrekning 3. Da det er forventet større forsinkelser på delstrekning 2 vil reisetiden for delstrekningene videre beregnes basert på et konstant reisetidsforhold på 45 % og 55 % for henholdsvis delstrekning 2 og 3. Fordelingen er ikke gjeldende i perioder der strekningshastigheten for hele analyseområdet er høyere enn 80 km/t.

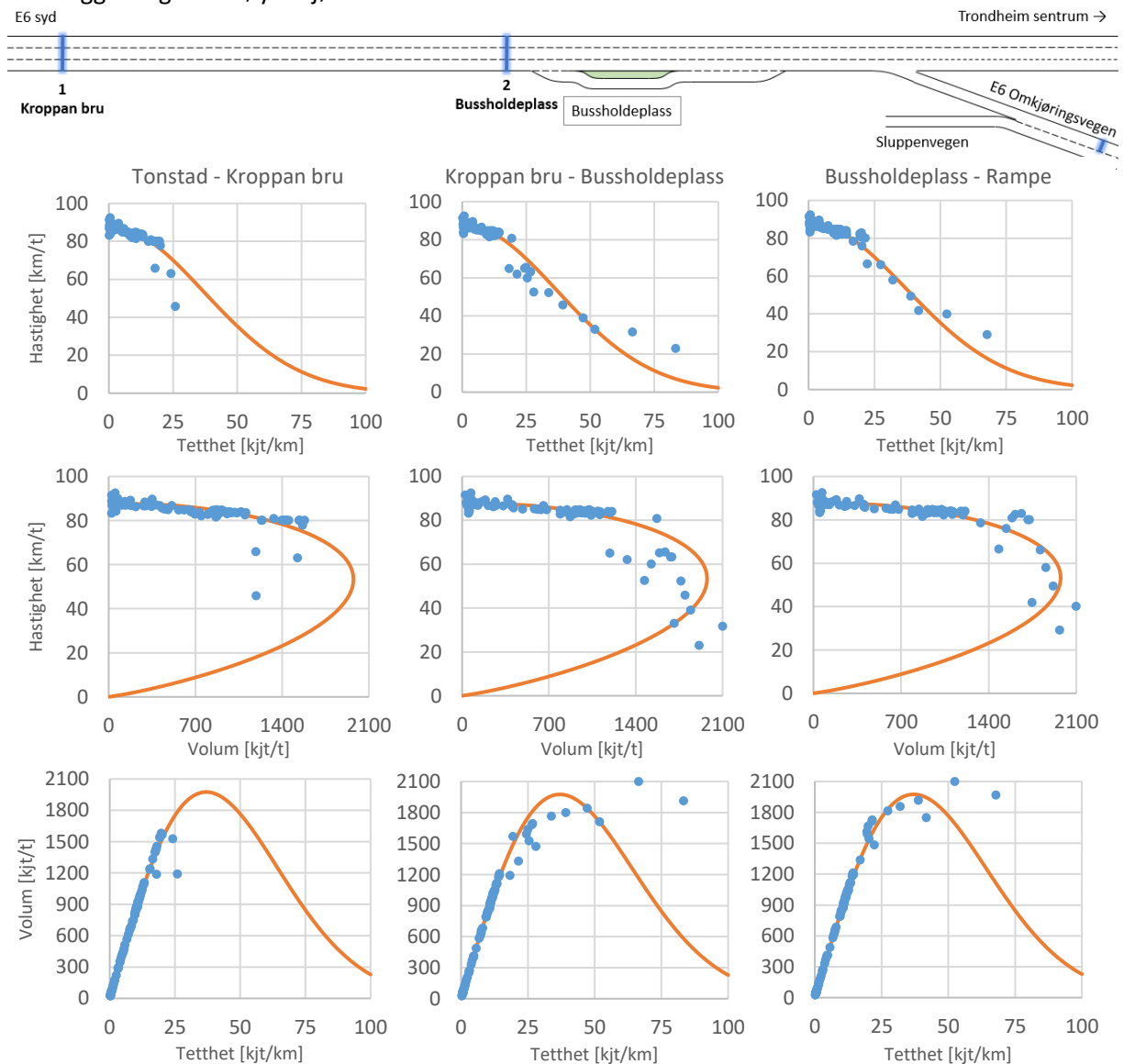
Tettheten beregnes ved bruk av forholdet mellom estimert volum og strekningshastighet gitt av gjennomsnittlig reisetid over strekningen. Estimaten ble videre grunnlaget for en fremstilling av volum, hastighet og tetthet over strekningen med de tilhørende sammenhengene gitt av Northwestern-modellen. De nødvendige trafikkarakteristikkene i Northwestern-modellen ble tilpasset datagrunnlaget gitt på 15-minuttersintervall. Følgelig ble den optimale tettheten endret fra 33 kjt/km til 37 kjt/km, sammenlignet med modellen tilpasset datagrunnlaget fra høyre kjørefelt. Tilsvarende ble hastigheten ved fri flyt endret fra 85 km/t til 88 km/t. Volum, hastighet og tetthet over strekningen med de tilhørende sammenhengene gitt av Northwestern-modellen er vist i figur 9-4 sammen med en illustrasjon av slutt punktet for de ulike delstrekningene.

Delstrekning 1 begynner på Tonstad med to kjørefelt, før kapasiteten utvides til tre kjørefelt etter ca. 1 km. Dette er med på å begrense det totale volumet som kan komme inn i systemet innenfor hvert tidsintervall. Da det er en skjevhet i fordelingen mellom kapasitet og trafikkstrømmer oppstår det likevel avviklingsproblemer i høyre kjørefelt i morgenrushet.

Tidligere er det vist at registreringene hentet fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru er plassert i overgangsfasen mellom den upåvirkede trafikkstrømmen og influensområdet til flaskehalsen, da innvirkningen av flaskehalsen ikke medfører langvarige avviklingsproblemer i dette punktet. Det er likevel kun gjennom de verste periodene av morgenrushet at influensområdet til flaskehalsen på Sluppen vil innvirke på trafikkavviklingen på delstrekning 1. Dette skyldes blant annet at delstrekning 1 er betydelig lengre enn de resterende delstrekningene, samt at det fremdeles er trafikk som skal til E6 Omkjøringsvegen som ikke ligger i høyre kjørefelt. Fra figuren ser man at det kun er tre punkter som avviker fra trenden i det resterende datasettet, der forventet hastigheten over delstrekningen blir tydelig redusert.

På delstrekning 2 viser figuren en tydelig reduksjon i hastighet med en korresponderende økning i tetthet. Dette kan ha en sammenheng med en større konsentrasjon av kjøretøy i høyre kjørefelt, samt sjokkbølger som forplanter seg i trafikken som en konsekvens av bussenes innvirkning på trafikkstrømmen ved inn- og utkjøring fra holdeplassen. Sammenlignet med delstrekning 1 er det betydelig mer trafikk gjennom morgenrushet som påvirkes av flaskehalsen på denne delstrekningen, der trafikken ligger mellom friflytsregimet og det overbelastede regimet. Videre forventes det derfor at det periodevis oppstår sammenbrudd i trafikken, noe som gjerne initieres av bussenes brytning av trafikkstrømmen. Delstrekningen vil på samme måte som i eksemplet til May representere strekningen med de største avviklingsproblemene.

På delstrekning 3 viser figuren at gjennomstrømningen nærmer seg kapasitetsgrensen, noe som innebærer at trafikkstrømmen nærmer seg den optimale verdien for hastighet og tetthet. Dette er forenelig med tilnærmingen til May, der han viser til at selve flaskehalsen vil ha en mer uniform fordeling av registreringer rundt kapasitetsgrensen. Videre viser dette til at strekningen preges av en oppløsningsfase som begynner i forkant og fortsetter gjennom avkjøringsrampen. Dette kan skyldes at trafikkstrømmen har passert influensområdet til bussholdeplassen, samt en reduksjon i antall kjøretøy som legger seg inn i høyre kjørefelt.



Figur 9-4: Sammenhengen mellom volum, hastighet og tetthet for de definerte delstrekningene, basert på estimater, illustrert sammen med sluttpunktene på de ulike delstrekningene. Punktene viser gjennomsnittlige kvartersverdier for et døgn og er fremstilt sammen med en tilpassing til trafikkstrømsmodellen Northwestern, presentert av Drake et al. (1967)

Oppstrøms for avkjøringsrampen er det ikke forventet større avviklingsproblemer, da avkjøringsrampen fletter sammen med påkjøringsrampen fra Sluppenvegen og fortsetter som to kjørefelt. Trafikken fra Sluppenvegen ligger langt under kapasitetsgrensen og vil trolig ikke ha større innvirkning på trafikken som skal av til Bratsbergvegen. Videre var det ønskelig å benytte tall fra trafikkregistreringsstasjonen på Sunnland for å underbygge påstanden om at det ikke oppstår avviklingsproblemer nedstrøms for rampene, men grunnet dårlige registreringer lot dette seg ikke gjøre. Denne strekningen ville korrespondert med delstrekning D gitt i eksemplet til May.

Ved å tilnærme eksemplet presentert av May til estimatene for analyseområdet på Sluppen kan det konkluderes med at avviklingsproblemene oppstår i forkant av den fysiske flaskehalsen. Da kollektivknutepunktet på Sluppen er plassert i området med de største avviklingsproblemene er det videre forventet at skillet mellom trafikkstrømmene for delstrekning 2 og 3 forskyves oppstrøms for den fysiske flaskehalsen. Dette medfører at strekningen mellom bussholdeplassen og avkjøringsrampen, som preges av en oppløsningsfase, vil være utsatt for forstyrrende elementer i form av blant annet kjøretøy som foretar sene feltskifter. Da trafikken i oppløsningsfasen karakteriseres med en økning i hastighet og reduksjon i tetthet, vil et forstyrrende element kunne gi større innvirkninger på oppløsningshastigheten. Trafikkavviklingen på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen vil følgelig være mindre stabil, da den fysiske og trafikale flaskehalsen er forskjøvet i forhold til hverandre. Nedstrøms for avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen vil det være tilgjengelig kapasitet som ikke utnyttes.

9.2 Sjokkbølgeanalyse

I forbindelse med flaskehalsproblematikken på Sluppen er det vanskelig å definere uforstyrrede homogene trafikkstrømmer med stor utstrekning, da det er mange forstyrrende elementer som skaper stadige endringer i avviklingen. Dette gjør det også vanskelig å benytte det typiske mønsteret for sjokkbølgeformasjoner ved flaskehalsen. For å illustrere sammenhengen mellom sjokkbølgedannelsen fra de ulike elementene som opptrer i forkant av den fysiske flaskehalsen på avkjøringsrampen er det laget et tid-avstandsdiagram der 3 homogene trafikksituasjoner er benyttet som en forenklet tilnærming til virkeligheten. Forenklingen gjør at det er mulig å betrakte hendelsesforløpet i et makroskopisk perspektiv.

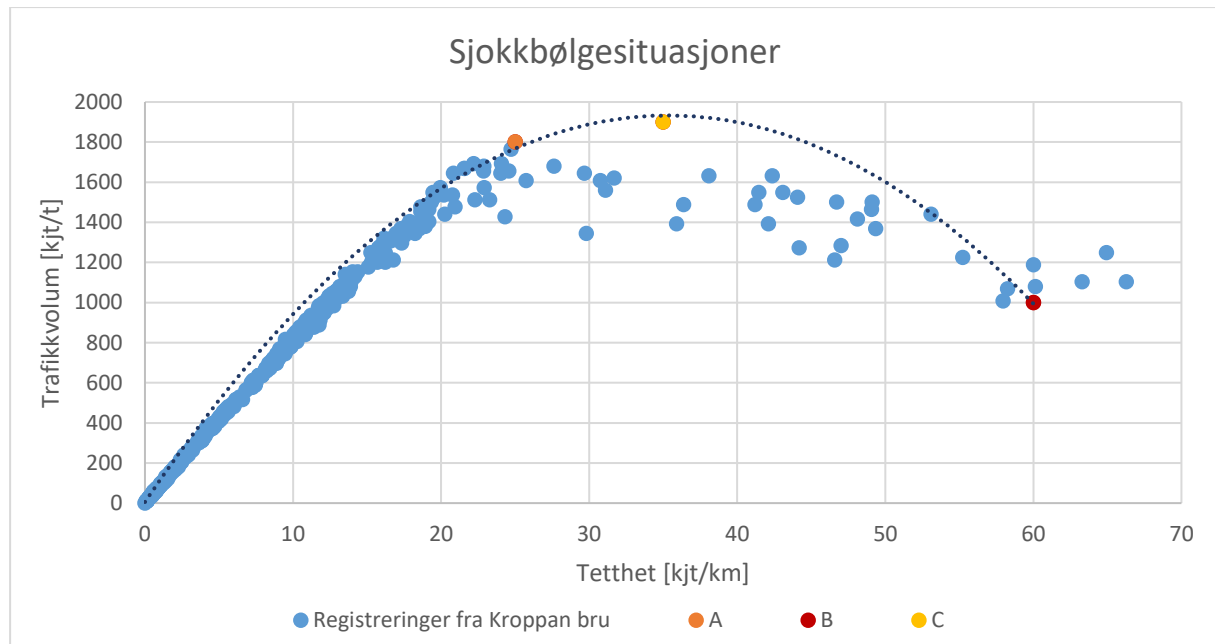
Verdiene for de 3 situasjonene er valgt med utgangspunkt i registreringene fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru, og er vist i figur 9-5. Som figuren viser, er de valgte verdiene for trafikkvolum noe høyere enn de registrerte verdiene for situasjon A og C. Dette har sammenheng med at trafikkregistreringsstasjonen er plassert på sørsiden av Kroppan bru. Siden snittet er så langt oppstrøms for problemområdet på Sluppen vil sjokkbølgeoppløsning kun oppstå bakfra. Oppløsningen skjer når etterspørselen reduseres til et nivå som er lavere enn kapasiteten. Det vil dermed ikke være mulig å observere en oppløsningssituasjon med høyt trafikkvolum med korresponderende optimal tetthet og hastighet for maksimal gjennomstrømning.

Med bakgrunn i dette er situasjon A satt til en belastet situasjon i friflytregimet, karakterisert av høyt trafikkvolum og høy hastighet. Situasjonen er plassert i den øvre delen av området med registreringer fra Kroppan bru med tilsvarende høy belastning og hastighet. Dette gjør at situasjonen har et trafikkvolum rett i overkant av den maksimale registrerte gjennomstrømningen uten sammenbrudd i trafikken på Kroppan bru.

Situasjon B representerer køsituasjonen med høy tetthet og lav hastighet, noe som gir et korresponderende lavt trafikkvolum. Situasjonen er plassert i samme området som registreringene fra sammenbruddstilfellet på Kroppan bru.

Situasjon C er oppløsnings situasjonen, og karakteriseres av optimal tetthet og hastighet. Trafikkvolumet er satt i samme størrelsesorden som det registrerte trafikkvolumet på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Gjennom en Greenshield-tilnærming til de tre punktene vil situasjon C utgjøre toppunktet.

De tre situasjonene er illustrert sammen med registreringene fra høyre kjørefelt på Kroppan bru og Greenshield-tilnærmingen til de tre punktene.



Figur 9-5: Illustrasjon av de 3 valgte situasjonene sammen med trafikkregistreringene fra Kroppan bru på 5 minuttersintervall og Greenshield-tilnærmingen til de 3 punktene.

Siden de 3 situasjonene er fiktive situasjoner som ikke er direkte registrert eller observert, er trafikkvolum og tetthet satt til runde verdier. Hastigheten er deretter gitt etter sammenhengen:

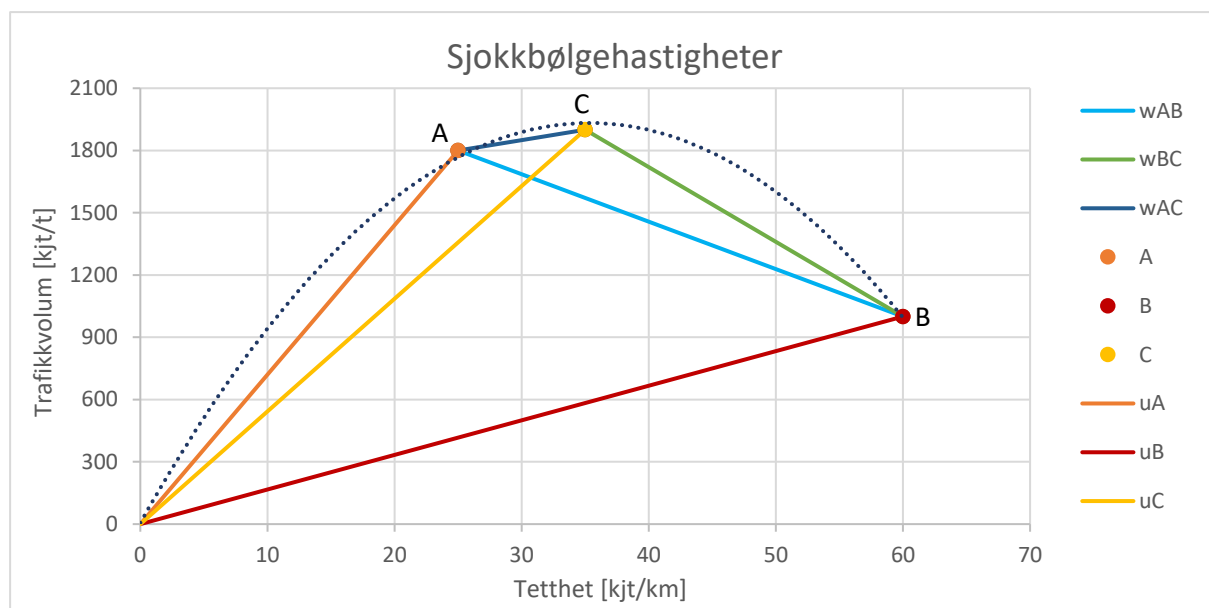
$$u = \frac{q}{k}$$

En oversikt over verdiene for trafikkvolum, hastighet og tetthet knyttet til hver av de 3 situasjonene er videre vist i tabell 9-2.

Tabell 9-2: Oversikt over trafikkvolum, hastighet og tetthet for hver av de 3 situasjonene.

Situasjon	q [kjt/t]	u [km/t]	k [kjt/km]
A	1800	72,00	25
B	1000	16,67	60
C	1900	54,29	35

For å kunne benytte de 3 situasjonen videre i en sjokkbølgeanalyse og et tid-avstands-diagram er det nødvendig å kjenne til sjokkbølgehastighetene. Disse er illustrert i figur 9-6 sammen med trafikkvolum, hastighet og tetthet for hver av situasjonene. Størrelsen på sjokkbølgehastigheten er også gitt i figur 9-6.



Figur 9-6: Illustrasjon av trafikkvolum, hastighet, tetthet og sjokkbølgehastighet for hver av de 3 situasjonene.

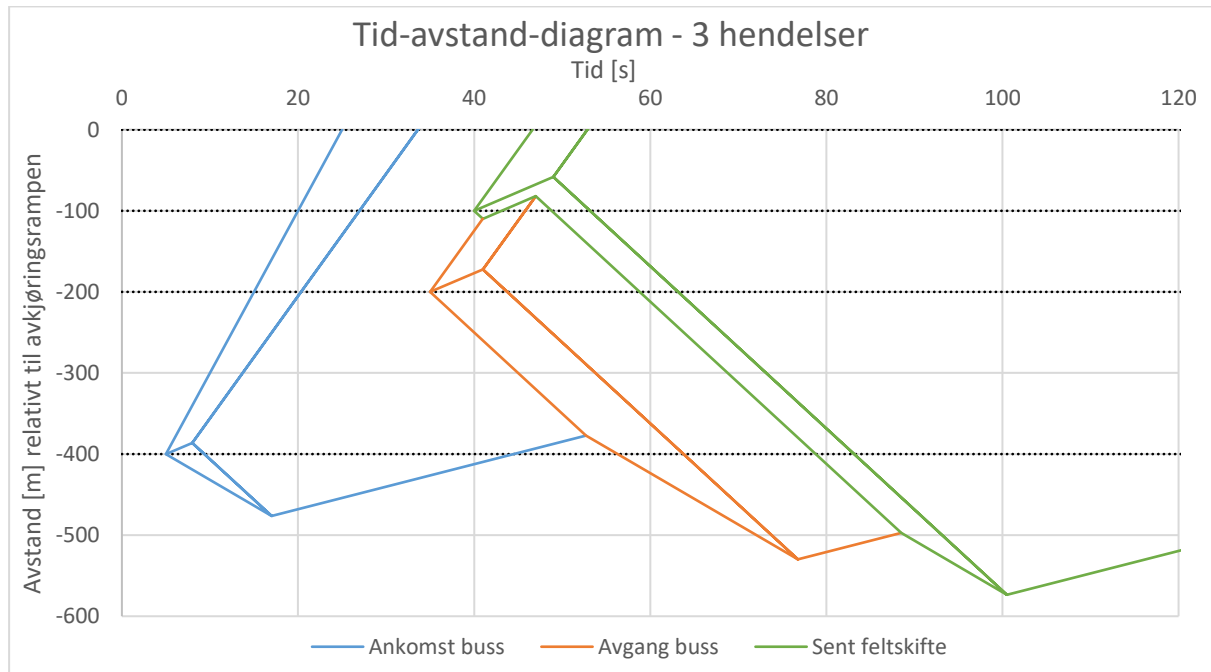
Tabell 9-3: Sjokkbølgehastigheter mellom de 3 ulike situasjonene.

	Fra	Til	Sjokkbølgehastighet [km/t]
wAB	A	B	-22,86
	B	A	
wBC	B	C	-36,00
	C	B	
wAC	A	C	10,00
	C	A	

Oppstrøms for flaskehalsen på Sluppen er det flere elementer som er med på å danne sjokkbølger. Ved å lage et tid-avstand-diagram som inkluderer elementene fra situasjon 2 – sene feltskifter, situasjon 3 - bussavgang og situasjon 4 – bussankomst, vil sammenhengen mellom disse og hvordan de påvirker hverandre kunne illustreres. For illustrasjonen videre er følgende forutsetninger lagt til grunn:

- Den uberørte situasjonen før noen hendelser har oppstått er situasjon A med tett trafikk og høy hastighet.
- Etter 5 sekunder ankommer det en buss ved innkjøringen til bussholdeplassen (situasjon 4).
- De manuelle videoregistreringene viser at bussene i snitt bruker 30 sekunder mellom inn- og utkjøring fra bussholdeplassen. Dette er lagt til grunn for antagelsen om at bussen kjører ut fra bussholdeplassen (situasjon 3) 30 sekunder etter ankomst (situasjon 4)
- Etter 40 sekunder velger et kjøretøy å tvinge seg inn i høyre kjørefelt (situasjon 2)
- Hver hendelse vil påvirke trafikken oppstrøms ved å redusere hastigheten ned til u_B i en gitt tid, før køen kan begynne å løses opp og gå over i situasjon C. Når bussen ankommer reduseres hastigheten i 3 sekunder, ved bussavgang reduseres hastigheten i 6 sekunder og ved sene feltskifter reduseres hastigheten i 9 sekunder.
- Lokasjonen for situasjon 2, 3 og 4 er henholdsvis 100, 200 og 400 meter før avkjøringsrampen på Sluppen.

Basert på forutsetningene over og de 3 definerte situasjonene A, B og C er tid-avstand-diagrammet i figur 9-7 konstruert. Diagrammet viser hvordan køen vokser bakover for hver hendelse som inntreffer. Da det ikke er nok tid til å oppnå situasjon A mellom hver hendelse, vil etterkommende hendelser inntreffe i trafikk som er i oppløsningssituasjonen fra forrige sjokkbølge (situasjon C). Sjokkbølgehastigheten som beskriver køens utbredelse vil dermed være w_{BC} i stedet for w_{AB} som det var for første hendelse. Da trafikkvolumet i situasjon C er høyere enn i situasjon A, vil køen vokse fortere bakover i situasjon C. I det oppløsningen av situasjon C fra hendelsen før møter køen som bygger seg bakover vil sjokkbølgehastigheten til kjøppbyggingen endres til w_{AB} , og utbredelsen vil skje med en lavere hastighet frem til køen blir løst opp.



Figur 9-7: Tid-avstand-diagram for 3 situasjoner i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen, med ulik lokasjon og grad av påvirkning.

Ettersom hendelsesforløpet er forenklet til 3 trafikk situasjoner, vil sjokkbølgehastigheten for dannelse og oppløsning av kø være den samme, såfremt køen dannes i en oppløsningssituasjon. Dette gjør at køen etter en inntruffet hendelse aldri løses opp før situasjon oppstrøms er løst opp. Området som påvirkes av hendelsene, enten i form av kø eller oppløsning, vil dermed vokse for hver hendelse som inntreffer. Her er det to unntak som vil bli presentert senere. Diagrammet i figur 9-7 viser at etter påvirkningen fra de 3 hendelser i den forenklete situasjonen er trafikk 573 meter oppstrøms for avkjøringsrampen berørt.

Tomrommene i forkant av oppløsningskjøretøy er som tidligere nevnt kun teoretiske. I virkeligheten vil tomrommene fylles av kjøretøy i oppløsningssituasjonen så fort denne starter. De første kjøretøyene velger da en høyere hastighet enn oppløsningssituasjonen skulle tilsi, siden ingen kjøretøy nedstrøms skaper begrensninger, og tilpasser seg gradvis trafikken i situasjonen foran. Tomrommene blir også benyttet til for eksempel sene feltskifter fra midtre til høyre kjørefelt (situasjon 2). Denne typen feltskifte vil i liten grad påvirke oppstrøms trafikk, og det blir ingen konsekvenser med mindre oppstrøms trafikk tar igjen hendelseskjøretøyet og må tilpasse seg.

Omfanget av kødannelsen blir også redusert når et tomrom møter sjokkbølgen som representerer kødannelsen etter en hendelse. Tomrommet gjør at det ikke ankommer kjøretøy som kan være med å bygge videre på køen. Dette gjør at dannelsen av køen stopper opp frem til kjøretøy fra oppløsningssituasjonen oppstrøms for tomrommet møter køen, og danner en ny sjokkbølge. I

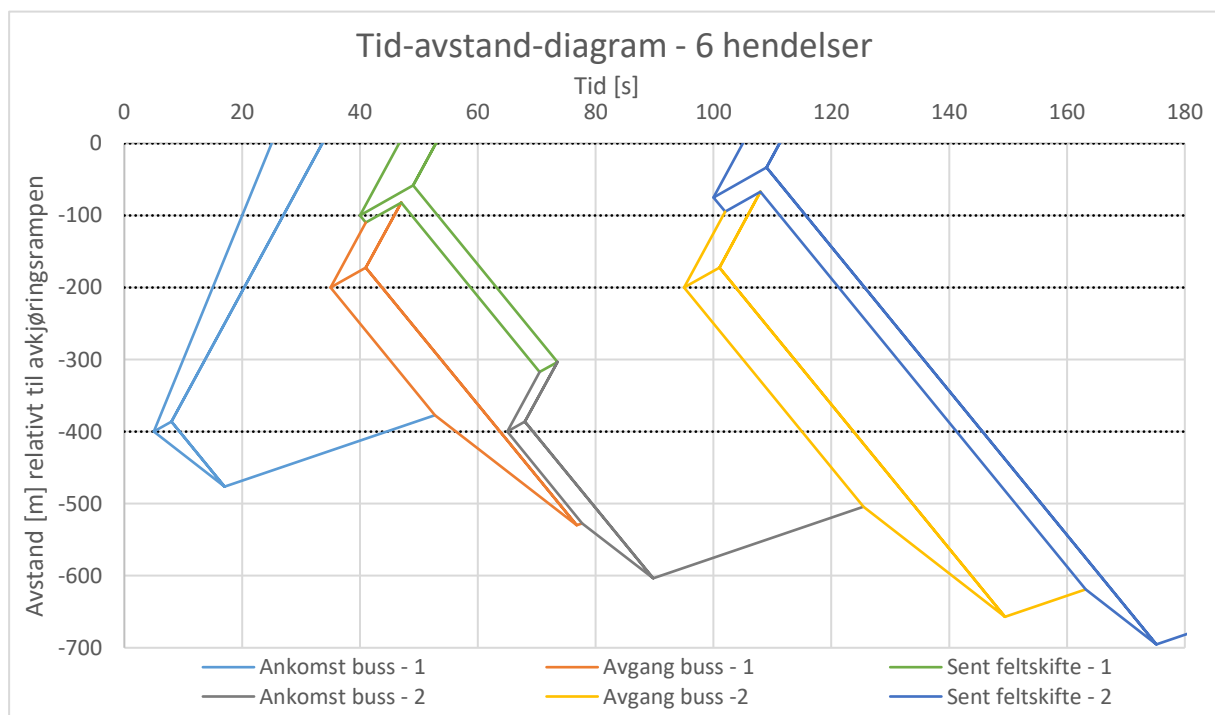
perioden uten volumtilskudd vil køens posisjon forskyves med køens hastighet, da alle kjøretøyene til enhver tid er i bevegelse.

Ettersom hendelsene på Sluppen typisk inntreffer mellom 100 og 400 meter før avkjøringsrampen vil selve rampen være lite preget av køsituasjoner, med mindre det oppstår en hendelse på selve rampen. Trafikken på avkjøringsrampen vil derimot være preget av oppløsningssituasjoner med høye trafikkvolum. Dette er med på å opprettholde en optimalisert gjennomstrømning i selve flaskehalsen.

I virkeligheten vil hendelsene i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen gjenta seg over tid, og tid-avstand-diagrammet vil kunne utvides til å inkludere flere repetisjoner av hver hendelse. For å illustrere innvirkningen de ulike hendelsene har på hverandre er det konstruert et tid-avstand-diagram med 2 repetisjoner av hver hendelse etter følgende kriterier:

- Bussene ankommer med 60 sekunder mellom. Dette er basert på gjennomsnittlig tid mellom bussankomstene i det høyest belastede kvarteret i rushtrafikken, hentet fra de manuelle videoregistreringene.
- 60 sekunder mellom kjøretøy som foretar sene feltskifter som påvirker omkringliggende trafikk. De manuelle videoregistreringene viser at det i det høyest belastede kvarteret i rushtiden gjennomføres ca. 2 sene feltskifter i minuttet. Det er anslått at ca. halvparten av disse gir ringvirkninger for oppstrøms trafikk, og dette er lagt til grunn for diagrammet.
- Lokasjonen for situasjon 3 og 4 er antatt å være tilnærmet konstant over tid, da det er utformingen av vegnettet som gir føringer for hvor hendelsene oppstår. For situasjon 2 vil lokasjonen variere i større grad. På bakgrunn av dette er det antatt at situasjonen oppstår 75 m før avkjøringsrampen andre gang den oppstår.

Med grunnlag i antakelsene er det konstruert et tid-avstand-diagram for 6 hendelser, vist i figur 9-8. Ettersom det kun er benyttet 3 situasjoner gir en hendelse som oppstår i en eksisterende køsituasjon liten effekt, da køsituasjonen ikke har mulighet til å bli forverret. Med antakelsene gitt over ble det ingen slike former for overlapp, men i virkeligheten vil denne formen for hendelse også oppstå.

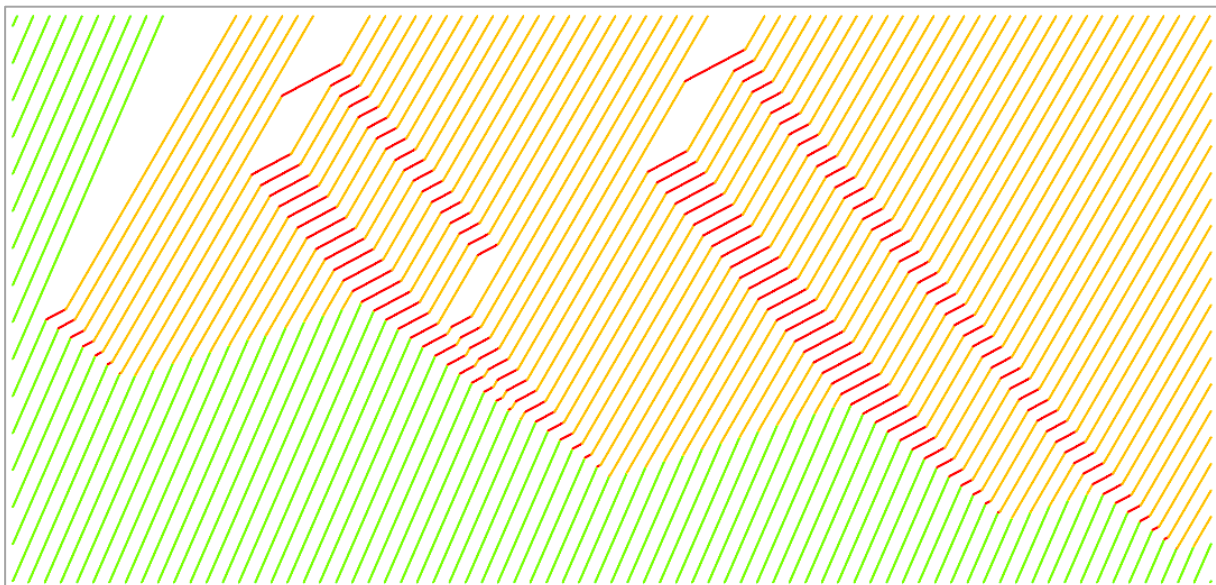


Figur 9-8: Tid-avstand-diagram for 6 situasjoner i forkant av avkjøringsrampen på Sluppen, med ulike lokasjon og grad av påvirkning.

Tid-avstand-diagrammet for 6 hendelser viser derimot et av unntakene som gjør at køen etter en hendelse kan løses opp før situasjonen oppstrøms er løst opp. Dette skjer med køen dannet etter første sene feltskifte, der køsituasjonen møter et tomrom som hindrer køen i å bygge seg videre bakover. Her løses køen opp i det situasjon C fra bussankomsten til buss nr. 2 tar igjen køen. Køen blir altså løst opp bakfra grunnet redusert volumtilskudd. Det andre unntaket hadde oppstått hvis tomrommet etter ankomsten til buss nr. 2 hadde vært større. Køen ville da blitt løst opp mens tomrommet ville fortsatt videre med noe redusert utstrekning.

Etter 6 hendelser i den forenklede trafikksituasjonen strekker den påvirkede trafikken seg 695 m oppstrøms for avkjøringsrampen på det verste tidspunktet, under 3 minutter etter første hendelse. I virkeligheten tilsvarer dette litt mer enn halvveis over Kroppan bru. Om dette hadde vært realiteten ville køutstrekningen etter en rush-periode vært urealistisk lang. Den store utstrekningen skyldes i all hovedsak forenklingen til 3 situasjoner, og diagrammene er grunnet dette kun ment som illustrasjoner på hvordan de ulike hendelsene samlet kan påvirke trafikkavviklingen.

Med grunnlag i tid-avstand-diagrammene kan hvert enkelt kjøretøys bevegelser gjennom området illustreres. På denne måten kan graden av påvirkning fra de ulike hendelsene tydeliggjøres. Dette er vist i figur 9-9, der kjøretøyene er illustrert med en tidsluke på 2,2 sekunder.



Figur 9-9: Illustrasjon av enkeltkjøretøys bevegelser gjennom området på Sluppen, og hvordan de blir påvirket av hendelsene i forkant av avkjøringsrampen. Diagrammet har tilsvarende akser som tid-avstandsdiagrammet, med tid bortover og posisjon oppover. Helningen på linjene indikerer kjøretøyet's hastighet, og dermed hvilken situasjon de er i. Dette er tydeliggjort gjennom farger der situasjon A er grønn, situasjon B er rød og situasjon C er oransje.

Hver linje i diagrammet representerer bevegelsene til ett kjøretøy. Diagrammet viser på den måten hvordan flere kjøretøyene blir påvirket, og havner i situasjon B flere ganger over strekningen oppstrøms for avkjøringsrampen. Over tid er det likevel situasjon C som dominerer, og tiden hvert enkelt kjøretøy tilbringer i kø (situasjon B) er veldig begrenset. Ved å se på fordelingen langs en horisontal linje gjennom diagrammet kan øyeblikksbilder over strekningen hentes ut. Øyeblikksbildene viser at køen (situasjon B) aldri involverer mer enn 5 kjøretøy om gangen, men ettersom den bygges og løses opp med samme hastighet vil køens posisjon forskyves kontinuerlig, og berørte arealer vil bli store over tid.

Figuren viser også hvordan tomrom dannes, vokser og teoretisk sett aldri fylles opp av kjøretøy. Forskjellen mellom den teoretiske situasjonen og den virkelige situasjonen er den samme som beskrevet tidligere.

Ettersom sjokkbølgetilnærmingen er en makroskopisk tilnærming vil trafikken som er beskrevet egentlig kun bestå av homogene trafikkstrømmer, uten informasjon om enkeltkjøretøy. Strømmene kan sees på som en væskestrøm i et rør uten forgreninger, som hverken kan fylles på eller tømmes. På bakgrunn av dette kan ingen kjøretøy fjernes eller inkluderes i strømmen for å skape en hendelse. Diagrammet i figuren over kan dermed ikke inkludere de faktiske hendesekjøretøyene fra situasjonen på Sluppen, da alle tre hendelsene forårsakes av et kjøretøy som kommer utenfra eller forlater trafikkstrømmen rett etter påvirkningen.

Selv om det er flere betydelige forskjeller mellom den teoretiske beskrivelsen og virkeligheten gir sjokkbølgeanalysen et godt innblikk i hvordan de ulike hendelsene i trafikken kan forplante seg i trafikkbildet og videre innvirke på andre hendelser. Ved å bruke den makroskopiske tilnærmingen til å beskrive et problem på mikronivå kommer de overordnede trekkene tydeligere frem, og det gir et oversiktlig bilde på situasjonens helhet og kompleksitet ved å se samlet på de ulike delhendelsene. Det er likevel viktig å ha kjennskap til modellens teoretiske begrensninger for at situasjonen skal tolkes så nær de virkelige hendelsene som mulig. For å analysere systemet i sin helhet på et mikronivå vil det være behov for å benytte seg av et simuleringsverktøy. Det vil også være mulig å dele opp systemet i enkelthendelser for å analysere dem videre individuelt, men dette ville fjernet faktoren der de ulike hendelsene innvirker på hverandre.

10 Forklaring

Gjennom beskrivelsen i kapittel 5 ble det avdekket fem ulike situasjoner som i ulike grad forstyrrer trafikkstrømmen i området rundt den fysiske flaskehalsen. Da analysene har foregått på et makroskopisk detaljnivå vil det ikke være mulig å knytte tall direkte til innvirkningen fra hvert kjøretøy eller hver situasjon, men basert på de avviklingsproblemene som er kartlagt for hele analyseområdet vil det være mulig å knytte den samlede effekten opp mot hendelsene i området. Dette gir et bilde på innvirkningen av den fysiske flaskehalsen og de fem situasjonene samlet.

Basert på de observerte situasjonene og analysene er det klart at avviklingsproblematikken i morgenerushet initieres av den fysiske flaskehalsen. Uten denne ville det ikke vært grunnlag for like stor konsentrasjon av trafikk i høyre kjørefelt oppstrøms for avkjøringsrampen, og dermed heller ikke for problematikken knyttet til flere av situasjonene. Men når den tette trafikkstrømmen først oppstår vil de fem situasjonene påvirke den allerede belastede situasjonen i større eller mindre grad. Sjokkbølgeeffekten dette skaper vil igjen påvirke dannelsen og oppløsningen av andre sjokkbølger, og den samlede effekten vil være større enn hver av situasjonene isolert sett. Dette er blant annet illustrert gjennom sjokkbølgeanalysen i kapittel 9.2.

Observasjoner og analyser viste at situasjon 1 kun har korte perioder med innvirkning, da det er et begrenset antall kjøretøy som har problemer med å akselerere oppover avkjøringsrampen. Avviklingskvaliteten oppstrøms vil avgjøre graden av innvirkning, der forstyrrelser i oppløsnings-situasjonen kan redusere hastigheten betydelig. Ved lavere tetthet i trafikkstrømmen vil effekten av situasjon 1 reduseres. Den verste varianten av situasjon 1 oppstår sjelden, da det krever at kjøretøyet med akselerasjonsutfordringer kommer i lav hastighet på avkjøringsrampen samtidig som en gruppering fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen hindrer det i å skifte kjørefelt. Den midlertidige flaskehalsdannelsen vil dermed ha liten betydning i det store bildet selv om den i perioder reduserer gjennomstrømningen i den fysiske flaskehalsen.

Ved høye trafikkvolum på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen vil andelen sene feltskifter være stor. Samtidig vil store andeler føre til forstyrrelser i trafikkstrømmen som begrenser trafikkvolumet. Dette gjør at situasjon 2 har en selvbegrensende effekt når etterspørselen nærmer seg kapasiteten, samtidig som innvirkningen er størst like før kapasiteten er nådd. Da midlertidige trafikale kapasitetsbegrensninger oppstrøms etterlater seg luker i trafikkstrømmen vil dette sørge for at trafikkvolumet i hendelsesområdet til situasjon 2 vil ligge like under kapasitetsgrensen for ett kjørefelt. Samtidig vil lukene i trafikkstrømmen kunne benyttes til sene feltskifter. Dette gjør at innvirkningen på

trafikkavviklingen også kan være positiv, da situasjonen er med på å optimalisere trafikkvolumet gjennom den fysiske flaskehalsen.

Den største innvirkningen på trafikkstrømmen kommer fra situasjon 3 ved avgang fra bussholdeplassen. Ettersom den praktiserende vikepliktsituasjonen prioriterer bussene ut fra holdeplassen vil trafikkstrømmen kunne stoppes i lengre tid. Når flere busser har avgang samtidig blir effekten forsterket, og sjokkbølgedannelsen forverret. Det at fåtallet av bussene fortsetter på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen gjør at det etterlates store hull i trafikkstrømmen, med få muligheter for å tette dem før den fysiske flaskehalsen. Da situasjonen oppstår regelmessig vil den samlede effekten gjennom morgenrushet ha en vesentlig innvirkning på avviklingen. Situasjon 3 skaper dermed en dominerende midlertidig flaskehals ca. 200 m oppstrøms for avkjøringsrampen

Situasjon 4 ble dårlig dekket i datainnsamlingen, men observasjoner viste at innvirkningen var liten da varigheten var relativt kort. Ved lave hastigheter ble luken fort tettet selv om hendelseskjøretøyet skulle komme fra midtre kjørefelt. Ved høye hastigheter vil det være lite aktuelt å komme fra midtre kjørefelt for å bryte trafikkstrømmen i høyre kjørefelt, og tomrommet etter hendelseskjøretøyet vil ha liten innvirkning.

Situasjon 5 ble også dårlig dekket i datainnsamlingen, men gjennom estimatene som ble benyttet i anvendelsen av trafikkstrømsmodellene kom det frem at antallet kjøretøy som gjennomførte feltskifter til høyre kjørefelt på Kroppan bru var relativt høyt. Forstyrrelsen er likevel ansett som liten, da kjøretøyene i stor grad metter trafikkstrømmen og i liten grad reduserte kapasiteten.

Hadde datainnsamlingen vært detaljert nok til at situasjonene kunne vært analysert på et mikroskopisk detaljnivå ville det fremdeles ikke vært mulig å skille effektene helt fra hverandre, da situasjonene vil være avhengig av hverandre og ikke nødvendigvis oppstå alene. Det er likevel mulig å undersøke effekten av enkelthendelsene ved å gjenskape dem i en simuleringsmodell. Dette vil bli gjort i Del B, med fokus på å gjenskape de fem situasjonene sammen med den fysiske flaskehalsen.

Del B: Modellere

11 Aimsun

For å gjennomføre en trafikksimulering av caseområdet er trafikkmotelleringsverktøyet Aimsun valgt. Programmet er utviklet av Transport Simulation Systems, og kan benyttes i analyser av alt fra små kryss til store byområder. Aimsun ble i utgangspunktet utviklet som et mikrosimuleringsverktøy, men støtter i dag også bruken av makro- og hybridmodeller. Programvaren har en stor grad av fleksibilitet som tillater brukeren å gjenskape virkelige forhold i transportnettet til et ønsket detaljnivå, både i henhold til infrastruktur og etterspørsel ved ulike kjøretøysklasser og tidspunkt.

Gjennom analysen av caseområdet vil Aimsun kun bli benyttet som et mikrosimuleringsverktøy, og bare et fåtall av de tilgjengelige funksjonene vil være aktuelle. Videre presenteres muligheter ved oppbyggingen av modellen sammen med en mer detaljert gjennomgang av aktuelle delmodeller.

11.1 Oppbygging av en modell

En simuleringsmodell består av et fysisk nettverk som blir tilegnet kjøretøy gjennom trafikkdata. Det fysiske nettverket består av de tre komponentene lenker, noder og sentroider. Lenkene er vegstrekninger som bindes sammen ved hjelp av noder for å muliggjøre forgreninger. Sentroidene definerer tilførsel og tiltrekning av kjøretøy på start/slutt-lenkene.

Som grunnlag for oppbyggingen av det fysiske nettverket kan kartutsnitt fra Open Street Map (OSM) benyttes. Import av ønsket kartutsnitt fra OSM er en lett tilgjengelig funksjon ved opprettelsen av et nytt prosjekt i Aimsun. Videre foreligger det flere alternativer for hvordan programmet håndterer det importerte kartet. Det er mulig å importere kartet med vegene som et ferdig nettverk eller bare som dekorasjon, men vegnettet kan også utelates i sin helhet. Ved å importere vegnettet som et nettverk vil det kunne forekomme flere feil i oppbyggingen, men ved å importere vegnettet som en dekorasjon kan det nye nettverket bygges med utgangspunkt i de illustrerte veglinjene.

Etter at det fysiske nettverket er konstruert vil det være nødvendig å tilføre inngangsdata, i tillegg til justeringer og tilpasninger av parametere for at modellen skal gi en korrekt representasjon av de faktiske forholdene. Det er også mulig å spesifisere ønsket visualisering og detaljeringsgrad på utgangsdataene.

Inngangsdataene i modellen baserer seg på virkelige datainnsamlinger og er i hovedsak knyttet opp mot trafikkstrømmer, kjøretøysklasser og kollektivlinjer. Etter at de ønskede sentroidene er plassert ut i nettverket kan man tilføre ønskede trafikkstrømmer, definert ved bruk av OD-matriser eller OD-

routes. Ved bruk av OD-matrisene fordeles trafikkstrømmer i nettverket basert på korteste avstand mellom start- og målsentroiden. Hvis fordelingen i nettverket ønskes mer spesifisert kan OD-routes benyttes, der de ønskede kjørerutene angis, samt andelen av trafikantene som benytter de ulike rutene. Ønsket fordelingen av trafikkvolumene over simuleringsperioden bestemmes gjennom *Global Arrival*.

Kollektivlinjer som legges inn i modellen fungerer på samme vis som OD-routes ved at en spesifikk rute i nettverket defineres. Videre vil kollektivtransporten ha ulike stoppesteder på ruten, der frekvens og oppholdstid kan defineres på ulike måter. All trafikkdata som legges inn i modellen tilegnes definerte kjøretøysklasser, starttidspunkt og varigheter.

Etter at modellen er tilført trafikkdata vil det være aktuelt å foreta tilpasninger av parametere for å oppnå ønsket handlingsmønster og oppførsel. På et overordnet nivå kan disse tilpasningene deles inn i endringer av lokale og globale parametere. Globale parametere er forhold som er satt til å gjelde for hele modellen. Dette kan blant annet omfatte reaksjonstid, samt infrastruktur- og kjøretøyspesifikke parametere. Lokale parametere knyttes til spesifikke endringer i noder eller lenker i nettverket. I noder kan det for eksempel være aktuelt å bestemme hvilke kjørerregler som skal være gjeldende, for eksempel ved bruk av vikepliktsregulering. Videre er det mulig å endre på trafikantadferden ved å lage lokale variasjoner av blant annet reaksjonstid, ønsket sikkerhetsmargin, siktsoner og ønsket plassering i forhold til kjøretøyets endelige destinasjon. Lenkespesifikke endringer kan omfatte endringer av vegens oppbygging gjennom tildeling av spesialfelt og implementering av stigningsforhold, samt lokale adferdsendringer gjennom variasjoner av blant annet samarbeidsvilje, aggressivitet og akselerasjonsfaktorer.

11.2 Aktuelle delmodeller

I en mikrosimuleringsmodell vil hvert kjøretøys handlingsmønster avgjøres gjennom programmets adferdsmodeller: *Car-Following* og *Lane-Changing*. Simuleringen blir delt opp i små tidsintervaller kalt *Simulation Steps*, og for hvert tidsintervall blir posisjonen, hastigheten og adferden til hvert enkelt kjøretøy oppdatert. Anbefalt størrelse for *Simulation Steps* er mellom 0,1 og 1,5 sekunder (Transport Simulation Systems, 2017).

I modellen vil hvert enkelt kjøretøy strebe etter å oppnå ønsket hastighet på hver lenke, men omgivelsene vil legge begrensninger og føringer for kjøreadferden. Aktuelle delmodeller som har innvirkning på kjøretøyenes handlingsmønster er *Car-Following Model*, *Two-Lane Car-Following Model*, *Lane Change Model* og *Give Way Model*. Videre vil utvalgte parametere i de ulike delmodellene presenteres. Alle beskrivelsene bygger på Aimsun 8.2 brukermanual (Transport Simulation Systems, 2017) der ikke annet er presentert.

11.2.1 Car-Following Model

Som grunnlag for *Car-Following* modellen opererer Aimsun med tre ulike globale reaksjonstidsparametere. Den første reaksjonstidsparameteren er *Reaction Time*, som er den normale reaksjonstiden (Δt) benyttet i modellen generelt. Den andre reaksjonstidsparameteren er *Reaction Time At Stop*, som benyttes når kjøretøy skal reagere fra stoppet tilstand. Et stoppet kjøretøy i Aimsun tilsvarer et kjøretøy i kø, og rammene for når et kjøretøy entrer og kjører ut av køen defineres gjennom parameterne *Queue Entry Speed* og *Queue Exit Speed*. I det et kjøretøy reduserer hastigheten til under *Queue Entry Speed* vil det regnes som stoppet. Tilsvarende vil kjøretøyet forlate køen når hastigheten igjen overstiger *Queue Exit Speed*. Den siste reaksjonstidsparameteren er *Reaction Time At Traffic Light*, som benyttes som reaksjonstid for første kjøretøy i køen når et trafikkllys endres fra rødt til grønt.

De ulike reaksjonstidsparameterne kan oppgis som enten *Fixed Reaction Time* eller som *Variable Reaction Time*. Hvis reaksjonstiden oppgis som *Fixed Reaction Time* vil den normale reaksjonstiden settes lik *Simulation Step*. De to resterende reaksjonstidene spesifiseres hver for seg, men alle tre vil være konstante og gjelde for alle kjøretøytyper. Ved *Variable Reaction Time* vil reaksjonstidene kunne spesifiseres som et multiplum av *Simulation Step*. Samtidig kan alle parameterne oppgis som en diskret sannsynlighetsfordeling for hver kjøretøytype.

Car-Following modellen i Aimsun er basert på og videreutviklet fra *Gipps Car-Following Model* (Gipps, 1981, Gipps, 1986b). I tillegg til de globale parameterne inkluderer modellen lokale parametere som avhenger av strekningens geometri, sjåførtype og påvirkningen fra kjøretøy i tilstøtende kjørefelt. Modellen er delt i to, og ved å representere hastigheten fra hver del med henholdsvis V_a og V_b vil hastigheten for kjøretøy n i tidsintervallet $t+\Delta t$ kunne uttrykkes som:

$$V(n, t + \Delta t) = \min(V_a(n, t + \Delta t), V_b(n, t + \Delta t))$$

V_a er den maksimale hastigheten et kjøretøy kan akselerere til basert på kjøretøyets ønske om å oppnå ønsket hastighet på strekningen. Den ønskede hastigheten tar utgangspunkt i fartsgrensen på den aktuelle lenken og kjøretøys aksept av denne, definert gjennom en akseptfaktor, kombinert med en maksimumsgrense. Den ønskede hastigheten (V_{des}) for kjøretøy n på strekning s blir dermed:

$$V_{des}(n, s) = \text{Min}(V_{lim}(s) \cdot \theta(n), V_{max}(n))$$

Hvor:

- $V_{lim}(s)$ fartsgrensen på strekningen s
- $\theta(n)$ aksept av fartsgrense for kjøretøy n
- $V_{max}(n)$ maksimal ønsket hastighet for kjøretøy n

Med grunnlag i dette er V_a definert som den maksimale hastigheten et kjøretøy n kan akselerere til i tidsintervallet $t+\Delta t$, gitt ved:

$$V_a(n, t + \Delta t) = V(n, t) + 2,5 a(n) \Delta t \left(1 - \frac{V(n, t)}{V_{max}(n)}\right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V_{max}(n)}}$$

Der:

- $V(n, t)$ hastigheten til kjøretøy n i tiden t
- $a(n)$ maksimal akselerasjon for kjøretøy n

V_b er den maksimale hastigheten et kjøretøy kan nå uten å bryte begrensningene gitt av foranliggende kjøretøy ($n-1$). Den maksimale hastigheten et kjøretøy n vil kunne oppnå i tidsintervallet $t+\Delta t$ vil dermed kunne uttrykkes:

$$V_b(n, t + \Delta t) = d(n)\Delta t + \sqrt{d(n)^2\Delta t^2 - d(n) \left[2(x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)) - V(n, t)\Delta t - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)}\right]}$$

Der:

- $d(n)$ den maksimale ønskede retardasjonen til kjøretøy n , $d(n) < 0$
- $x(n, t)$ posisjonen til kjøretøy n ved tiden t
- $x(n-1, t)$ posisjonen til foranliggende kjøretøy ($n-1$) ved tiden t
- $s(n-1)$ den effektive lengden av det foranliggende kjøretøyet ($n-1$)
- $d'(n-1)$ et estimat av ønsket akselerasjon for det foranliggende kjøretøyet ($n-1$)
- $V(n-1, t)$ hastigheten til foranliggende kjøretøy ($n-1$) i tiden t

Estimatet på ønsket akselerasjon for det foranliggende kjøretøyet baserer seg på den kjøretøyspesifikke parameteren *Sensitivity Factor* (α), og er gitt ved:

$$d'(n-1) = d(n-1) \cdot \alpha$$

Ved valg av $\alpha < 1$ vil kjøretøyet underestimere retardasjonen til kjøretøyet foran. Dette fører til mer aggressiv adferd, og tidsluken til kjøretøyet foran blir redusert. Tilsvarende vil en $\alpha > 1$ føre til en overestimering av retardasjonen. Adferden vil bli mer forsiktig og tidsluken til kjøretøyet foran vil øke.

For å sørge for at avstanden mellom kjøretøyene ikke blir urealistisk kort har modellen inkludert en minimum tidsluke mellom kjøretøyene. Hvis:

$$x(n-1, t + \Delta t) - [x(n, t) + V(n, t + \Delta t) \Delta t] < V(n, t + \Delta t) \cdot \text{MinHW}(n)$$

Vil hastigheten endres til:

$$V(n, t + \Delta t) = \frac{x(n-1, t + \Delta t) - x(n, t)}{\text{MinHW}(n) + \Delta t}$$

Hvor $\text{MinHW}(n)$ er minimum tidsluke for kjøretøy n i forhold til foranliggende kjøretøy. Dersom vilkårene ikke er oppfylt benyttes hastigheten V_b som ble funnet tidligere.

Etter at hastigheten i det gitte tidsintervallet er bestemt, oppdateres kjøretøyet sin posisjon. Ved akselerasjon benyttes sammenhengen:

$$x(n, t + \Delta t) = x(n, t) + V(n, t + \Delta t) \cdot \Delta t$$

Ved retardasjon benyttes sammenhengen:

$$x(n, t + \Delta t) = x(n, t) + 0,5(V(n, t) + V(n, t + \Delta t)) \cdot \Delta t$$

Da hastighet ved høye tettheter i Gipps sin modell har lite samsvar med observerte hastigheter i køsituasjoner benytter Aimsun en noe modifisert modell. Modifikasjonen går i all hovedsak ut på å justere hastighetsavhengigheten som en funksjon av tetthet. Dette er gjort ved å endre avhengigheten av avstanden mellom kjøretøyene som en funksjon av hastighet.

Oppsummert sørger *Car-Following* modellen for at hvert enkelt kjøretøy velger sin hastighet basert på kjøretøyet foran med de begrensninger det gir, såfremt det ikke fører til at de må overstige sin ønskede hastighet.

Flere av parameterne som inkluderes i *Car-Following* modellen vil i større eller mindre grad påvirkes av andre parametere. Et eksempel på dette er stigning på lenker i nettverket. Stigning i nettverket vil påvirke akselerasjonen og bremsekapasiteten til kjøretøyene. Den nye akselerasjon er gitt som en funksjon av maksimal ønsket akselerasjon og stigningen på lenken. Hvis stigningen er ulik 0 vil den nye akselerasjonen være gitt som:

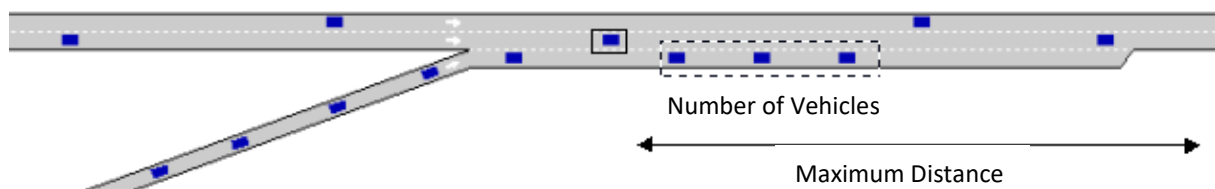
$$a = \max\left(a(n) - \frac{s \cdot 9,81}{100,0}, a(n) \cdot 0,1\right)$$

Hvor stigningen (s) er gitt i prosent. For å unngå negativ akselerasjon er akselerasjonen satt til et minimum av 10 % av ønsket maksimal akselerasjon.

11.2.2 Two-Lane Car-Following Model

Two-lane Car-Following Model kan deles inn i to typer: en absolutt og en relativ. Den absolutte modellen justerer kjøretøyenes hastighetsvalg ved saktegående kjøretøy i tilstøtende kjørefelt for å skape en bedre tilpasning. Parameterne som inkluderes i modellen er *Number of Vehicles*, *Maximum Distance*, *Maximum Speed Difference* og *Maximum Speed Difference on Ramp*.

For å avgjøre hastighetsvalget legges gjennomsnittshastigheten til de saktegående kjøretøyene i det tilstøtende kjørefeltet til grunn. Parameteren *Number of Vehicles* avgjør hvor mange kjøretøy fra det saktegående kjørefeltet som inkluderes i beregningen. For å unngå å inkludere kjøretøy langt unna gir parameteren *Maximum Distance* føringer for den maksimale avstanden frem til det siste kjøretøyet. Kun kjøretøy i det saktegående tilstøtende feltet foran det aktuelle kjøretøyet, som skal få justert hastigheten, inkluderes. Hvis det er for få kjøretøy innenfor den maksimale avstanden inkluderes de manglende kjøretøyene som kjøretøy med hastighet lik den ønskede hastigheten på strekningen. En illustrasjon av de to parameterne er gitt i figur 11-1.



Figur 11-1: Illustrasjon av parameterne *Number of Vehicles* og *Maximum Distance* som inkluderes i en absolutt *Two-Lane Car-Following Model*. (Kilde: *Transport Simulation Systems*, 2017)

Kjøretøyets nye hastighet bestemmes som minimum av ønsket hastighet og gjennomsnittshastigheten til de vurderte kjøretøyene pluss en maksimal hastighetsforskjell. Den maksimale hastighetsforskjellen avhenger av om strekningen er en påkjøringsrampe eller ikke. Hvis strekningen er en påkjøringsrampe er den maksimale hastighetsforskjellen gitt ved *Maximum Speed Difference on Ramp*. Hvis ikke er den gitt ved parameteren *Maximum Speed Difference*.

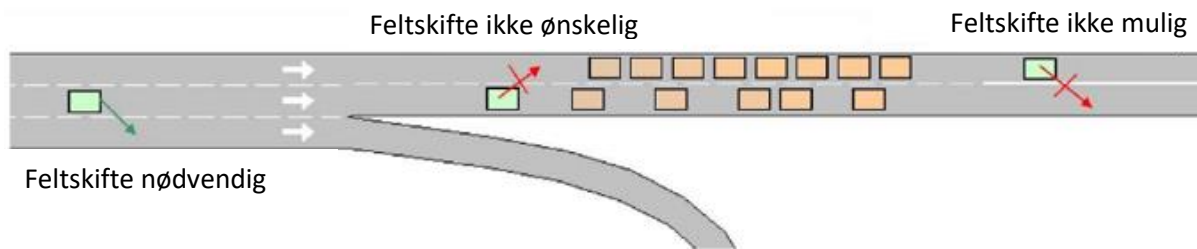
Den relative modellen vurderer sannsynligheten for at det skal skje et feltskifte fra det saktegående kjørefeltet, for så å justere kjøretøyets hastigheten til en hastighet der det vil være mulig å unngå en kollisjon hvis feltskiftet skulle skje. Dette gjøres ved at modellen beregner en sikkerhetsavstand mellom det aktuelle kjøretøyet og et saktegående kjøretøy. Avstanden vil avhenge av hastigheten til begge kjøretøyene, da den skal være stor nok til å sikre at kjøretøyet kan unngå en kollisjon. Hastigheten bestemmes deretter gjennom *Car-Following Model* med sikkerhetsavstanden lagt til grunn.

11.2.3 Lane Change Model

Lane Change Model, som benyttes til å modellere feltskifter i Aimsun, blir ansett som en videreutvikling av feltskiftmodellen til Gipps (1986a). Feltskiftene modelleres gjennom en beslutningsprosess som inkluderer 3 spørsmål:

- Er det nødvendig å skifte felt?
- Er det ønskelig å skifte felt?
- Er det mulig å skifte felt?

Faktorer som tas i betraktning i beslutningsprosessen er for eksempel avstand til og svingemuligheter i neste node, lukestørrelser og trafikkforhold. Mulig forbedring av trafikkforholdene er målt i form av økt hastighet og redusert kølengde. Figur 11-2 illustrerer tre eksempler fra feltskiftmodellens beslutningsprosess.



Figur 11-2: Illustrasjon av tre eksempler fra feltskiftemodellens beslutningsprosess (Kilde: Aakre, 2016)

Avhengig av hvor i nettverket et kjøretøy befinner seg og hvilke svingebevegelser det skal foreta seg videre blir hvert kjøretøy plassert i en av tre soner. Hver sone representerer en gitt motivasjon for å gjennomføre feltskifter.

Når et kjøretøy er i den første sonen, *Zone 1*, vil feltskifter skyldes et ønske om forbikjøring av kjøretøyet foran. Utstrekningen og omfanget av forbikjøringer er modellert gjennom modellen *Overtaking Manoeuvre*, som tar inn de to parameterne *Percentage Overtake* og *Percentage Recover*. Dette er globale parametere som representerer en prosentandel av kjøretøyetts ønskede hastighet. *Percentage Overtake* avgjør når kjøretøyet ønsker å starte en forbikjøring. Dette skjer når hastigheten til foranliggende kjøretøy er lavere enn *Percentage Overtake* av ønsket hastighet for det gitte kjøretøyet. *Percentage Recover* avgjør når kjøretøyet ønsker å legge seg tilbake i høyre kjørefelt. Dette skjer når hastigheten til foranliggende kjøretøy er over *Percentage Recover* av ønsket hastighet for det gitte kjøretøyet. I gjeldende versjon av Aimsun er de to parameterne ansett som foreldet. Dette skyldes at sensitiviteten til parameterne er ansett som lav. Det er likevel mulig å benytte dem, men parameterens tilgjengelighet i programmet er redusert.

I den midterste sonen, *Zone 2*, vil kjøretøy begynne å posisjonere seg for neste svingebevegelse. Ved hjelp av feltskifter vil kjøretøyet nærme seg de aktuelle kjørefeltene der den ønskede svingebevegelsen er mulig å gjennomføre. Dette gjør de ved å tilpasse hastigheten og søke etter luker nedstrøms eller ved siden av for å kunne skifte til det aktuelle kjørefeltet. Hvorvidt lukene kan aksepteres avgjøres gjennom en *Gap Acceptance Model*. Her kan parametere som *Aggressiveness*, *Braking Intensity* og *Imprudent Lane Changing* endres for kjøretøy eller lenker for å tilpasse adferden.

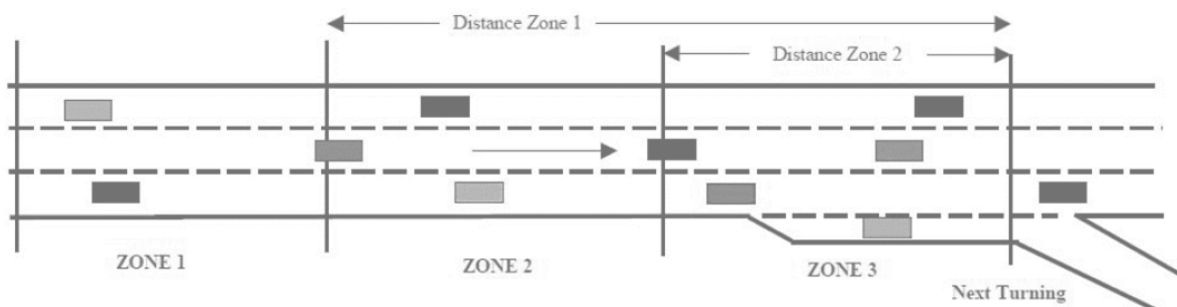
Når kjøretøyene kommer inn i den siste sonen, *Zone 3*, vil de begynne å tvinge seg over i det ønskede kjørefeltet for å unngå å miste avkjøringen. Dette gjør de ved å lete etter luker i trafikken oppstrøms i det aktuelle kjørefeltet. Kjøretøyene vil være villige til å redusere hastigheten og til og med stoppe helt opp for at feltskiftet skal bli mulig. Hvor lenge et kjøretøy vil være villig til å vente før det gir opp og mister svingebevegelsen sin styres gjennom den kjøretøyspesifikke parameteren *Maximum Give Way Time* og den lokale nodespesifikke parameteren *Additional Waiting Time Before Losing Turn*. Ventetiden regnes fra stillestående tilstand, som igjen defineres av parameterne *Queue Entry Speed* og *Queue Exit Speed*, som er presentert tidligere.

Utsprekningen av sonene defineres i noden for hver svingebevegelse. Alle kjøretøy oppstrøms for noden som skal gjennomføre svingebevegelsen påvirkes av soneutstrekningen helt til de har posisjonert seg i et kjørefelt der svingebevegelsen er mulig. Når kjøretøyet har oppnådd ønsket posisjon går handlingsmønsteret tilbake til *Zone 1*, helt til en ny soneutstrekning påvirker det.

Utsprekningen av de ulike sonene er definert ved hjelp av de tre parameterne *Distance Zone 1*, *Distance Zone 2* og *Distance Zone Variability*. *Distance Zone 1* er avstanden fra noden med den aktuelle svingebevegelsen til skillet mellom *Zone 1* og *Zone 2*, mens *Distance Zone 2* er avstanden fra noden til

skillet mellom *Zone 2* og *Zone 3*. Begge parameterne kan defineres både som avstand og tid, men i sistnevnte tilfelle blir tiden regnet om til avstand ved hjelp av fartsgrensen på lenken.

Ettersom oppførselen i *Zone 1* ikke påvirkes av svingebevegelsen er det ikke nødvendig å definere hvor sonen starter. Tilsvarende vil *Zone 3* alltid ende i selve noden. Dette er illustrert i figur 11-3. Ettersom modellen er stokastisk vil skillet mellom sonene være dynamisk, og de to *Distance Zone* parameterne vil variere fra kjøretøy til kjøretøy. Hvor stor variasjon det vil være defineres gjennom parameteren *Distance Zone Variability* som er gitt som en prosentandel av verdien av *Distance Zone*. Sonegrensene for hvert kjøretøy blir dermed hentet fra en uniform sannsynlighetsmodell med *Distance Zone* som middelvei og differansen mellom maksimums- og minimumsverdi definert av *Distance Zone Variability*.



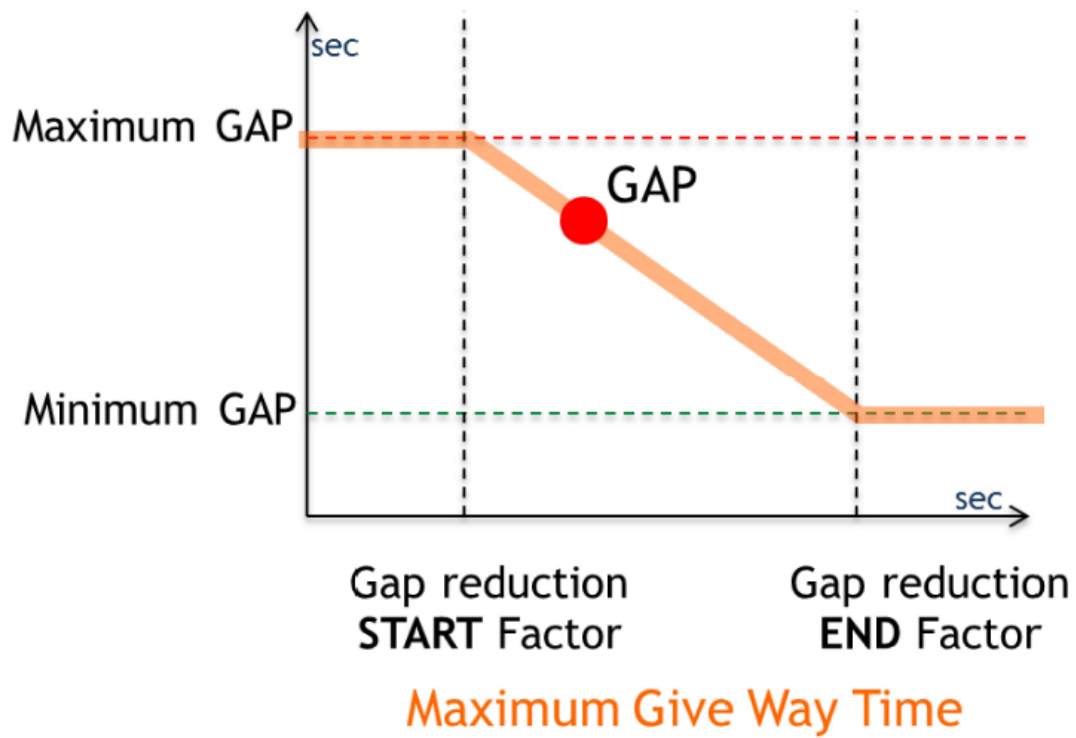
Figur 11-3: Illustrasjon av soneinndelingen i forkant av en node og parameterne *Distance Zone 1* og *Distance Zone 2* (Kilde: Bang et al., 2010).

For hver lenke kan ett eller flere av kjørefeltene reserveres for gitte kjøretøytyper, og på den måten fungere som en *Reserved Lane*. Hvor langt i forkant kjøretøyene blir oppmerksomme på det reserverte kjørefeltet defineres gjennom parameteren *Reserved Lane Visibility Distance*. Dette vil igjen kunne påvirke ønsket feltplassering for kjøretøyene oppstrøms for det reserverte kjørefeltet.

11.2.4 Give Way Model

Når et kjøretøy nærmer seg en vikepliktsregulert node benyttes en *Give Way Model* til å avkjøre om kjøretøyet kan fortsette gjennom noden eller må vike. Basert på andre kjøretøy med høyere prioritet beregnes lukestørrelsen ved å benytte kjøretøyenes hastighet, akselerasjon og avstand til et hypotetisk kollisjonspunkt. Vurderingen av lukestørrelser begynner når det vikende kjøretøyet er nærmere noden enn avstanden gitt av parameteren *Visibility to Give Way*. Tilsvarende definerer *Visibility along Main Stream* hvilke kjøretøy på hovedvegen som skal inkluderes i beregningen. Basert på nødvendig tid for å komme gjennom noden, kombinert med en risikofaktor for hver sjåfør blir en beslutning tatt.

Nødvendig lukestørrelse avgjøres av hvor lenge kjøretøyet har ventet på en luke. Når kjøretøyet ankommer krysset blir nødvendig lukestørrelse satt til kjøretøyets *Maximum Gap*. Er lukestørrelsen større enn nødvendig lukestørrelse vil kjøretøyet kunne kjøre, men hvis den er mindre må det vente. Størrelsen på *Maximum Gap* kan endres ved å endre på parameteren *Initial Safety Margin*. Etter at kjøretøyet har ventet i kjøretøyets *Maximum Give Way Time* ganget med parameteren *Initial GW Time Factor* vil nødvendig lukestørrelse reduseres gradvis mot *Minimum Gap*. *Minimum Gap* er den gjeldende nødvendige lukestørrelsen etter tiden *Maximum Give Way Time* ganget med parameteren *Final GW Time Factor*. Størrelsen på *Minimum Gap* kan endres ved å endre på parameteren *Final Safety Margin*. Sammenhengen mellom nødvendig lukestørrelse og ventetiden er vist i figur 11-4.



Figur 11-4: Sammenhengen mellom nødvendig lukestørrelse og ventetiden (Kilde: Transport Simulation Systems, 2017)

12 Oppbygging av modellen

Ved bruk av informasjon hentet fra de detaljerte registreringene i datainnsamlingen ble det utarbeidet en simuleringsmodell for analyseområdet. Videre vil oppbyggingen av det fysiske nettverket og tilpasningen av datagrunnlaget presenteres.

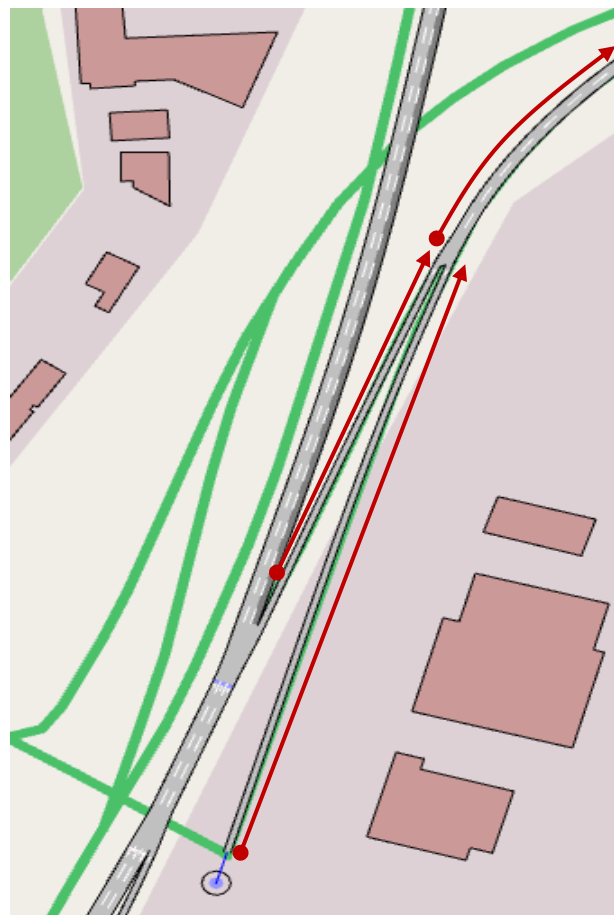
12.1 Fysisk nettverk

Det fysiske nettverket i modellen ble konstruert med utgangspunkt i veglinjer importert fra Open Street Map. Dette ble gjort da analyseområdet i hovedsak består av en lang strekning, noe som videre fører til at det importerte kartutsnittet dekker et større område. Da denne analysen fokuserer på en detaljert oppbygging av en kortere vegstrekning vil en oppbygging fra grunnen av innebære en bedre tilpasning og kontroll over det ønskede nettverket. Videre vil ulike tilpasninger av nettverket knyttet til stigningsforhold, kollektivtransport, detektorer og fartsgrenser presenteres.

12.1.1 Stigningsforhold

Fra kapittel 7.6 ble den geometriske utformingen av analyseområdet kartlagt, der et av de sentrale aspektene er knyttet til stigningsforhold i nettverket. Analyseområdet består av to delområder der det var aktuelt å inkludere en høydeprofil i modellen. Dette gjelder strekningen mellom Tonstad og Kroppan bru, samt Sluppenrampene.

E6 Omkjøringsvegen i nordgående retning, illustrert i figur 12-1, begynner som en firefelts motorveg der avkjøringsrampen fra E6 og



Figur 12-1: Illustrasjon av vegnett ved rampene, hvor høydeprofil har blitt implementert.

påkjøringsrampen fra Sluppenvegen flettes sammen. Følgelig er tilførselen av trafikk på den første strekningen av E6 Omkjøringsvegen betinget av to ramper med forskjellige trafikkvolum og stigning.

Området oppstrøms for avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen preges av periodevis redusert hastighet grunnet avviklingsproblemer. Det er i tillegg et høyt antall tunge kjøretøy som skal videre på E6 Omkjøringsvegen, der det er forventet at det kan oppstå akselerasjonsutfordringer knyttet til stigningen. Tilknytningen til påkjøringsrampen fra Sluppenvegen er utformet som et T-kryss. Dette er med på å redusere starthastigheten på rampen, noe som videre kan resultere i store hastighetsvariasjoner mellom de to trafikkstrømmene i det rampene flettes sammen.

Med bakgrunn i dette ble det konkludert med at kombinasjonen av redusert hastighet i forkant av rampen sammen med stigningsforholdet vil kunne innvirke på den totale trafikkavviklingen, og bør inkluderes i modellen. Alle høydene som legges inn i modellen er relatert til høyden ved begynnelsen av avkjøringsrampen fra E6, som er satt til 0 moh. For bruk i modellen ble det videre antatt at stigningen er konstant over hver lenke. Oversikt over de ulike verdiene benyttet til å estimere stigningen på rampene er gjengitt i tabell 12-1.

Tabell 12-1: Oversikt over høyde- og lengdemål ved Sluppenrampene. Start- og slutthøyde er relatert til høyden ved begynnelsen av avkjøringsrampen fra E6 syd, som settes som nullreferanse.

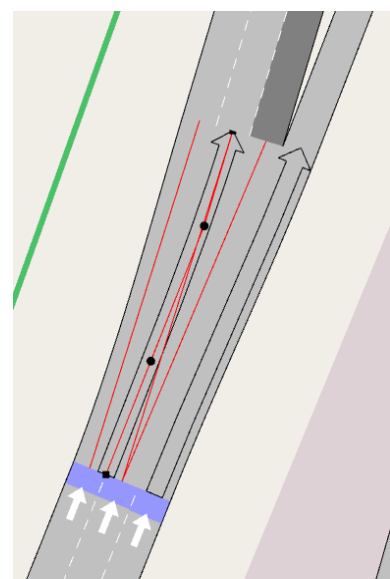
Delstrekning	Lenkelengde [m]	Starthøyde [m]	Slutthøyde [m]	Δh [m]	Stigning [%]
Avkjøringsrampe E6 Omkj.	193,1	0	0,9	0,9	0,46
Påkjøringsrampen Sluppenvegen	305,7	-3,3	0,9	4,2	1,37
E6 Omkj.	233,7	0,9	6,8	5,9	2,52

Strekningen fra Tonstad til begynnelsen av Kroppan bru har ifølge NVDB en helning på 4,4%. Da det ikke er forventet at helningen vil ha en negativ innvirkning på kjøretøyegetegenskaper og trafikantadferd har dette forholdet blitt neglisjert i modellen.

12.1.2 Kollektivtransport

Kollektivknutepunktet ved Kroppan bru er en sentral del av modellen, da bussenes innvirkning på trafikken har blitt sett på som en av hovedutfordringene i området. I kapittel 7.6 ble lengden av bussholdeplassen målt til ca. 50 meter. Dette målet er lagt til grunn i oppbyggingen av modellen, og medfører videre at inntil tre busser kan betjene bussholdeplassen samtidig.

Strekningen fra avkjøringsrampen mot sentrum består av tre kjørefelt der det høyre er forbeholdt kollektivtransport. Fra befaringene ble det observert at bussene i hovedsak benyttet midtre kjørefelt nedstrøms for bussholdeplassen. For å gjenskape dette hendelsesforløpet i modellen ble kjøremønsteret i noden ved avkjøringsrampen tilpasset ved å spesifisere felttilknytningen. Venstre og midtre kjørefelt ble koblet til lenken mot sentrum mens høyre kjørefelt kun ble knyttet til avkjøringsrampen, illustrert i figur 12-2. Dette medfører at den virkelige koblingen til kollektivfeltet i høyre kjørefelt mot sentrum blir fjernet i modellen.



Figur 12-2: Illustrasjon over felttilknytningen i noden ved avkjøringsrampen. Kjørefeltet med mørkegrå farge markerer kollektivfeltet.

12.1.3 Detektor

På strekningen mellom Tonstad og Sluppen er det i virkeligheten anlagt en detektor på Kroppan bru i tilknytning til trafikkregistreringsstasjonen. Gjennom datainnsamlingen ble det hentet detaljert informasjon om de trafikale forholdene fra dette punktet. For å kunne sammenligne modellens gjennomføring med virkeligheten ble det derfor etablert en tilsvarende detektor i modellen. Videre ble ytterligere to detektorer plassert i nettverket, noe som sammen med det statistiske grunnlaget knyttet til veglenker og noder, gjorde det mulig å se mer detaljert på hvordan trafikksituasjonen endret seg gjennom nettverket. Det statistiske grunnlaget kunne videre benyttes gjennom kalibreringsfasen til modellen. Plasseringen av detektorene er vist i figur 12-3.

For hvert detektorområde ble det plassert ut fire detektorer, en i hvert kjørefelt, samt en detektor som dekket alle kjørefeltene samlet. Dette ble gjort for å kunne skille mellom ønsket detaljeringsgrad på informasjonen som ble samlet inn, da det ikke er mulig å skille ut informasjon fordelt på hvert enkelt kjørefelt fra de heldekkende detektorene. I dataanalysen ble det fokusert på høyre kjørefelt, og det forelå derfor et behov for å kunne kontrollere resultatet fra modellen opp mot dette.



Figur 12-3: Illustrasjon over de utplasserte detektorene, markert i blått.

12.1.4 Fartsgrense

Fartsgrensen på de ulike veglenkene er satt i henhold til den faktisk skilte hastighet på strekningen. Unntaket foreligger ved inn- og utkjøring fra bussholdeplassen. Valgt hastighet på disse lenkene begrunnes med utgangspunkt fra tidligere befaringer der det ble observert betydelige hastighetsforskjeller mellom bussene som kjører ut fra holdeplassen og trafikken for øvrig. Hastigheten på disse lenkene ble derfor satt til 30 km/t, som videre er antatt at representerer den gjennomsnittlige hastigheten som oppnås ved enden av utkjøringen.

12.2 Tilpasning av datagrunnlag

Gjennom dataanalysene ble nødvendige inngangsparametere for modellen estimert. Videre vil implementeringen av trafikkvolum og kollektivtransport i modellen presenteres.

12.2.1 Trafikkvolum

Trafikkvolum ble implementert i modellen ved bruk av OD-matriser for henholdsvis lette og tunge kjøretøy med en gitt oppløsning på 15 minutter. Dette er å anse som en høy detaljeringsgrad på trafikkmatrisene, som videre gjør det mulig å fange opp variasjonen innenfor rushperioden. OD-matrisene er gjengitt i vedlegg 7.

Modellen er definert innenfor tidsrommet 06:30 til 08:30. Denne perioden er valgt ut da det i den sammenfallende perioden foreligger tall fra de manuelle registreringene som dekker morgenerushet. De trafikale forholdene i begynnelsen av registreringsperioden er preget av relativt mye trafikk, men de større avviklingsproblemer oppstår ikke før 07:30. Da de manuelle registreringene ble avsluttet 08:45 forelå det ingen antydninger til at det ville oppstå flere avviklingsproblemer.

Trafikkvolum som inngår i modellen er hentet fra balanseregnskapet gitt i kapittel 7.4. Disse verdiene ble benyttet fremfor tall hentet fra de manuelle registreringene, da de bygger på et mer omfattende datagrunnlag. I tillegg ville det vært behov for en tidsjustering av trafikkvolumet fra de manuelle registreringene, da de ble foretatt ca. 3 km nedstrøms for modellens startposisjon langs E6.

Trafikkvolumene fra de manuelle registreringene viser også til en trafikkmengde som begrenses av kapasiteten i flaskehalsen. Ved bruk av balanseregnskapet vil den registrerte trafikkmengden i hvert tidsintervall samsvare med modellen, da det ikke vil være behov for tidsjustering. Bruken vil videre medføre at etterspørselen som forekommer gjennom morgenerushet blir riktig representert ved Tonstad før avviklingsproblemer oppstår ved Sluppenrampene.

Modellen vil på tilsvarende måte som i virkeligheten måtte ha variasjoner i avviklingskvaliteten mellom dagene. Ved å ta utgangspunkt i gjennomsnittsverdier fra registreringene vil variasjonen reflekteres gjennom stokastiske elementer i modellen.

For at det statistiske grunnlaget i modellen skal bli korrekt er det nødvendig å ha trafikk i nettverket ved simuleringsmodellens initiering. Dette ble gjort ved å legge til et oppvarmingsscenario, der OD-matrisen som gjelder fra 06:30 til 06:45 ble benyttet. Denne perioden ble valgt da det ikke foreligger data for rampen knyttet til Sluppenvegen i intervallet 06:15 – 06:30.

12.2.2 Kollektivtransport

I modellen ble bussrutene som benytter de definerte strekningene forenklet til to busslinjer, der nødvendig statistikk ble hentet fra kapittel 7.1.6 og 7.2.

Busslinjen som går mellom Tonstad og Trondheim sentrum er konstruert ved bruk av to rutetider i tidtabellen. Dette ble gjort da avgangsfrekvensen i perioden 06:30 – 07:00 er vesentlig lavere enn fra 07:00 – 08:30. Begge rutetidene er gitt som «Interval (Punctual)». Dette innebærer at bussenes frekvens defineres av et tidsintervall og standardavvik. Bussene vil også være uavhengig av når andre busser på samme linje ankommer bussholdeplassen. Fra de manuelle registreringene ble oppholdstiden, samt det korresponderende avviket, beregnet for perioden mellom 07:00 og 08:30. Videre antas tilsvarende verdier for hele simuleringsperioden. En oversikt over de implementerte verdiene er gjengitt i tabell 12-2.

Tabell 12-2: Frekvens og oppholdstid med tilhørende standardavvik for bussavgangene mellom Tonstad og Trondheim sentrum. I perioden 06:30-07:00 er tallene basert på avgangsfrekvens hentet fra AtB. I perioden 07:00 – 08:30 er tallene basert på manuelle registreringer som har en større nøyaktighet, da AtB oppgir rutetider på hele minutter.

Startklokkeslett [tt:mm]	Frekvens [mm:ss]	Avvik [mm:ss]	Oppholdstid [s]	Avvik [s]
06:30	02:20	02:23	21	7
07:00	01:14	01:14	21	7

Busslinjen som går mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen består av rutetider gitt med «Fixed» avganger, hvilket innebærer at avgangen for hver buss spesifiseres i tidtabellen. Som tabell 12-3 viser

er det kun er tre busser som benytter E6 Omkjøringsvegen i løpet av simuleringsperioden. Da det er et stort spenn i tiden mellom bussene vil en fastsatt frekvens med tilhørende standardavvik ikke være en god tilnærming til de faktiske forholdene. Videre er standardavviket for avgangstiden satt lik 0. For oppholdstid og det korresponderende avviket benyttes tilsvarende verdier som for busslinjen mot sentrum.

Tabell 12-3: Tidtabell fra AtB for avganger fra Kroppanbrua bussholdeplass til E6 Omkjøringsvegen gjennom morgenrushet.

Klokkeslett	Rute	Tid mellom avgang
06:30	90	
07:11	310	00:41:00
07:22	90	00:11:00

13 Verifisering, kalibrering og validering

For å kunne benytte modellen som grunnlag for vurderinger av tiltak er det viktig at modellen gir en god tilnærming til de virkelige forholdene. En god tilnærming innebærer at programmet fungerer som tiltenkt, at de trafikale forholdene gjenskapes og at resultatene ligger innenfor akseptable avvik fra de virkelige registreringene. Dette gjøres gjennom verifisering-, kalibrering- og valideringsfasen, som videre vil bli presentert.

13.1 Verifisering

Verifiseringsprosessen består av å kontrollere at simuleringsprogrammet fungerer slik det er tiltenkt. Dette innebærer at den konseptuelle ideen rundt modellens gjenskapning av virkeligheten blir korrekt oversatt og utført i programvaren.

I denne fasen ble modellen kontrollert opp mot antallet kjøretøy som kjørte gjennom nettverket under simuleringene, samt den respektive fordelingen innad i nettverket. Det ble konkludert med at det var en balanse mellom antallet kjøretøy som kom inn i nettverket og kjøretøyene som befant seg i eller hadde forlatt nettverket. Videre var den tildelte trafikken til mål-sentroiden i en tilsvarende størrelsesorden som oppgitt i OD-matrisene. Kollektivlinjene ble kontrollert i form av at linjen var sammenhengende og korrekt definert, i tillegg til at bussene stoppet ved bussholdeplassen som tiltenkt. Resultatet av verifiseringen viser til at ikke har oppstått problemer knyttet til at kjøretøy forsvinner eller kjører feil i nettverket.

13.2 Kalibrering

Gjennom verifiseringsfasen ble det kontrollert at modellen fungerte som tiltenkt, men det vil fremdeles være behov for å tilpasse kjøreadferden til dagens situasjon. Dette ble gjort gjennom kalibreringsfasen, der det var ønskelig å oppnå et tilstrekkelig samsvar mellom forholdene som oppsto i dagens situasjon og modellens utførelse. Gjennom kalibreringsfasen var det ønskelig å se på hvilke muligheter som foreligger i Aimsun knyttet til detaljstyring av trafikantadferd, og i hvilken grad det er mulig å gjenskape ønsket trafikksituasjon. Videre presenteres en strategi for kalibreringsfasen etterfulgt av en gjennomgang av de forskjellige parameterne som er tilgjengelig i programmet for å kunne endre på kjøretøyenes adferd og fysiske aspekt ved nettverket.

13.2.1 Strategi for kalibreringsfasen

Kalibreringsfasen kan gjennomføres på mange måter, men en anbefalt strategi er å dele den inn i tre steg (Dowling et al., 2004):

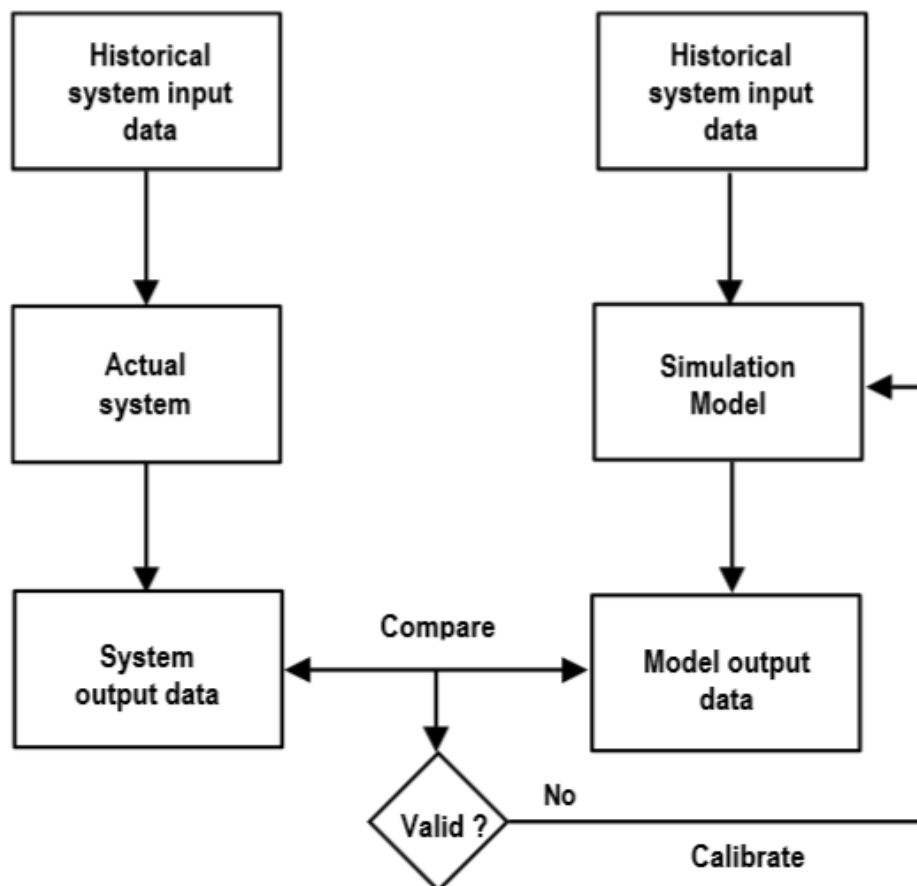
1. Kalibrering av kapasitet
2. Kalibrering av rutevalg
3. Kalibrering av systemytelse

Det første steget er en innledende kalibrering av kapasiteten av nettverket. Ved først å tilpasse de globale parameterne for å reprodusere observert kapasitet vil lokale parametere kunne benyttes til lenkespesifikke finjusteringer.

Steg to vil kun være aktuelt i nettverk med flere rutevalg. Hvis dette er tilfellet må parametere knyttet til valget kalibreres. Også her vil det være nødvendig å kalibrere de globale parameterne etterfulgt av lokale finjusteringer.

Til slutt må systemets overordnede ytelse kalibreres gjennom en sammenligning med virkelige registreringer. Her er det vanlig å kalibrere opp mot forhold som for eksempel reisetid og kølengde. Gjennom lokale finjusteringer tilpasses modellen den virkelige situasjonen.

Kalibreringsfasen utgjør en iterativ prosess sammen med den etterfølgende valideringsfasen, som illustrert i figur 13-1. Dette innebærer at det blir gjennomført kontinuerlige vurderinger av hvordan modellen kjører sammenlignet med kjente forhold for dagens situasjon.



Figur 13-1: Illustrasjon over kalibrering- og valideringsfasen (Kilde: Casas et al., 2010)

13.2.2 Justering av delmodeller

Nettverket som modelleres er av liten utstrekning, men har mange hendelsesforløp som kan innvirke på den totale trafikkavviklingen innenfor analyseområdet. Det ble derfor foretatt flere justeringen av parametere innenfor de ulike delmodellene som er implementert i Aimsun.

Kalibreringen av modellen ble gjennomført som en iterativ prosess, der resultatene fra modellen ble kontinuerlig kontrollert opp mot virkelige registreringer. Differansen som oppsto mellom simulerte og virkelige verdier kunne delvis forklares ut ifra de kartlagte situasjonenes hyppighet og innvirkning, samt i hvilke tidsrom det var forventet at dette kunne være utslagsgivende. Det ble videre gjennomført detaljerte tilpasninger i simuleringsmodellen i et forsøk på å gjenskape de kartlagte situasjonene. Dette innebar at innvirkningen fra parametere, alene og i kombinasjon, ble undersøkt.

I begynnelsen av kalibreringen ble kartlagte forhold fra de virkelige registreringene lagt inn i nettverket ved bruk av lokale parametere. I noden ved utkjøringen fra bussholdeplassen ble det lagt inn et vikepliktsforhold, der kjøretøy på E6 må vike for bussene. Dette innvirket kun på kjøretøy i høyre kjørefelt. Videre ble *Initial Safety Margin* endret fra 3 sekunder til 1 sekund, noe som tilsvarer verdien for *Final Safety Margin*. Dette ble gjort med den hensikt å redusere antall kjøretøy som stopper helt opp for å vike for bussen.

Da det er forventet at trafikantene gjennom morgenrushet er kjent med dagens vegsystem var det også nødvendig å justere på kjøretøyenes feltplassering i henhold til dette. Vegstrekningen mot sentrum etter avkjøringsrampen fortsetter med tre kjørefelt, der høyre kjørefelt er reservert for kollektivtransport. For å unngå at kjøretøy som skal inn mot sentrum må skifte fra høyre til midtre kjørefelt like før avkjøringsrampen ble parameteren *Reserved Lanes Visibility Distance* endret fra 200 meter til 5000 meter for å dekke hele analyseområdet oppstrøms for lenken. En tilsvarende justering var nødvendig å gjennomføre i noden ved avkjøringsrampen, der verdiene for *Distance Zone 1* og *2* (DZ1, DZ2), gitt i *Lane Change Model*, ble endret for begge svingebevegelsene. De lokale endringene ble gjort i kombinasjon med justering av den globale parameteren for *Distance Zone Variability*(DZV). Endringene er gjengitt i tabell 13-1, og viser til originale og endelige verdier.

Tabell 13-1: Originalte og endelige verdier for Distance Zone Variability (DZV) og Distance Zone 1 og 2 (DZ1, DZ2).

Svingebevegelse	Original			Endelig		
	DZV[%]	DZ1 [m]	DZ2 [m]	DZV [%]	DZ1 [m]	DZ2 [m]
Mot sentrum	40	500 (400-600)	100 (80-120)	160	3500 (700-6300)	56,7 (11,3-102,1)
Avkjøringsrampe til E6 Omkjøringsvegen	40	500 (400-600)	100 (80-120)	160	2500 (500-4500)	56,7 (11,3-102,1)

Verdiene som ble valgt er basert på ønsket utslag i resultatet gitt av modellen. Endringene medførte at flere kjøretøy lå i korrekt kjørefelt gjennom hele modellen, samt en større spredning av når sone 2 innvirket på de resterende trafikantene. Parameterne knyttet til *Reserved Lanes Visibility Distance* og *Distance Zone 1* er definert over en større avstand enn modellens utstrekning. Det er videre ikke forventet at dette skal gi store utslag på resultatet gitt av modellen.

Etter at de lokale parameterne var justert ble det videre fokusert på de globale parametere for å oppnå ønsket trafikkavvikling. Reaksjonstidene ble satt som *Fixed*, hvilket innebærer at de oppgitte reaksjonstidene er gjeldende for alle kjøretøysklassene. *Reaction Time*, og følgelig *Simulation Step*, ble endret fra 0,80 sekunder til 0,94 sekunder. *Reaction Time at Stop* ble endret fra 1,20 sekunder til 1,44 sekunder. Videre var nødvendig å definere når kjøretøy ble en del av køen og når de var ute av køen.

Dette ble gjort ved bruk av parameterne *Queue Entry Speed* og *Queue Exit Speed*. Da området som modelleres er en motorveg, der man forventer å kunne holde høy hastighet, var det naturlig å justere disse verdiene opp i henhold til de originale verdiene. *Queue Entry Speed* ble endret fra 1,00 m/s til 5,00 m/s og *Queue Exit Speed* ble endret fra 4,00 m/s til 12,5 m/s.

Da stigningsforholdet ved rampen ble lagt inn ble det valgt å aktivere *Slope Model*, selv om dette ikke ga vesentlige utslag i modellen.

Ved enden av kalibreringen ble det foretatt et par lokale tilpasninger knyttet til *Acceleration Factor* på veglenker for å redusere kjøoppløsningen ytterligere. Dette ble gjort med lenken på E6 parallelt med bussholdeplassen, samt lenken i forkant av avkjøringsrampen. Akselerasjonsfaktoren ble redusert fra 1,0 til 0,5 på begge lenkene.

I tillegg til de overnevnte justeringene ble innvirkningen av andre aktuelle parametere kartlagt.

Fordelingen av trafikkvolumene angitt i OD-matrisen innad i hvert intervall ble undersøkt gjennom endringer av *Global Arrivals*. Det ble konkludert med å beholde den eksponentiell fordelingen satt som standard i Aimsun.

Trafikantadferden på ulike veglenker ble forsøkt tilpasset ved bruk av parameterne *Aggressiveness*, *Cooperation* og *Imprudent Lane Changing*. Da dette ikke ga ønsket resultat ble det valgt å beholde standardverdiene.

For å tilnærme ønsket trafikantadferden ble parametere knyttet til *Car-Following Model* for spesifikke kjøretøysklasser forsøkt endret. Dette ble gjort for vanlige personbiler der verdier for *Sensitivity Factor* og *Gap* ble testet, i tillegg til at *Favors Stop And Go* ble aktivert. Disse endringene ble ikke benyttet videre.

For at trafikken i midtre kjørefelt i større grad skulle tilpasse seg den saktegående køen i høyre kjørefelt, ble *Two-Lane Car-Following Model* aktivert og testet med ulike verdier. Da kjøretøy i midtre kjørefelt allerede tilpasser seg trafikken i høyre kjørefelt gjennom *Lane Change Model* ga *Two-Lane Car-Following Model* lite utslag på reisetiden mellom Tonstad og avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Delmodellen ble dermed ikke benyttet videre.

Ved økt køutstrekning i modellen ble det observert en større ubesluttksomhet knyttet til kjøretøy som ønsket å kjøre forbi køen etter at ønsket feltplassering var oppnådd. Muligheten for å redusere ubesluttksomheten knyttet til feltskifte ble undersøkt ved bruk av delmodellen *Overtake Manoeuvre*, der parameterne *Percent Overtake* og *Percent Recover* ble endret. Parameterne måtte settes til urealistiske verdier før det ga tydelig utslag i modellen. Resultatet ble sett på som lite egnet da parameterne også påvirket kjøretøy som skulle mot sentrum. Dette resulterte i økt køutstrekning da kjøretøy som skulle mot sentrum forble i midtre kjørefelt selv ved lave hastigheter.

I tillegg til endringer av parametere ble det forsøkt å manipulere kjøremønstrene ved bruk av ulike typer sperrelinjer. For videre bruk av modellen ville dette medført problemer knyttet til forventede endringer av kjøremønstre. Anvendelsen av sperrelinjer ble derfor utelatt i den endelige modellen.

13.3 Validering

Etter at modellen er verifisert og kalibrert vil det være nødvendig å kontrollere resultatet opp mot virkelige registreringer. Dette gjøres gjennom valideringsfasen, der valideringskriteriene tar utgangspunkt i reisetid over strekningen, hastighetsprofil på Kroppan bru og en kvalitativ vurdering av

opptredende trafikantadferd. Videre vil valg av antall nødvendige replikasjoner presenteres, etterfulgt av valgte valideringskriterier, samt en vurdering av modellens gjenskapning av de virkelige forholdene.

13.3.1 Valg av antall replikasjoner

Da virkelig trafikk varierer fra dag til dag, vil det være nødvendig å benytte gjennomsnittlige verdier fra en lengere periode for å finne representative verdier. Dette gjelder også simuleringsmodeller, som ivaretar variasjonen fra dag til dag ved å inkludere stokastiske elementer. Det vil dermed være nødvendig å kjøre flere replikasjoner av modellen, før gjennomsnittet av resultatene kan sammenlignes med virkelige verdier. Før dette kan gjøres må det besluttes hvor mange replikasjoner som bør kjøres av modellen.

Videre presenteres ulike metoder for å beregne antall nødvendige replikasjoner. Basert på valgt metode er nødvendig antall replikasjoner for simuleringsmodellen bestemt.

13.3.1.1 Metoder for valg av antall replikasjoner

Det foreligger ingen eksakte svar på hvor mange replikasjoner som bør kjøres av en modell før resultatet kan regnes som tilfredsstillende. Flere ulike kilder viser til forskjellige statistiske metoder for å bestemme et minimum antall replikasjoner for å oppnå resultater med et gitt konfidensnivå. Både Dowling et al. (2004), Burghout (2004), Archer og Cunningham (2005) og Bång et al. (2014) benytter t-tester for å estimere antall nødvendige replikasjoner.

Dowling et al. (2004) presenterer både formelverket for den statiske metoden og en tabell med oversikt over nødvendig antall replikasjoner for ulike konfidensnivå. Da det ble oppdaget feil i beregningene bak verdiene i tabellen ble denne ikke benyttet direkte videre. Den statistiske metoden benytter seg av størrelsen CI/S som er konfidensintervallet delt på standardavviket i målingene. Dette tilsvarer to ganger maksimal tillatt feil delt på standardavviket. Dette er en størrelse som er vanskelig å forholde seg til, og metoden er med grunnlag i dette ikke benyttet direkte videre.

I metoden presentert av Burghout (2004) benyttes en justert feil som grunnlag for å si når resultatet i modellen er tilfredsstillende. Den justerte feilen beregnes med grunnlag i et innledende estimat, der modellen er kjørt med et foreløpig antall replikasjoner $m \geq 2$ for å estimere middelveiden til modellresultatet. Den estimerte middelveiden ($X(m)$) og den virkelige middelveiden (μ) benyttes i beregningen av tillatt prosentvis feil (ε) gitt ved:

$$\varepsilon = \frac{|X(m) - \mu|}{|\mu|}$$

Feilen blir deretter korrigert, og den justerte tillatte prosentvise feilen (ε') er gitt ved:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

Modellen kan videre kjøres med et nytt antall replikasjoner (n) som gir en ny middelveidi ($X(n)$) og et nytt standardavvik ($s(n)$) som kan benyttes i utregningen av et halvt konfidensintervall (d) ved ønsket signifikans (α):

$$d(n, \alpha) = t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \frac{s(n)}{\sqrt{n}}$$

Hvis d delt på absoluttverdien av $X(n)$ er mindre eller lik den korrigerede feilen vil $X(n)$ kunne benyttes som et godt estimat på den virkelige middelveiden, og det er ikke nødvendig å kjøre flere replikasjoner. Hvis dette ikke er tilfellet vil det være nødvendig å starte en iterasjonsprosess ved å øke

antall replikasjoner før et nytt halvt konfidensintervall beregnes og kontrolleres opp mot den korrigerede feilen.

Ulempen med Burghout sin metode er at størrelsen på den tillatte feilen er veldig avhengig av det foreløpige antallet replikasjoner (m) valgt i begynnelsen. Med stor variasjon mellom replikasjonene kan den tillatte prosentvise feilen bli veldig forskjellig avhengig av hvor mange replikasjoner som blir inkludert. Dette gjør at beslutningsgrunnlaget for når modellresultatene er gode nok i stor grad avhenger av tilfeldigheter. Dette gjør at beslutningsgrunnlaget i metoden ikke benyttes videre.

Archer og Cunningham (2005) og Bång et al. (2014) tar begge utgangspunkt i å beregne antall replikasjoner (n) direkte fra en t-fordeling ved bruk av t-verdien ved ønsket konfidensnivå ($t_{1-\alpha/2, n-1}$), standardavviket ($s(n)$) og en maksimal tillatt feil ($d(n)$) som tilsvarer et halvt konfidensintervall. Uttrykket for antall replikasjoner blir da:

$$n = \left(\frac{s(n) \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}}{d(n, \alpha)} \right)^2$$

Ulempen med denne formelen er at beregningen av n blir en iterativ prosess da t-verdien er avhengig av antall replikasjoner. Dette gjør beregningsprosessen tidkrevende. Ved å løse uttrykket for den maksimale tillatte feilen vil t-verdien og n være samlet på samme side. Ved å kjøre et gitt antall replikasjoner vil man kunne beregne feilen, og videre vurdere om denne er akseptabel eller ikke. Ettersom feilen vil være det samme som et halvt konfidensintervall, vil uttrykket være det samme som i metoden til Burghout. Hvis feilen ikke er akseptabel vil det være behov for å øke antall replikasjoner før beregningene gjentas og vurderes på nytt.

Alle metodene bygger på det statistiske prinsippet «store talls lov», som sier at gjennomsnittet av en rekke observasjoner vil nærme seg en forventningsverdi ettersom antallet observasjoner øker (Store norske leksikon, 2017). Ved et høyt antall observasjoner vil en ny observasjon ha liten innvirkning på det totale gjennomsnittet, og gjennomsnittet vil til slutt stabilisere seg rundt forventningsverdien. Ved å velge ut et antall replikasjoner der gjennomsnittet er innenfor en tillatt feilmargin fra forventningsverdien vil gjennomsnittet kunne benyttes som et estimat på forventningsverdien.

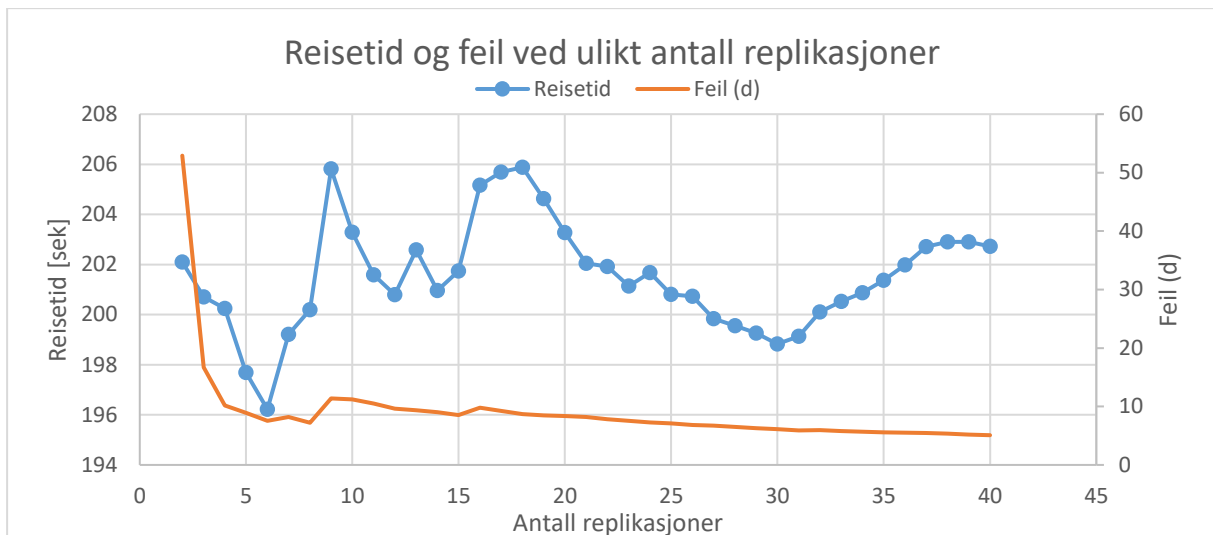
13.3.1.2 Beregning av nødvendig antall replikasjoner

Da modellens utstrekning og kompleksitet er liten, vil ikke beregningsmengden sette begrensninger for hvor mange replikasjoner som kan kjøres. Som et utgangspunkt ble modellen kjørt med 40 replikasjoner for å se på utviklingen i den tillatte feilen (d). For hver replikasjon som ble lagt til ble gjennomsnittlig reisetid og tilhørende standardavvik beregnet. Videre ble signifikansnivået (α) satt til 10 %, og den korresponderende feilen som tilsvarer halve 90%-konfidensintervallet ble beregnet for hver kjøring. Resultatene fra de 39 ulike kjøringene med 2 til 40 replikasjoner er presentert i tabell 13-2 figur 13-8 og figur 13-2. I tabellen er feilen også gitt i prosent av gjennomsnittlig reisetid.

Antallet replikasjoner som ble testet mot valideringskriteriet ble valgt basert på den estimerte statistiske feilen i modellen (d). Et stabilt feilestimat på under 10 sekunder ble først oppnådd ved 12 replikasjoner. Videre ble feilestimatet redusert til stabile verdier på under 9, 8, 7 og 6 sekunder ved henholdsvis 18, 22, 26 og 31 replikasjoner. Alle disse 5 kjøringene er fremhevet i tabell 13-2.

Tabell 13-2: Resultatet av 39 ulike kjøringar med 2 til 40 replikasjoner. Første kjøring med stabil feil under 10, 9 8,7 og 6 sekunder er fremhevet i grønt.

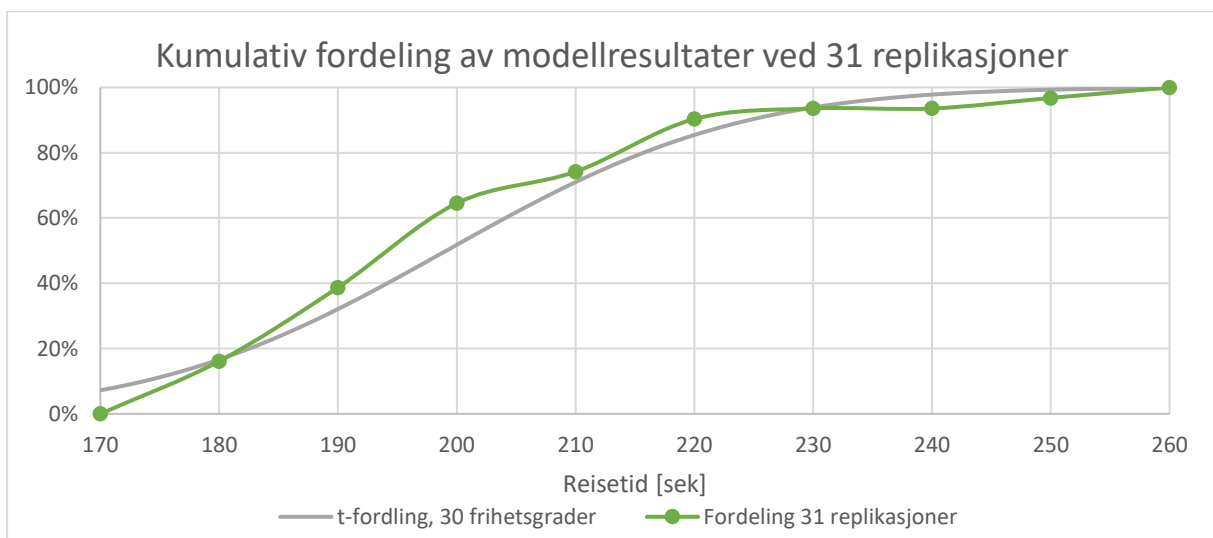
Antall replikasjoner (n)	Reisetid (X), [sek]	Standardavvik (s), [sek]	t-verdi ($t_{1-\alpha/2, n-1}$)	Feil (d), [sek]	Prosentvis feil (d/X), [%]
2	202,10	11,85	6,314	52,90	26,18 %
3	200,70	9,90	2,920	16,69	8,32 %
4	200,25	8,65	2,353	10,18	5,08 %
5	197,69	9,32	2,132	8,89	4,49 %
6	196,22	9,15	2,015	7,53	3,84 %
7	199,21	11,19	1,943	8,22	4,13 %
8	200,20	10,78	1,895	7,22	3,61 %
9	205,81	18,37	1,860	11,39	5,53 %
10	203,28	19,38	1,833	11,23	5,53 %
11	201,59	19,24	1,812	10,51	5,22 %
12	200,79	18,59	1,796	9,64	4,80 %
13	202,58	18,87	1,782	9,33	4,60 %
14	200,96	19,12	1,771	9,05	4,50 %
15	201,74	18,70	1,761	8,50	4,22 %
16	205,16	22,34	1,753	9,79	4,77 %
17	205,69	21,78	1,746	9,22	4,48 %
18	205,88	21,17	1,740	8,68	4,22 %
19	204,63	21,28	1,734	8,47	4,14 %
20	203,27	21,57	1,729	8,34	4,10 %
21	202,05	21,76	1,725	8,19	4,05 %
22	201,92	21,26	1,721	7,80	3,86 %
23	201,14	21,10	1,717	7,55	3,76 %
24	201,67	20,80	1,714	7,28	3,61 %
25	200,81	20,80	1,711	7,12	3,54 %
26	200,73	20,40	1,708	6,83	3,40 %
27	199,84	20,52	1,706	6,74	3,37 %
28	199,55	20,20	1,703	6,50	3,26 %
29	199,26	19,91	1,701	6,29	3,16 %
30	198,83	19,71	1,699	6,11	3,08 %
31	199,13	19,44	1,697	5,93	2,98 %
32	200,11	19,89	1,696	5,96	2,98 %
33	200,52	19,71	1,694	5,81	2,90 %
34	200,87	19,52	1,692	5,67	2,82 %
35	201,37	19,46	1,691	5,56	2,76 %
36	201,98	19,52	1,690	5,50	2,72 %
37	202,71	19,76	1,688	5,48	2,71 %
38	202,90	19,54	1,687	5,35	2,64 %
39	202,90	19,29	1,686	5,21	2,57 %
40	202,72	19,08	1,685	5,08	2,51 %



Figur 13-2: Utviklingen av reisetid og feil ved økende antall replikasjoner.

På bakgrunn av feilen ble 12 replikasjoner vurdert som lite, da feilen ikke reduseres stabilt ved kjøring med flere replikasjoner. Mellom 15 og 16 replikasjoner ble det registrert en økning av feilen på 1,29 sekunder. Dette skyldes at det fremdeles er så få replikasjoner at de i mindre grad klarer å veie opp for nye ekstremalverdier i beregningen av gjennomsnittet. Ved å kjøre beregningene med flere replikasjoner vil replikasjonene med ekstreme verdier få mindre effekt på gjennomsnittsberegningene, og resultatet og feilen vil i større grad stabilisere seg rundt en forventningsverdi. Ved flere replikasjoner enn 16 reduseres feilen stabilt fra kjøring til kjøring, med unntak av mellom 31 og 32 replikasjoner. Her er det en økning på 0,03 sekunder. Denne anses likevel som så liten at feilen er tilnærmet stabilt. At effekten av den 32. replikasjonen får mindre utslag viser at antallet replikasjoner begynner å bli stort nok til å veie opp for ekstremverdiene. 31 replikasjoner anses dermed som et passende antall replikasjoner for simuleringsmodellen.

Ved å bruke den gjennomsnittlige reisetiden og det tilhørende standardavviket for 31 replikasjoner som estimat for forventningsverdien og standardavviket i en t-fordeling kan den statistiske fordelingen sammenlignes med de virkelige modellresultatene. Resultatet, vist i figur 13-3, viser at reisetidene fra de 31 replikasjonene i modellen i stor grad følger samme mønster som t-fordelingen. Dette underbygger valget av t-fordeling som den statistiske fordelingen lagt til grunn i beregningene.



Figur 13-3: Kumulativ fordeling av reisetidene i de 31 replikasjonene sammenlignet med en t-fordeling med forventningsverdi og standardavvik gitt av modellresultatene.

13.3.2 Valideringskriterier

Som tidligere nevnt henger kalibrerings- og valideringsfasen tett sammen. En modell vil kunne aksepteres som en tilstrekkelig god gjenspeiling av dagens fysiske situasjon når brukeren selv er fornøyd med resultatet fra simuleringene (Dowling et al., 2004). For å videre kunne argumentere for bruk av modellen vil man normalt kontrollere resultatet fra simuleringene opp mot målte verdier fra det faktiske systemet. Da modellen aldri vil kunne gjenskape de eksakte forholdene som har blitt registrert settes det ulike kriterier for når modellen kan aksepteres. Et eksempel på slike kriterier er presentert i den britiske *Design manual for roads and bridges* (Department of Transport, 1996) og er gjengitt i figur 13-4.

Criteria and Measures	Acceptability Guideline
<u>Assigned Hourly flows * compared with observed flows</u>	
1. Individual flows within 15% for flows 700 - 2,700 vph)
2. Individual flows within 100 vph for flows < 700 vph) > 85% of cases
3. Individual flows within 400 vph for flows > 2,700 vph)
4. Total screenline flows (normally > 5 links) to be within 5%	All (or nearly all) screenlines
5. GEH statistic:	
i) individual flows : GEH < 5	> 85% of cases
ii) screenline (+) totals: GEH < 4	All (or nearly all) screenlines
Notes	
+ Screenlines containing high flow routes such as Motorways should be presented both including and excluding such routes	
* links or turning movements (but see Paragraph 4.4.37).	
<u>Modelled journey times compared with observed times</u>	
6. Times within 15% (or 1 minute, if higher)	> 85% of routes

All comparisons should be based on directional hourly flows and should be undertaken for at least an average hour in each modelled period.

Figur 13-4: Retningslinjer for validering av simuleringsmodell hentet fra *Design manual for roads and bridges* (Department of Transport, 1996). Tabellen viser foreslåtte kriterier og målinger, samt anbefalte akseptmål.

Kriteriene gitt i punkt 1-5 innebærer en sammenligning mellom den fordelte trafikken i modellens nettverk og den faktiske fordelingen i det virkelige systemet. Verdiene som sammenlignes baseres på trafikkvolum gitt på timesbasis, der kriteriene for aksept avhenger av blant annet forventet trafikkbelastning og vegenes klassifisering. Da det ikke er mulig for kjøretøy å benytte forskjellige reiseruter mellom de ulike start- og målsentroidene i modellen vil kriterier knyttet til fordelingen innad i nettverket ikke kunne benyttes til validering. Trafikkvolumet på de ulike lenkene vil tilsvare det virkelige trafikkvolumet med stokastiske variasjoner.

Kriterium 6 omhandler også fordelingen over nettverket, men forholdene som sammenlignes er knyttet til reisetid. På tilsvarende måte som for de andre kriteriene vil nettverksfordelingen skape problemer knyttet til validering av modellen. Kriteriet for reisetid vil, ved bruk av et par modifikasjoner, likevel kunne benyttes for å validere modellen da det foreligger detaljerte registreringer for reisetiden på strekningen mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen.

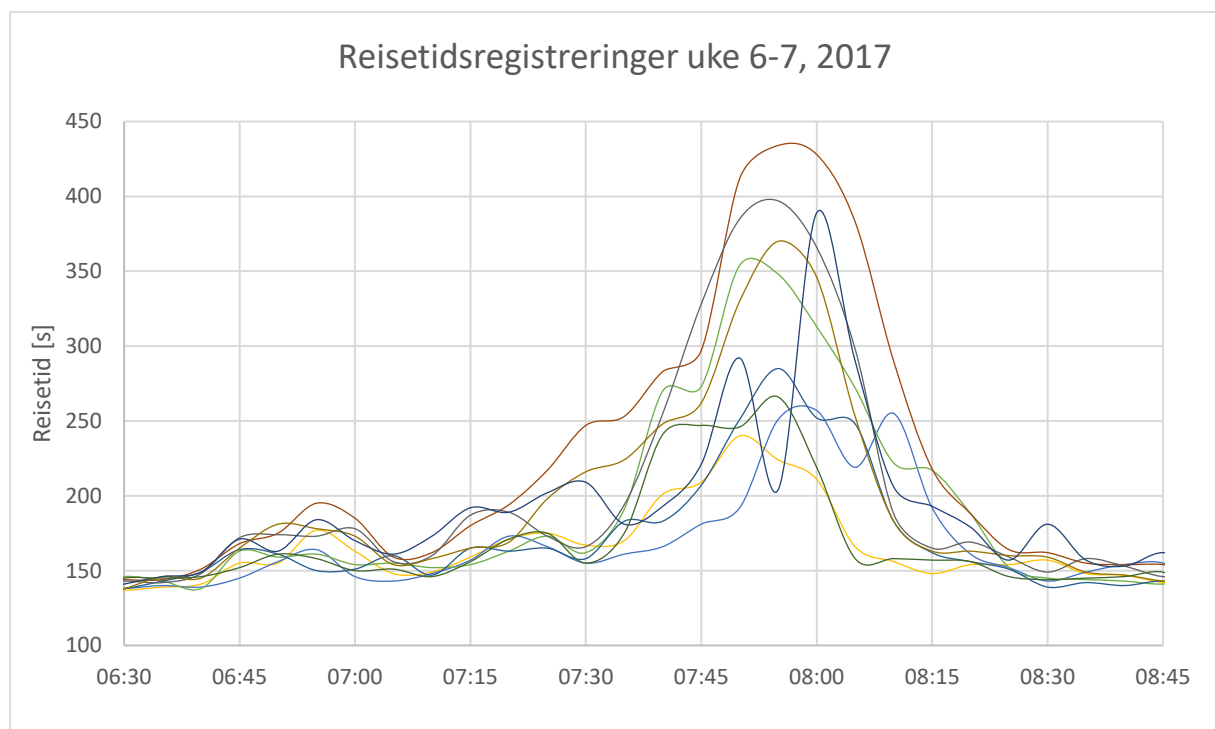
Dowling et al. (2004) gjengir de samme kriteriene som *Design manual for roads and bridges*, men tilføyer to punkter knyttet til visuell validering. Det første kriteriet er knyttet til volum-hastighetssammenhenger på de ulike lenkene, mens det andre er knyttet til kødannelse ved flaskehals. Kriteriene regnes som oppfylt når forholdene er visuelt akseptable i henhold til brukers tilfredsstillelse.

13.3.3 Validering av modellen

De virkelige reisetidsregistreringene ble registrert på 5-minuttersintervall, noe som videre gir et godt bilde på hvordan den trafikale situasjonen endret seg gjennom morgenrushet. Problemstillingen er kun knyttet til trafikkavviklingen på rampen til E6 Omkjøringsvegen og det ble derfor konkludert med at det var tilstrekkelig å sammenligne reisetiden kun på denne strekningen.

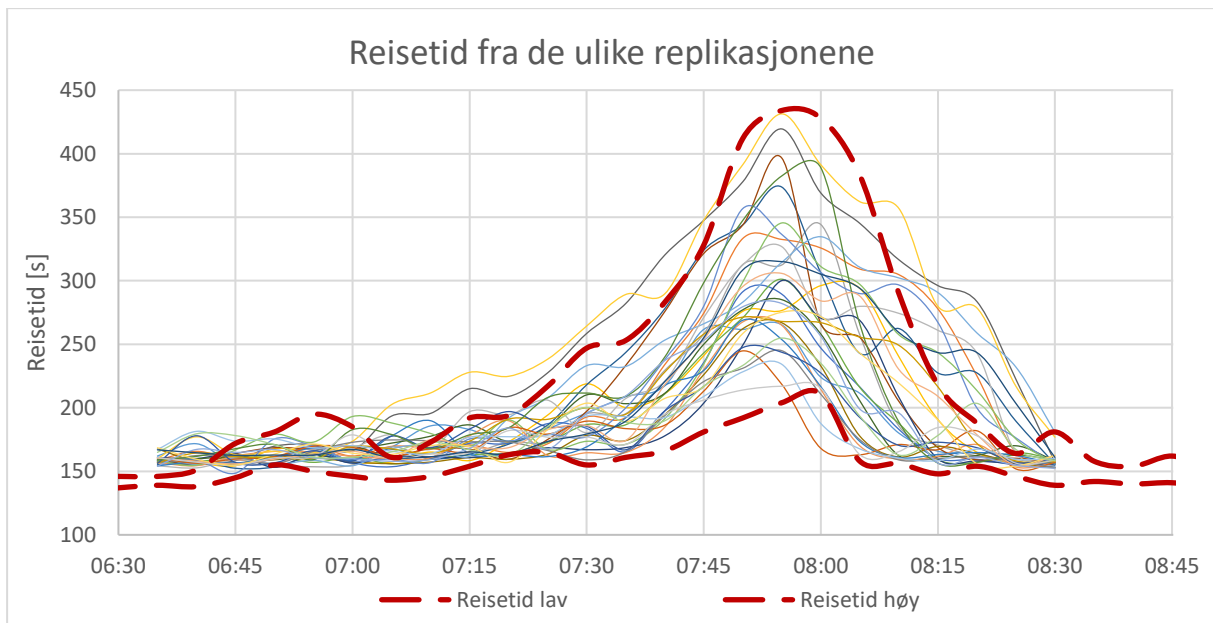
Videre ble reisetiden gitt av virkelige data og simuleringsmodellen sammenlignet på 5-minuttersintervall. Da dette er en høy detaljeringsgrad vil avviksgrensen for hver replikasjon baseres på nedre og øvre ekstremalverdi innenfor hvert 5-minuttersintervall fra det virkelige datasettet. Kriteriet som ble benyttet for å validere modellen ble følgelig satt til at 85 % av alle reisetidene skal ligge innenfor ekstremalverdiene.

Hvordan reisetiden utvikler seg gjennom morgenrushet varierer sterkt mellom dagene. Dette er illustrert i figur 13-5, tidligere presentert i kapittel 7.5. Da det statistiske grunnlaget gitt av Aimsun registreres på intervallenes sluttidspunkt, er de virkelige registreringene tilpasset dette.



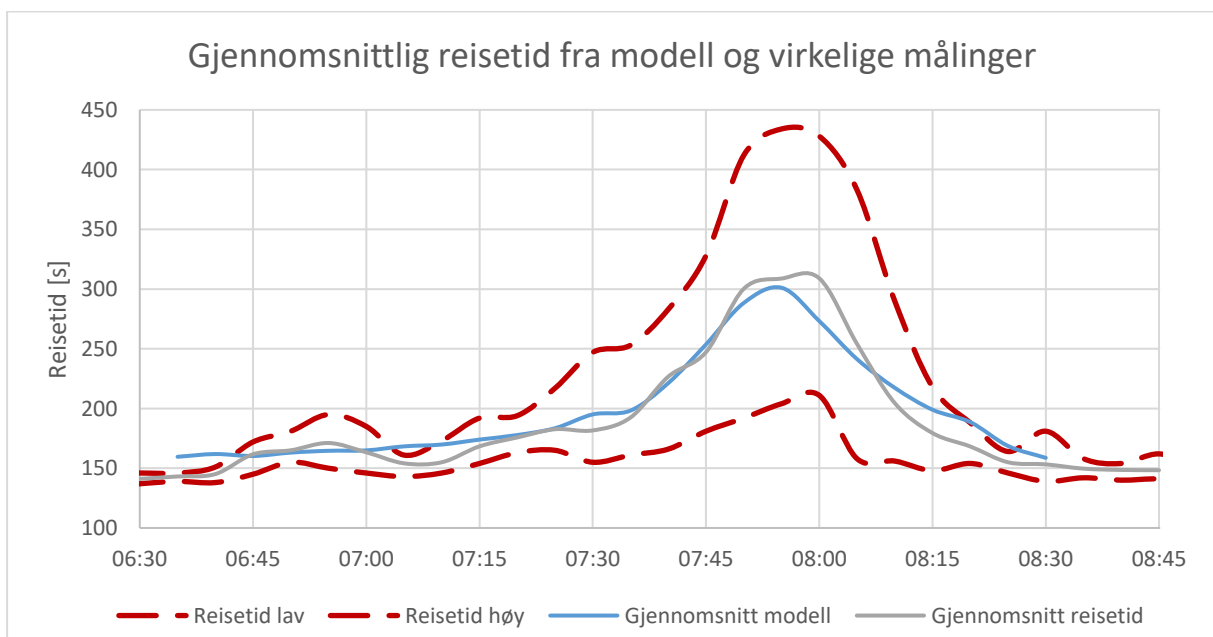
Figur 13-5: Reisetidsregistreringer på strekningen Tonstad – Sluppenrampene fra hverdager i uke 6 og 7, 2017. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Ekstremalverdiene for hvert tidsintervall fra de virkelige registreringene er videre illustrert som røde, stiplede linjer i figur 13-6, sammen med 31 linjer som viser til resultat fra hver replikasjon gitt av simuleringsmodellen.



Figur 13-6: Illustrasjon av reisetider fra de ulike replikasjonene av simuleringsmodellen sammenlignet med ekstremalverdier fra virkelige registreringer. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Resultatet fra de ulike replikasjonene viser til store variasjoner i avviklingskvaliteten gjennom morgenrushet. Dette kan ha sammenheng med at trafikkvolumet overskrider den tilgjengelige kapasiteten i flaskehalsen. Innvirkningen fra de ulike situasjonene som medfører sjokkbølgedannelse kan variere stort avhengig av når og hvordan de inntreffer. Videre viser spredningen til en god overensstemmelse med de virkelige reisetidsregistreringene, men replikasjonene viser noe større variasjon. Variasjonen er derimot ikke større enn det som kan forventes ved å gjennomføre flere registreringer. For å gi en enklere illustrasjon av reisetidene gitt av simuleringsmodellen sammenlignet med de virkelige reisetidsdataene, er gjennomsnittsverdier fra begge dataseriene presentert sammen i figur 13-7.



Figur 13-7: Illustrasjon av gjennomsnittlig reisetid fra virkelige registreringer og simuleringsmodellen, samt ekstremalverdier fra virkelige registreringer. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Ekstremalverdiene hentet fra de virkelige registreringene viser til en relativt liten spredning i reisetid i perioden 06:30 – 07:30 og etter 08:15. Perioden med den største differansen mellom ekstremalpunktene er å finne kl. 07:50, der den laveste og høyeste gjennomsnittlige reisetiden er henholdsvis 204 sekunder og 434 sekunder.

Videre ble det gjennomført en sammenligning av de gjennomsnittlige reisetidene innenfor hvert tidsintervall, gjengitt i tabell 13-3. Dette kan gi en indikasjon på om det er oppnådd godt samsvar mellom modellen og det som kan observeres fra virkeligheten.

Totalt ligger 5 av 23 punkter utenfor grensene satt av ekstremalverdiene fra de virkelige registreringene. Den største differansen mellom de virkelige registreringene og resultatet gitt av simuleringmodellen oppstår kl. 08:00, der reisetiden i modellen ligger mer enn 35 sekunder under faktisk reisetid. Dette forholdet har sammenheng med problemer knyttet til kalibreringsfasen, der det var vanskelig å oppnå en tilstrekkelig kjøpløsning etter at rushtoppen var nådd. For å holde reisetiden innenfor ønsket intervall ved enden av modellens simuleringperiode ble det derfor valgt å gå videre med en modell der oppløsningsfasen begynte litt tidligere.

Tabell 13-3: Sammenligning av gjennomsnittlig reisetid for hvert tidsintervall hentet fra simuleringmodellen og virkelige registreringer.

Sluttidspunkt [tt:mm]	Virkelighet [s]	Modell [s]	Differanse [s]	Utenfor ekstremalverdi
06:35	143	160	17	+ 14
06:40	145	162	17	+ 11
06:45	162	161	-1	-
06:50	165	163	-2	-
06:55	171	165	-6	-
07:00	163	165	2	-
07:05	154	169	15	+ 8
07:10	155	170	15	-
07:15	168	175	6	-
07:20	176	178	2	-
07:25	183	184	1	-
07:30	182	195	13	-
07:35	192	198	6	-
07:40	227	221	-6	-
07:45	247	253	6	-
07:50	300	287	-13	-
07:55	309	299	-9	-
08:00	309	272	-37	-
08:05	254	242	-12	-
08:10	205	219	14	-
08:15	179	200	21	-
08:20	168	191	23	+ 3
08:25	155	170	15	+ 6
08:30	153	159	6	-
Total	195	199	4	-

Basert på den tidligere kartleggingen av nødvendig antall replikasjoner ble fem alternativer sammenlignet med ekstremalverdiene fra de virkelige reisetidsregistreringene innenfor hvert 5-minuttersintervall. Kravet om at minst 85 % av alle reisetidene skal være mellom ekstremalverdiene er grunnlaget for tabell 13-4. I henhold til kravene satt for validering av modellen skapte ekstremalpunktene ved begynnelsen og slutten av morgenrushet utfordringer, da differansen mellom ytterpunktene lå i en størrelsesordenen på 10 til 20 sekunder. I de to intervallene som utgjør perioden 06:30 – 06:40 ligger alle resultatene fra simuleringene over ønsket verdi. Dette kan ha sammenheng med at kjøretøyene i modellen generelt overholder fartsgrensen mer konsekvent enn i virkeligheten. Videre kan parameterne knyttet til tidlig plassering i høyre kjørefelt for kjøretøy som skal ut på rampen skape mer kø i perioder med liten trafikk, der det i virkeligheten oppstår en bedre fordeling av kjøretøy mellom midtre og høyre kjørefelt. Da det ikke er antydninger til avviklingsproblemer i denne perioden ble de to første intervallene utelatt i andelsberegningen.

Resultatet viser at kun modellene med 12 og 31 replikasjoner tilfredsstiller kravet, men forskjellene mellom kjøringene er små. Dette understøtter valget av å benytte 31 replikasjoner gjennom kalibreringsfasen.

Tabell 13-4: Andel reisetidsregistreringer fra modellen som ligger innenfor ekstremalverdiene for hvert tidsintervall ved forskjellige antall replikasjoner.

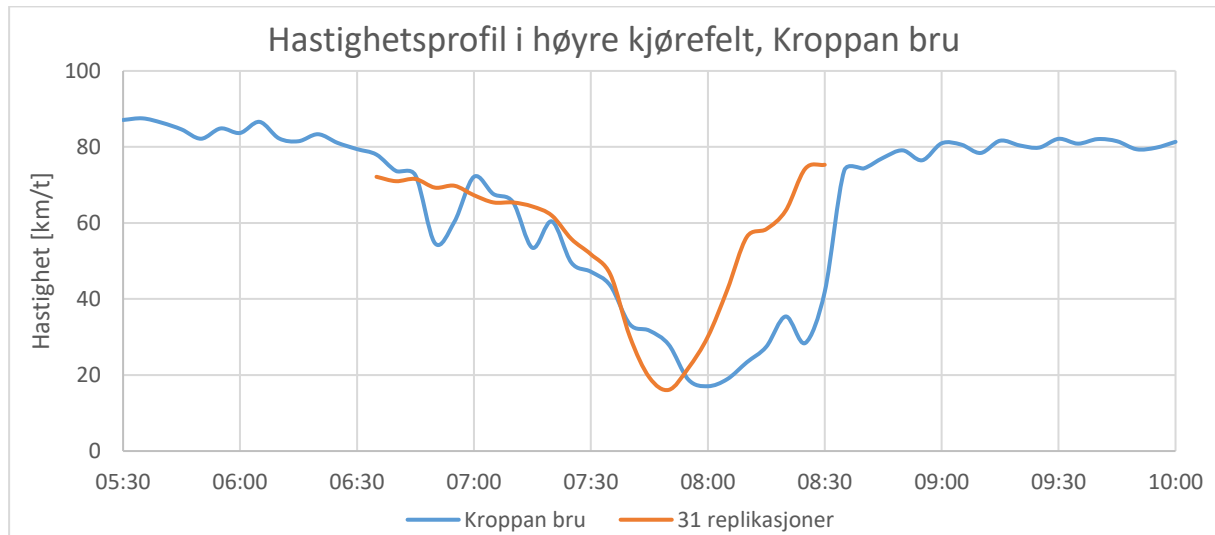
# replikasjoner	Andel innenfor ekstremalverdier				
	31	26	22	18	12
Sluttidspunkt					
06:35	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
06:40	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
06:45	94 %	96 %	100 %	100 %	100 %
06:50	90 %	88 %	86 %	83 %	75 %
06:55	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
07:00	97 %	96 %	95 %	94 %	100 %
07:05	32 %	27 %	27 %	33 %	33 %
07:10	71 %	69 %	68 %	72 %	75 %
07:15	90 %	88 %	86 %	83 %	92 %
07:20	74 %	77 %	77 %	72 %	75 %
07:25	84 %	81 %	77 %	78 %	83 %
07:30	94 %	92 %	91 %	89 %	92 %
07:35	94 %	92 %	91 %	89 %	92 %
07:40	94 %	92 %	91 %	89 %	92 %
07:45	94 %	92 %	91 %	89 %	92 %
07:50	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
07:55	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
08:00	90 %	88 %	91 %	100 %	100 %
08:05	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
08:10	84 %	81 %	77 %	72 %	83 %
08:15	71 %	69 %	64 %	56 %	75 %
08:20	68 %	69 %	64 %	56 %	75 %
08:25	61 %	62 %	55 %	44 %	58 %
08:30	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Total	85,5 %	84,6 %	83,3 %	81,8 %	86,0 %

Etter at modellen ble godkjent ut ifra valideringskriteriet knyttet til reisetid ble et tilfeldig utvalg simuleringer kontrollert opp mot at ønsket hendelsesforløp og adferd i trafikken stemte godt overens med observasjonene fra virkeligheten. Dette ble gjort gjennom en visuell validering av modellens kjøring.

Fra de tilfeldig utvalgte replikasjonene ble følgende momenter observert:

- Ved initiering av modellen befant det seg betydelig mer trafikk i høyre kjørefelt gjennom hele modellen sammenlignet med de resterende kjørefeltene. Dette samsvarer godt med virkelige observasjoner.
- Når busser kjører ut fra holdeplassen kan man observere at kjøretøyene på hovedvegen i stor grad tilpasser hastigheten for å skape tilstrekkelige luker, uten at kjøretøyene må stoppe helt opp. Denne hendelsen er videre med på å skape en sjokkbølge som brer seg bakover på motorvegen. Reaksjonstid for saktegående/stoppede kjøretøy, samt oppløsningshastighet stemmer bra med virkelige observasjoner, der det ble observert store luker mellom kjøretøy i oppløsningsfasen.
- Det forekommer ofte at flere busser ankommer eller forlater bussholdeplassen samtidig. Dette stemmer godt med observasjoner fra virkeligheten. Videre resulterer denne hendelsen i en større sjokkbølge da kjøretøy på hovedvegen i mindre grad benytter lukene mellom bussene. Bussens innvirkning på den totale avviklingen i modellen kan dermed være litt for høy.
- Ser at det ofte forekommer kjøretøy som benytter luker som oppstår i oppløsningsfaser for å posisjonere seg i høyre kjørefelt, noe som videre reduserer trafikkavviklingen. Dette stemmer godt med virkelige observasjoner.
- Andelen kjøretøy som benytter seg av sene feltskifter for å unngå køen i høyre kjørefelt er noe lavere i modellen sammenlignet med virkelige observasjoner. Dette skyldes begrensninger ved programvarens mulighet for tilstrekkelig detaljstyring av enkeltkjøretøys adferd. Hendelsesforløpet blir i virkeligheten ofte ansett som en egoistisk handling for å redusere sin egen reisetid på bekostning av andres. I Aimsun ble feltplasseringen bestemt ved bruk av feltskiftmodellen, der de tre definerte sonene viser til når kjøretøy vet, ønsker og må ligge i korrekt kjørefelt. For å oppnå en bedre tilpasning av modellen i henhold til de som velger å skifte felt sent, måtte enkelte kjøretøy i modellen gå direkte fra sone 1 til sone 3. En slik tilpasning, der sone 2 reduseres betraktelig, ville medført at majoriteten av kjøretøyene ikke kjørte korrekt i forhold til hva som ble observert i virkeligheten. Endringer av parametere i delmodellen ble videre gjort med den hensikt å gi en god gjenspeiling av faktiske kødannelser, utstrekninger og trafikkavviklingen. I perioder med tett trafikk øker andelen kjøretøy som kommer inn i sone 3. Dette har sammenheng med at det ikke forelå muligheter til å gjennomføre et feltskifte på et tidligere tidspunkt, fremfor at det sene feltskiftet var en ønsket handling. Da det er en liten andel kjøretøy som i virkeligheten foretar sene feltskifter, og det faktum at handlingens innvirkning på den totale trafikkavviklingen i stor grad varierer mellom enkelthendelsene, er dette ansett som forhold som ikke vil gi store utslag i modellen.
- I periodene med tett og saktegående trafikk oppsto det et annet problem knyttet til feltskiftmodellen, der kjøretøy i sone 2 stoppet helt opp i midtre kjørefelt i påvent av luker i høyre kjørefelt. Dette medførte videre at trafikk oppstrøms i midtre kjørefelt ble hindret videre ferdse frem til feltskiftet ble gjennomført. At kjøretøy i midtre kjørefelt stopper helt opp ble også registrert fra de virkelige observasjonene, men ikke med det samme omfang som er gjengitt i modellen. Dette vil videre kunne føre til en større konsentrasjon av kjøretøy som ønsker å skifte kjørefelt innenfor et kort tidsrom, og vil kunne innvirke på trafikkavviklingen knyttet til avkjøringsrampen. Når kjøretøy stopper i midtre kjørefelt vil dette i tillegg medføre en midlertidig reduksjon av kapasiteten mot sentrum. Forholdene er likevel ansett som en tilstrekkelig representasjon av de virkelige forholdene.

Det er ønskelig å understreke at adferdstilpasningen i modellen i stor grad baserer seg på et forventet handlingsmønster som er basert på generelle erfaringer. Dette var nødvendig da det bare ble gjennomført befaringer og observasjoner på en liten del av analyseområdet. Den visuelle valideringen omfattet også en sammenligning av hastighetsprofilen i høyre kjørefelt ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru. Hensikten med denne sammenligningen er å gi en vurdering i henhold til om de trafikale forholdene i modellen, i form av køutstrekning, stemmer godt med virkelige registreringer. I figur 13-8 er den gjennomsnittlige hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru illustrert sammen med den tilsvarende gjennomsnittlige hastighetsprofilen gitt av de 31 replikasjonene i simuleringmodellen.



Figur 13-8: Gjennomsnittlig hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru gitt av de virkelige og simulerte registreringene. Registreringene har en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Figuren viser et godt samsvar mellom de to hastighetsprofilene i perioden 06.30 – 07.35. Videre når modellen bunnpunktet i perioden mellom 07:45 og 07:50, 10 minutter før det virkelige datasettet. Modellen preges av en kortere oppløsningsfase ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru sammenlignet med det virkelige datasettet. Samtidig ble det fra reisetidsregistreringene konstatert at modellen har problemer med å redusere reisetiden ved enden av simuleringperioden. Avviklingsproblemene nedstrøms for Kroppan bru kan ha sammenheng med at flere kjøretøy i modellen benytter midtre kjørefelt ved økt kødannelse, før de tvinger seg inn i høyre kjørefelt. Dette er med på å forkorte køens utstrekning. Videre vil det medføre en kontinuerlig forstyrrelse av trafikkstrømmen i perioder med mye trafikk, som igjen vil resultere i en redusert oppløsningshastighet.

Det er likevel vurdert at de trafikale forholdene i modellen gir en god gjenspeiling av de faktiske forholdene på strekningen da de karakteristiske trekkene gitt av hastighetsreduksjonen ved begynnelsen av morgenrushet, den lave hastigheten gjennom perioden med størst avviklingsproblemer, samt den raske oppløsningen ved slutten av perioden er gjenskapt. Det må også bemerkes at det foreligger usikkerheter rundt hastighetsprofilen fra de virkelige registreringene, da datasettet kun inneholdt anvendbar informasjon for to hverdager. Datasett for flere dager ville gitt en mer stabil hastighetsprofil der små avvik fra trenden ville blitt utjevnet. Registreringene som benyttes er likevel ansett som en tilstrekkelig god representasjon av de generelle forholdene ved Kroppan bru gjennom morgenrushet.

Ut ifra en totalvurdering av modellens kjøring vil det kunne argumenteres for at de virkelige forholdene i analyseområdet er tilstrekkelig gjenskapt og kan benyttes videre til vurdering av tiltak gjennom endringer i nettverket.

14 Gjenskaping av virkelige forhold i en modell

Gjennom oppbyggingen av modellen for dagens situasjon på Sluppen ble det gjennomført en kartlegging av mulighetene for å spesialtilpasse simuleringsmodellen til de observerte situasjonene i analyseområdet. For å kunne gjennomføre en slik tilpasning var det nødvendig å innhente og analysere mye data, i tillegg til å kartlegge de ulike trafikkstrømmene. Dette førte til at mye tid gikk med til å observere hendelsesforløpet både ute i felt og i modellen.

For å spesialtilpasse modellen til de observerte situasjonene har sentrale delmodeller i Aimsun blitt benyttet. Da simuleringsprogrammet har en kompleks oppbygging er det mulig at programvaren inneholder flere parametere som ville vært egnet i denne sammenhengen, men som ikke har blitt benyttet.

I oppbyggingen av modellen for dagens situasjon på Sluppen ble det fokusert på å gjenskape trafikkfordelingen mellom avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og E6 mot Trondheim sentrum, samt de fem observerte situasjonene. Da trafikkfordelingen ble gitt direkte til modellen gjennom OD-matrisen var arbeidet med å gjenskape dette forholdet begrenset. Det var likevel behov for å kontrollere at hendelser oppstrøms for avkjøringsrampen ikke hindret kjøretøy i å nå sin ønskede destinasjon.

Kompleksiteten rundt gjenskapingen av situasjon 1 var relativt lav da situasjonen i stor grad knyttes til stigningen på avkjøringsrampen med ett kjørefelt. Stigningen i modellen fikk lite utslag på avviklingen på avkjøringsrampen, og da det kun er enkeltkjøretøy som får akselerasjonsutfordringer vil det være vanskelig å tilpasse modellen uten å definere egne kjøretøyklasser. Denne formen for spesialtilpasning ville også kunne påvirket avviklingen gjennom det resterende systemet, da de reduserte akselerasjonsferdighetene ville vært gjeldende for kjøretøyene gjennom hele modellen og ikke bare på spesifiserte lenker.

Situasjon 2 er knyttet til kjøretøy som foretar sene feltskifter like før avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen. Denne situasjonen var vanskelig å gjenskape da årsaken til at situasjonen oppstår i modellen er at kjøretøy ikke finner tilgjengelige luker i høyre kjørefelt før de ankommer sone 3. I virkeligheten vil situasjonen oppstå som en kombinasjon av hendelsesforløpet beskrevet over og sjåføreren som bevisst kjører forbi køen.

Programvaren legger heller ikke til rette for å registrere antallet feltskifter mellom bestemte kjørefelt. Dette gjør det utfordrende å sammenligne forekomstene fra virkeligheten og modellen. Simuleringene viser likevel at antallet sene feltskifter er lavere i modellen enn i virkeligheten. I modellen forekommer

det tilnærmet ingen sene feltskifter før avviklingsproblemene oppstrøms for avkjøringsrampen har fått en betydelig utstrekning. Da det kun er parametere fra *Lane Change Model* som kan legges til grunn for å oppnå den virkelige trafikkantadferden er det utfordrende å gjenskape situasjonen med et høyere detaljnivå uten at det går på bekostning av de andre situasjonene og den overordnede modellen.

Situasjon 3 knyttes til bussavgangenes innvirkning på trafikkstrømmen i høyre kjørefelt og ble gjennom dataanalysen vurdert som en av de mer sentrale faktorene knyttet til den totale trafikkavviklingen gjennom analyseområdet. Da situasjonen kunne tilnærmes ved bruk av node- og lenkespesifikke parametere, var det mulig å gjenskape en god representasjon av virkeligheten uten at det gikk på bekostning av den overordnede modellen og de andre situasjonene.

For å gjenskape situasjon 4 var det ikke behov for mange tilpasninger av modellen, da kjøremønsteret ble presisert gjennom implementeringen av busslinjene. Feltvalget i forkant ble i stor grad bestemt av trafikkavviklingen oppstrøms for bussholdeplassen, og i flere tilfeller valgte bussene å krysse gjennom trafikkstrømmen i høyre kjørefelt fra både midtre og venstre kjørefelt. Feltskifte fra midtre kjørefelt ble observert under befaringer, men ble i liten grad dekket av videoregistreringene. Det forelå følgelig ingen tall å kalibrere modellen opp mot i henhold til hvor ofte denne hendelsen inntraff. Det ble heller ikke funnet egnede parametere for å styre hendelsesforløpet uten at hendelsesforløpet i situasjon 5 ble betraktelig påvirket. Kjøddannelse i midtre kjørefelt oppstrøms for bussholdeplassen kan være en forklaring på at enkelte busser valgte å kjøre inn til bussholdeplassen fra venstre kjørefelt. Selv om feltskifte fra venstre kjørefelt til bussholdeplassen på høyre side av vegen ikke er en realistisk gjenskaping av de virkelige hendelsene ble effekten på det totale hendelsesforløpet anslått å være tilnærmet den samme.

På tilsvarende vis som for situasjon 4 ble hendelsesforløpet i situasjon 5 observert under befaringer, men i liten grad dekket i videoregistreringene. Ved bruk av andre registreringer ble det likevel konstatert at antall kjøretøy som legger seg inn i høyre kjørefelt over strekningen mellom Kroppan bru og avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen var betydelig. På tilsvarende vis som for situasjon 2 ble hendelsesforløpet tilpasset ved bruk av parameterne *Distance Zone* i *Lane Change Model*. Da hendelsesforløpet omhandler betydelig flere kjøretøy over en større strekning enn i situasjon 2, vil utslaget på den totale trafikkavviklingen i modellen være større. Det ble dermed fokusert på å gjenskape denne situasjonen på bekostning av situasjon 2.

Gjennom arbeidet med simuleringsmodellen ble det erfart at en detaljtilpasset modell kan gå på bekostning av den helhetlige gjenskapingen av de virkelige forholdene. Kompleksiteten vil øke med antall spesifikke hendelsesforløp som skal gjenskapes, der tilførselen av en ny situasjon kan medføre at et annet hendelsesforløp ikke oppstår. Modellen må dermed tilpasses og kalibreres på nytt.

Avhengig av hva modellen skal benyttes til vil det i mange tilfeller måtte velges mellom en overordnet korrekt modell og en modell som har en representativ gjenskaping av de ulike hendelsesforløpene. Ved oppbygging av en spesialtilpasset modell burde det dermed kun fokuseres på de mest fremtredende situasjonene som kan innvirke på den totale avviklingen.

For å oppnå en god representasjon av analyseområdet gjennom den overordnede modellen for Sluppen ble det dermed fokusert på situasjon 3, 4 og 5, samt trafikkfordelingen mellom avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og E6 mot Trondheim sentrum. Dette sørget for at de viktigste elementene i analyseområdet var representert. Hvis hver enkelt situasjon skulle blitt gjenskapt i detalj, ville det vært nødvendig å se på og modellere de ulike hendelsene isolert. Enkelte situasjoner vil også være vanskelig å gjenskape grunnet mangel på parametere for å styre den spesifikke oppførselen. Dette gjelder spesielt situasjoner der enkeltkjøretøy tar egoistiske beslutninger på bekostning av den resterende trafikkstrømmen.

Kompleksiteten av en spesialtilpasset modell øker også med utstrekningen og ved trafikkvolum som ligger opp mot kapasitetsgrensen, og gjenspeiles i store variasjoner i resultatene gitt av de ulike replikasjonene i modellen. Dette har sammenheng med at enkelte parametere kun gir utslag når bestemte situasjoner inntreffer. Innvirkningen fra de spesialtilpassede parameterne vil dermed kunne variere sterkt, avhengig av trafikksituasjonen når den utløsende årsaken inntreffer.

Spesialtilpassede modeller kan dermed introdusere større usikkerheter rundt resultater gitt etter endringer i nettverket. Videre foreligger muligheten for at den observerte trafikksituasjonen som ble modellert ikke vil være representativ ved større endringer av de trafikale forholdene, da enkelte parametere kun gir utslag når bestemte situasjoner inntreffer. Dette krever at brukeren er kjent med tilpasningene som er implementert i modellen og hvilke utslag dette kan medføre. For å redusere usikkerhetene, samt øke brukervennligheten, kan det derfor være hensiktsmessig å kun benytte spesialtilpasninger for å gjenspeile statiske forhold i nettverket.

Ved bruk av node- og lenkespesifikke tilpasninger i nettverket er det i stor grad mulig å gjenskape konkrete hendelsesforløp/detaljerte situasjoner i Aimsun. Det oppstår i midlertid problemer i tilfeller der samme parametere må benyttes for å beskrive flere handlingsmønstre, da det ikke er mulig å skille mellom parameterens innvirkning på ulike kjøretøysklasser. Avhengig av modellens bruksområde vil det derfor ofte være nødvendig å vurdere hvilke hendelsesforløp som skal gjenskapes.

Modeller er en tilnærming til virkeligheten som i hovedsak benyttes for å analysere behovet for og effekten av tiltak i nettverket. Ved å benytte modeller som kun er tilpasset ved bruk av globale parametere kan effekten av tiltak være mer entydig enn tilsvarende for spesialtilpassede modeller. Tiden som medgår til spesialtilpasning av en modell kan dermed være overflødig i henhold til videre anvendelse.

Del C: Tiltak

15 Eksisterende planer

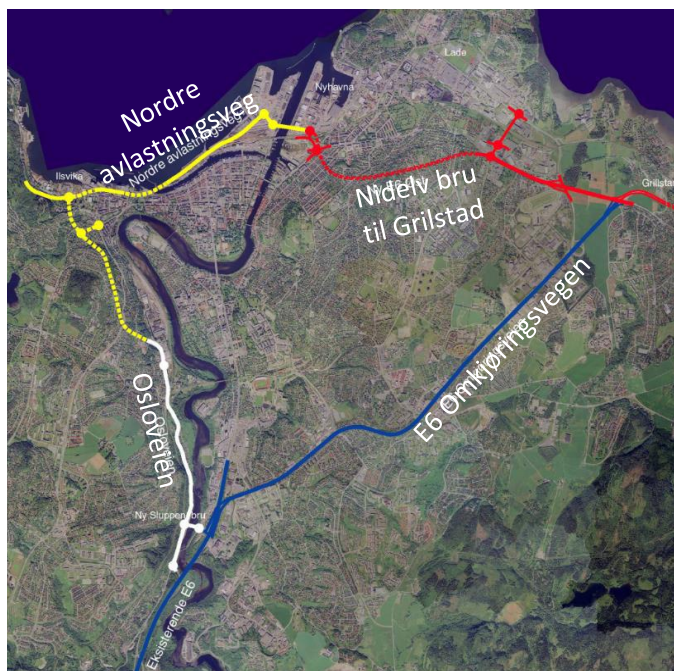
Det foreligger mange eksisterende og kommende planer for utviklingen av infrastrukturen i Trondheim. Avhengig av prosjektenes lokasjon og størrelse er dette forhold som kan innvirke på trafikkstrømmene i analyseområdet og er følgelig noe som burde tas hensyn til i videre arbeid med utvikling av konsepter for Sluppenområdet. Planer som inngår i analyseområdet, samt planer for i det tilstøtende vegnettet vil videre presenteres.

15.1 Planer for analyseområdet

Siden 1980-tallet har det foreligget planer for å avlaste Trondheim sentrum for gjennomgangstrafikk, samt legge til rette for en god og effektiv trafikkforbindelse til Fosenhalvøya, havneområdet og godsterminalen på Brattøra (Langaas et al., 2008). Konseptet som er foreslått består av et stamvegnett rundt sentrum og er illustrert i figur 15-1.

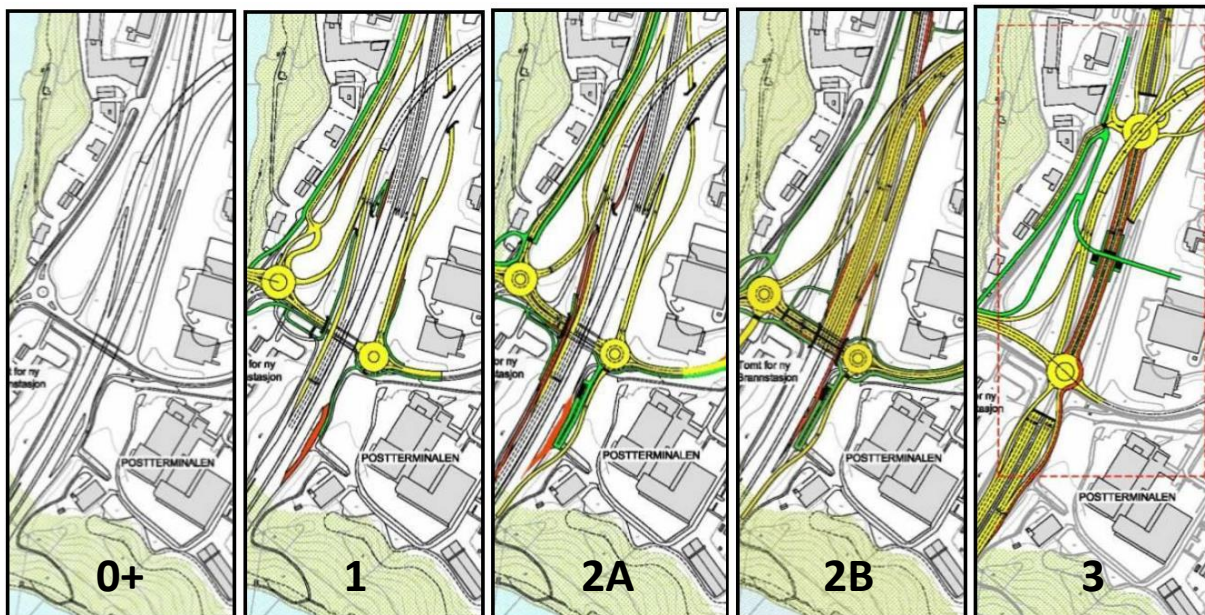
E6 Omkjøringsvegen, Nordre avlastningsveg, E6 fra Nidelv bru til Grilstad, samt strekningen Stavne – Ila langs Osloveien er ferdig utbygd. Prosjektet Stavne – Sluppen – Selsbakk langs Osloveien ligger i nær tilknytning til analyseområdet og er den siste delen av stamvegringen som ikke har blitt igangsatt. Gjennom prosjektet er det også planlagt å legge til rette for en tunnelforbindelse mellom Byåsen og Sluppen for å styrke øst-vest-forbindelsen.

Da dagens vegsystem ved Sluppenrampene ikke er dimensjonert for den forventede trafikkveksten har flere ulike konsepter for fremtidige rampeløsninger på Sluppen blitt presentert. I figur 15-2 er fem alternativer fra kommunedelplanen i 2010 (Statens vegvesen, 2009, Statens vegvesen, 2010) illustrert. Alternativ 0+ er



Figur 15-1: Fremtidig stamvegnett i Trondheim. Tegnforklaring: blå - E6 Syd og Omkjøringsvegen, gul - Nordre avlastningsveg og Stavne – Ila, rød - E6 fra Nidelv bru til Grilstad, hvit - Stavne – Sluppen – Selsbakk. (Kilde: Langaas et al., 2008)

et utbedringsalternativ av dagens vegløsning. De fire øvrige alternativene forutsetter en ny stamvegforbindelse over Nidelven og er dimensjonert for å håndtere forventet trafikkvekst fra tunnelforbindelsen til Byåsen.



Figur 15-2: Alternative kryssutforminger på Sluppen fra kommunedelplan, 2010 (Kilde: Statens vegvesen, 2010). Fra venstre til høyre er alternativ 0+, 1, 2A, 2B og 3 illustrert. Tegnforklaring: gul – kjørevege, rød – kollektivfelt/busslomme, grønn – gang-/sykkelveg.

Vegstandarden for E6 blir dimensjonert for å kunne opprettholde en fartsgrense på 80 km/t. Alle alternativene leder hovedtraseen mot sentrum, med unntak av alternativ 2B der E6 kobles direkte til Omkjøringsvegen med en ny motorvegbru. I alternativ 1-3 er det planlagt å knytte lokalvegnettet sammen med motorvegen ved bruk av rundkjøringer. Forslagene legger til rette for at trafikk på påkjøringsrampen fra Sluppenvegen skal kunne fortsette både mot sentrum og Omkjøringsvegen. Videre legger alternativ 2B og 3 til rette for rampetilknytning til E6 i både nord- og sørgående retning.

For å tilrettelegge området for kollektivtransporten er det i alternativ 2A og 2B foreslått å dedikere egne ramper for bussen. Alternativ 3 skiller seg videre ut fra de resterende forslagene ved at det legges til rette for at lokal- og kollektivtrafikken skal gå på bakkeplan, mens motorvegen legges i kulvert. Da området på Sluppen er svært trafikkert er det videre ønskelig å legge bedre til rette for myke trafikanter ved bruk av planskilte løsninger.

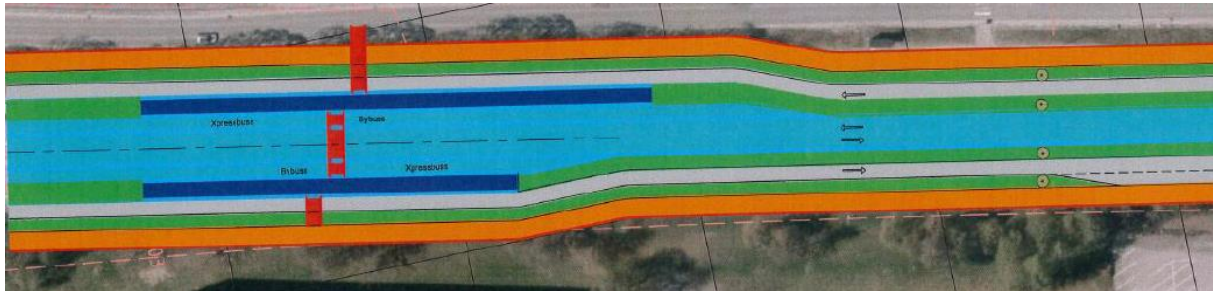
For å bedre forholdene for kollektivtransporten i Trondheim ble det i 2016 vedtatt å tilrettelegge infrastrukturen for superbusser, som skal være et attraktivt og kapasitetssterkt kollektivtilbud (Sollie et al., 2016). Gjennom superbussprosjektet vil stasjonsstrukturen langs traséene endres, noe som resulterer i færre holdeplasser. I den forbindelse er knutepunktsfunksjonen til Kroppanbrua bussholdeplass vurdert som følgende:

«Kroppanbrua som K-punkt synes i dag overflødig da Tonstadkrysset (neste holdeplass) dekker de samme bytemuligheter. Bytter mellom sentrum og Omkjøringsvegen er trolig lite brukt.» (Sollie et al., 2016, s. 26)

Muligheten for å samlokalisere dagens holdeplasser, Kroppanbrua og Bratsbergvegen, er også diskutert. En eventuell ny stasjon på Sluppen vil erstatte dagens holdeplasser, og på den måten møte anbefalingen om økt avstand mellom stasjonene.

Det er fremdeles usikkert hvordan holdeplasstrukturen på Sluppen blir (Hanssen, 2017), men for å møte kravene for superbussstandard vil det være nødvendig å utbedre holdeplassenes utforming. Dette vil kreve større tiltak og må ses i sammenheng med helheten i krysset (Sollie et al., 2016).

Muligheten for midtstilt kollektivtrasé fra Sluppen til Trondheim sentrum har også blitt utredet. Dette vil i så fall legge føringer for holdeplasstrukturen i området (Statens vegvesen, 2013). En mulig holdeplassløsning er illustrert i figur 15-3.



Figur 15-3: Mulig holdeplassløsning for en ny holdeplass på Sluppen med midtstilt kollektivfelt. Lys blå er kollektivfelt, mørk blå er plattform, grønn er kjørefelt for bil, oransje er areal for mye trafikanter og grønn er grøntrabatter. (Kilde: Statens vegvesen, 2013)

I tilknytning til superbussprosjektet i Trondheim har det også blitt diskutert rundt behovet for å utvide dagens E6 til en sammenhengende seksfelts motorveg mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen, der ett kjørefelt forbeholdes kollektivtransporten (Andersen, 2017). Kapasiteten vil ikke øke betydelig ved Tonstad da det kun er bussene som fjernes fra det tidligere systemet. Reisetiden for kollektivtransporten vil videre kunne forbedres noe.

15.2 Planer for tilstøtende vegnett

Det er mange omfattende prosjekter i nær tilknytning til vegnettet i analyseområdet, som videre vil kunne innvirke på de fremtidige trafikkstrømmene.

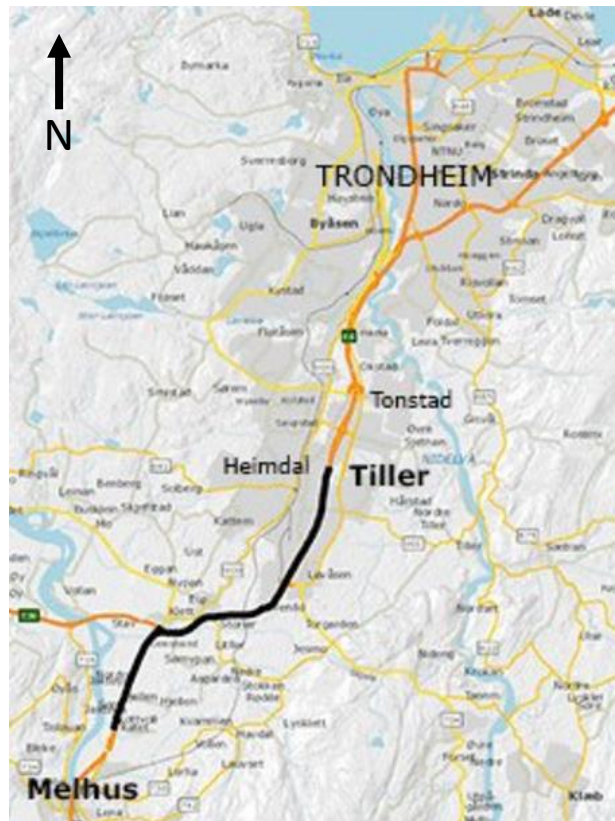
Vest for analyseområdet ligger Sluppen bru. Bruen består av to felt og ender i et lyskryss på vestsiden av Nidelven, der Tempevegen og Osloveien møtes. Tempevegen knyttes videre opp mot påkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen via Sluppenvegen. Området preges av større avviklingsproblemer gjennom rushperiodene. Det planlegges derfor å erstatte dagens tofelts bru med en firefelts bru, samt styrke forbindelsen til Byåsen med en tunnel. Kryssene vil videre utformes som rundkjøringer. Planen er illustrert i figur 15-4. Dette kan medføre økte trafikkvolum i lokalvegnettet på Sluppen, samt en jevnere fordeling av trafikken.



Figur 15-4: Illustrasjon av nye Sluppen bru (Kilde: Statens vegvesen, 2014a).

E6 traséen mellom Heimdal og Melhus ligger sør for analyseområdet og skal utvides fra dagens to felt til en firefelts motorveg (Statens vegvesen, u.å.). Strekningen er illustrert i figur 15-5. Utvidelsen kan påvirke etterspørselen på Tonstad og videre innvirke på det totale trafikkvolumet og fordelingen som forekommer gjennom morgenrushet. Da etterspørselen fra påkjøringsrampene på Tonstad er høy vil det kunne oppstå avviklingsproblemer på vegstrekningen nedstrøms for Tonstadkrysset, som kun består av to kjørefelt i nordgående retning. Prosjektet vil også kunne gi en innvirkning på avviklingen ved Sluppenrampene, men effekten vil begrenses av kapasiteten ved Tonstad.

For å kunne implementere disse endringene i nettverket vil det være nødvendig å innhente informasjon rundt forventede endringer av trafikkstrømmene. Da datainnsamlingen ville vært en tidkrevende prosess ble endringene utelatt i modellen. Simuleringsmodellen tar derfor kun utgangspunkt i dagens situasjon i det tilstøtende vegnettet.



Figur 15-5: Illustrasjon over strekningen som skal utbedres mellom Heimdal og Melhus (Kilde: Statens vegvesen, u.å.)

16 Mulige tiltak

Det er mange typer tiltak som kan innføres for å bedre avviklingen på Sluppen, men størrelsen og omfanget vil variere i stor grad. Videre er ulike tiltak presentert i fire til dels overlappende hovedkategorier: mindre fysiske tiltak, adferdsendrende tiltak, tiltak som reduserer innvirkningen fra bussen og nye konseptuelle løsninger.

16.1 Mindre fysiske tiltak

Analysene viser at utformingen av krysset er dårlig tilpasset de faktiske trafikkstrømmene. Det er derfor nærliggende å se på mindre fysiske tiltak som kan endre på utformingen. Å utvide avkjøringsrampen til to kjørefelt vil være mulig å gjennomføre uten å gjøre store inngrep i resten av vegsystemet. Dette vil kunne hindre en hastighetsreduksjon grunnet overbelastning av vegnettet ved å øke kapasiteten på avkjøringsrampen. Innvirkningen fra situasjon 1 vil også bli vesentlig redusert, da det vil være mulig å passere et kjøretøy med akselerasjonsutfordringer. Hovedutfordringen vil være at konflikten med bussene øker, da de tvinges til å krysse flere kjørefelt på en relativt kort strekning for å kunne fortsette videre mot Trondheim sentrum. I kombinasjon med høyere hastighet vil økt trafikkvolum i midtre kjørefelt kunne gjøre et feltskifte vanskeligere. Dette gjør at tiltaket ikke kan regnes som trafiksikkerhetsmessig forsvarlig uten å finne en ny løsning for bussen.

Et mindre tiltak som også vil ha samme konflikt med bussen er å dedikere to kjørefelt til trafikk som skal til E6 Omkjøringsvegen, uten å endre selve rampen. Det vil da være mulig å oppnå glidelåsfletting rett i forkant av avkjøringsrampen. Dette vil redusere kølengden, da kjøretøyene i køsituasjonen vil disponere to kjørefelt, men gjennomstrømningen på avkjøringsrampen vil trolig ikke endres mye da trafikkvolumet allerede ligger opp mot kapasitetsgrensen. Hvorvidt glidelåsflettingen blir optimal eller ikke vil også ha stor betydning for avviklingen på avkjøringsrampen. Hvis ikke begge kjørefeltene blir benyttet helt ut vil det kunne oppstå en hastighetsforskjell mellom de to kjørefeltene som vanskeliggjør en optimal glidelåsfletting.

Det er også naturlig å påpeke utfordringene dette tiltaket vil kunne skape. De tunge kjøretøyene tvinges til å flette rett i forkant av en stigning, noe som vil kunne gi dårligere avvikling på avkjøringsrampen initiert av akselerasjonsutfordringer. Tiltaket vil også redusere kapasiteten inn mot Trondheim sentrum både gjennom et redusert antall kjørefelt og økt innvirkningen fra saktegående trafikk i midtre kjørefelt, samtidig som kapasiteten er den samme på avkjøringsrampen til E6

Omkjøringsvegen. Tiltaket er dermed ikke langsiktig, sett i perspektivet av en mulig fremtidig trafikkvekst.

Begge de foregående tiltakene tar sikte på å øke avviklingen gjennom den fysiske flaskehalsen. Det er også mulig å implementere tiltak som hindrer sene feltskifter, og dermed at situasjon 2 oppstår. Et eksempel kan være å innføre en sperrelinje som forbyr feltskifter mellom høyre og midtre kjørefelt i området mellom avkjøringsrampen og bussholdeplassen. Denne formen for sperrelinje vil også hindre bussen i å gjennomføre et feltskifte for å unngå køen, men ikke hindre den i å fortsette mot Trondheim sentrum. Tiltaket vil dermed redusere fremkommeligheten til bussen i et forsøk på å bedre den samlede trafikkavvikling. Hvorvidt sperrelinjene vil bli overholdt er uvisst, men det er også mulig å innføre tiltaket som en fysisk sperre mellom kjørefeltene. Dette vil igjen skape trafiksikkerhetsmessige utfordringer.

Et tiltak for bussen kan være en sperrelinje som tillater bussen å skifte fra høyre til midtre kjørefelt, samtidig som feltskifter fra midtre til høyre kjørefelt forbys. Det vil fortsatt være knyttet stor usikkerhet til hvorvidt en sperrelinje ville blitt overholdt. De sene feltskiftene er ofte en bevisst handling fra sjåførenes side, og i kombinasjon med eventuell slitasje på vegmerkingen og muligheter for snø i vegbanen gjennom vinteren vil det være stor sannsynlighet for at trafikantadferden ikke endres i vesentlig grad.

Felles for begge sperretypene er muligheten for en forskyving av problemet til begynnelsen av sperren, fremfor en forhindring av adferden. Det er også en mulighet for at flere kjøretøy mister avkjøringen, og må fortsette ufrivillig mot Trondheim sentrum. Da situasjon 2, i kombinasjon med de andre situasjonene, også vil kunne ha en positiv innvirkning på trafikkavviklingen på avkjøringsrampen vil tiltak som forhindrer den helt fra å oppstå også kunne forverre avviklingskvaliteten.

16.2 Adferdsendrende tiltak

Endret adferd blant trafikantene vil i mange tilfeller forbedre trafikksituasjonen (Aakre et al., 2016). Problemet med denne formen for tiltak er at de er vanskelig å gjennomføre i praksis. Egenskaper som det er nærliggende å se på for å bedre trafikkavviklingen er redusert reaksjonstid og bedre oppfølging av tids- og avstandsluker. Dette gjelder spesielt i kjøpløsningsssituasjonene. Endring av etterspørselsfordelingen vil også kunne gi store forbedringer i trafikksituasjonen på Sluppen.

Gjennom befaringene og videoregistreringene ble det observert store luker i oppløsningsfasen som en konsekvens av dårlig oppfølging av tids- og avstandslukene til foranliggende kjøretøy. De manuelle videoregistreringene viste at trafikkvolumet ved avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen lå opp mot kapasiteten. Ved å ta utgangspunkt i en maksimal kapasitet på 2100 kjt/t ville det fremdeles teoretisk sett vært mulig å få gjennom 30 kjøretøy ekstra i 5 minuttersintervallene med lavest belastning. I praktisk vil dette være vanskelig å oppnå da det samtidig øker sannsynligheten for sammenbrudd hvis trafikkstrømmen skulle bli forstyrret. Redusert reaksjonstid og bedre oppfølging i oppløsningsfasen ville likevel kunne optimalisere trafikkvolumet på avkjøringsrampen. Omfanget av forbedringen ville likevel vært begrenset, og tilbudet på avkjøringsrampen ville fremdeles vært lavere enn etterspørselen.

På samme måte som de mindre fysiske tiltakene vil adferdsendrende tiltak kunne rettes direkte mot situasjon 2. Da feltskiftet ofte er en bevisst handling vil tiltak rettet mot de aktuelle sjåførene kunne føre til en adferdsendring. Effekten av tiltaket vil derimot kunne være negativ hvis det ikke innføres tiltak mot bussens innvirkning på trafikkstrømmen oppstrøms for avkjøringsrampen, da det vil hindre utnyttelse av lukene i trafikkstrømmen for å optimalisere avviklingen.

Utfordringen med adferdsendrende tiltak er gjennomføringen. Annet enn oppfordringer og informasjon rettet mot sjåførene er det mulig å se på ITS-tiltak som dynamiske informasjonsskilt og detektorer som varsler om ønsket hastighet for best mulig trafikkavvikling, ITS-applikasjoner i kjøretøyene og andre former for opplysning. Felles for alle er at det er opp til sjåføren å bestemme hvordan vedkommende vil forholde seg til informasjonen. Det er dermed vanskelig å vite om tiltakene vil ha noen form for effekt.

Det er også mulig å se på adferdsendrende tiltak som endrer etterspørselen fremfor å øke kapasiteten. En utjevning av trafikken over morgenrushet vil kunne hindre at etterspørselen overstiger kapasiteten på avkjøringsrampen. Dette vil igjen kunne forhindre avviklingsproblemene gjennom flaskehalsen og den resulterende kødannelsen, såfremt ikke forstyrrelser oppstrøms for flaskehalsen reduserer avviklingskvaliteten.

Fordelingen av etterspørselen er vanskelig å kontrollere og vil i stor grad avhenge av sjåførenes kjennskap til perioder som preges av større avviklingsproblemer. Avhengig av omfanget og sjåførenes mulighet til å tilpasse seg forholdene ved å fremskynde eller utsette reisen, vil en tilpasning til kjente trafikale forhold reduserer omfanget av avviklingsproblemene. Tilpasningen gjøres likevel ikke tidlig nok i virkeligheten, da de første kjøretøyene som er med på å overskrider kapasitetsgrensen ikke vil oppleve større forsinkelser og er med på å initiere avviklingsproblemene.

For å redusere eller utjevne etterspørsel vil det være behov for å øke de de generaliserte kostnadene forbundet med reisen. Dette kan for eksempel gjøres gjennom innføring av tidsdifferensierte takster i bomsnittet på Tonstad. Det er også mulig å innføre nye bomsnitt, eller heve de eksisterende takstene. Etterspørselen kan også reguleres gjennom tilfartskontroll. Dette er delvis tilfellet i dag da trafikken fra påkjøringsrampen på Tonstad kommer fra et lysregulert kryss. Lyssyklusen er derimot ikke tilpasset med tanke på etterspørselsregulering mot E6 Omkjøringsvegen.

16.3 Tiltak som reduserer innvirkningen fra bussen

Tidligere har situasjon 3 blitt trukket frem som den situasjonen med størst negativ effekt på den totale trafikkavviklingen etter at kødannelsen initieres av den fysiske flaskehalsen. Dette gjør det nærliggende å se på tiltak der påvirkningen fra bussen reduseres. Et enkelt tiltak kan være å flytte Kroppanbrua bussholdeplass til sentrumssiden av avkjøringsrampen. Dette vil fjerne konflikten mellom bussene og den tette trafikken i høyre kjørefelt.

Bussholdeplassen er i dag definert som et knutepunkt som muliggjør omstigning mellom busser som kjører på E6 Omkjøringsvegen og busser som kjører videre mot Trondheim sentrum. En flytting av bussholdeplassen vil dermed kunne skape utfordringer med å opprettholde knutepunktfunksjonen.

Et tiltak kan være å anlegge to holdeplasser, én på avkjøringsrampen for busser mot E6 Omkjøringsvegen og én langs E6 på sentrumssiden av avkjøringsrampen. Dette vil igjen skape utfordringer, da bussen på avkjøringsrampen må krysse over påkjøringsrampen fra Sluppenvegen for å komme til den nye bussholdeplassen. Det vil også kreve omfattende tilrettelegging for fotgjengere og syklistene for å øke tilgjengeligheten mellom bussholdeplassene. I dagens utforming utgjør vegsystemet en stor barriere, og gangavstanden mellom de to bussholdeplassene ville blitt 1,5 – 2 km, selv om luftlinjen mellom bussholdeplassene kunne vært under 50 meter. To ulike gangtraséer mellom holdeplassene, med utgangspunkt i dagens infrastruktur, er illustrert i figur 16-1. Uten en ny forbindelse mellom holdeplassene vil løsningen kunne sammenlignes med å argumentere for at de eksisterende bussholdeplassene Bratsbergvegen og Omkjøringsvegen Klæbuveien skulle erstattet Kroppanbrua som kollektivknutepunkt.



Figur 16-1: Illustrasjon av eksisterende og mulige fremtidige bussholdeplasser på Sluppen. Stiplede linjer viser mulig gangtrasé mellom de nye bussholdeplassene gitt dagens infrastruktur. (Kartgrunnlag hentet fra kartverket)

Ved å flytte bussholdeplassen nærmere sentrum vil det også være naturlig å vurdere avstanden mellom holdeplassene og ønsket dekningsområde. Med dagens holdeplasslokalisering er det ca. 1 km mellom holdeplassene Kroppanbrua og Bratsbergvegen. I motsatt retning er det ca. 3,3 km til neste bussholdeplass, som er kollektivknutepunktet i Tonstadkrysset. E6 mellom Tonstadkrysset og Kroppanbrua går gjennom et området med lite bebyggelse, og har lite behov for kollektivdekning. Kroppanbrua bussholdeplass betjener dermed i dag kun områder på Sluppen, nord og øst for Nidelva.

Ved å flytte Kroppanbrua bussholdeplass nærmere Bratsbergvegen vil de få et større overlappende betjeningsområdet. Tilbudet på Sluppen vil også reduseres da holdeplassen vil være på motsatt side av barrieren vegsystemet utgjør. En løsning kan være å gjøre som det er foreslått i superbussprosjektet, å erstatte dagens holdeplasser med en ny stasjon mellom Bratsbergvegen og Kroppanbrua, og overlate knutepunktets funksjonen til Tonstadkrysset. Dette vil derimot kunne skape en omveg for passasjerer som benytter seg av dagens knutepunktets funksjon på Kroppanbrua bussholdeplass, selv om dette er antatt å være få (Sollie et al., 2016). Det vil også være nødvendig å løse tilgjengelighetsproblematikken for passasjerene.

For å redusere innvirkningen fra bussen vil det også være mulig å anlegge en midtstilt kollektivtrasé. Dette vil skille kollektivtrafikken fra den saktegående trafikkstrømmen i høyre kjørefelt, men kan gå på bekostning av kapasiteten mot Trondheim sentrum. Midtstilt kollektivtrasé er blant annet utredet i forbindelse med superbussprosjektet, men da for strekningen etter avkjøringsrampen, i en kombinasjon med flytting av holdeplassen (Statens vegvesen, 2013). Det vil derimot være utfordrende å anlegge midtstilt kollektivtrasé på Sluppen, da det selv med planskilte kryssinger for fotgjengere ikke er anbefalt hvis fartsgrensen er høyere enn 60 km/t (Frøyland et al., 2014). Det vil også være plasskrevende og utfordrende å anlegge et attraktivt holdeplassområde i senter av vege, da ventende passasjerer må skjermes mot trafikk med høy hastighet.

I grenseland over mot en ny konseptuell løsning er det mulig å innføre tiltak som fjerner bussavgangen, men beholder dagens innkjøring. Dette kan for eksempel være en bussterminalløsning eller et eget vegsystem der bussen kjører utenom selve kryssløsningen.

En terminalløsning vil i større grad kunne samle alle bussrutene i et felles knutepunkt, men krever også at alle bussene må kjøre av E6 for å komme til stasjonen. Dette vil kreve større ombygginger for å dekke rampebehovet til bussene, i tillegg til utbygging av selve terminalområdet. Ankomstløsningen til dagens bussholdeplass vil videre kunne benyttes som begynnelsen på en avkjøringsrampe. Samtidig vil en terminal kunne bryte med ønsket om økt kollektivprioritering, da dette kan utgjøre en omveg for bussene, noe som igjen vil øke reisetiden.

Et vegsystem der bussen kjører utenom selve kryssløsningen gjør det mulig å beholde dagens holdeplass samtidig som konflikten med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt minimeres. Vegsystemet kan videre kobles opp mot E6 i retning Trondheim sentrum etter avkjøringsrampen, og påkjøringsrampen fra Sluppenvegen mot E6 Omkjøringsvegen.

16.4 Nye konseptuelle løsninger

En helt ny konseptuell løsning kan ta utgangspunkt i at dagens situasjon med de begrensninger den er utformet etter sees bort ifra. Dette gjør at den nye løsningen kan designes i henhold til faktiske trafikkstrømmer. Det er da nærliggende å se for seg en løsning der det er trafikken som skal fortsette mot Trondheim sentrum som må via en avkjøringsrampe, mens gjennomgangstrafikken til E6 Omkjøringsvegen fortsetter på hovedvegen. Avkjøringsrampen til sentrum kan anlegges på høyre side ved å krysse under Omkjøringsvegen. Det er også mulig å benytte en mer utradisjonell løsning der

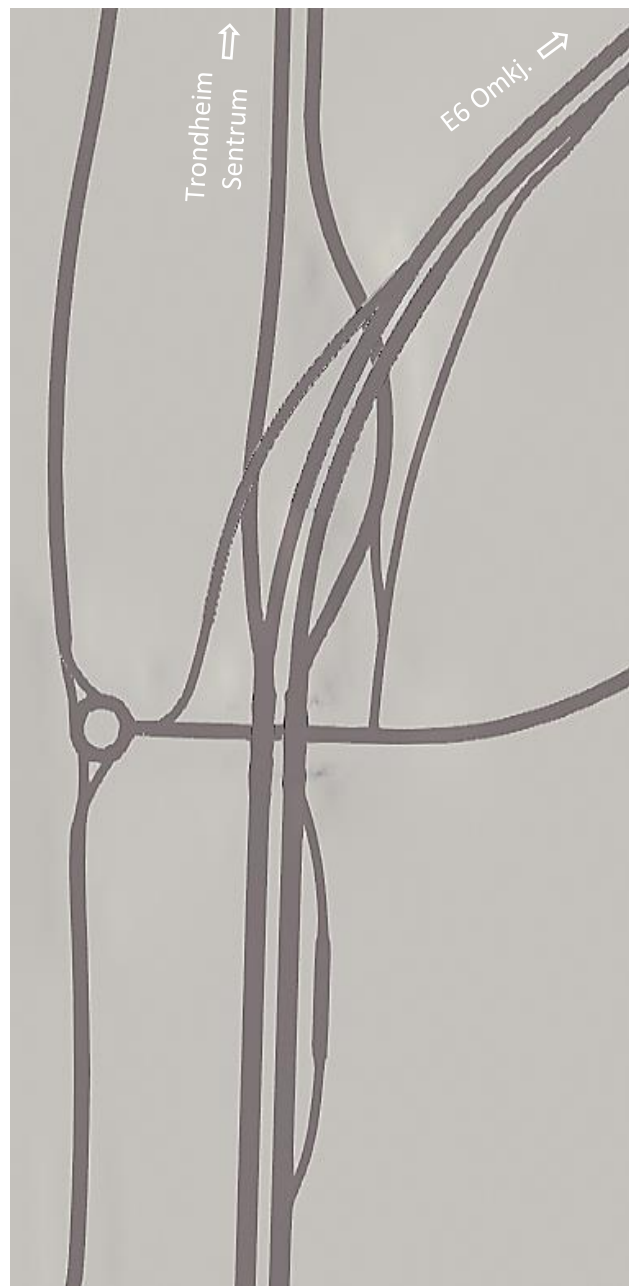
avkjøringsrampe anlegges på venstre side. Fordelen med dette alternativet er at det vil kreve mindre ombygging av dagens kryssløsning, men forslaget må utredes i henhold til et trafiksikkerhetsmessig perspektiv.

Videre tilrettelegging av Sluppenrampene må ses i lys av hvilke trafikkstrømmer som er dimensjonerende og hvilke vegforbindelser som skal knyttes sammen via rampene. Skal forbindelsen mellom nord, sør, øst og vest sentreres i et punkt for alle kjøreretninger vil dette være en plasskrevende og kompleks løsning. I dagens situasjon dekkes Sluppenområdet av to planfrie kryssløsninger: krysset ved Bratsbergvegen og Sluppenrampene. Ved å inkludere en rundkjøring ca. 250 meter sør for E6 Omkjøringsvegen, vil krysset ved Bratsbergvegen dekke alle svingebevegelsene. Sluppenrampene knytter E6 Omkjøringsvegen til Sluppenvegen gjennom én påkjøringsrampe i nordgående retning og én avkjøringsrampe i sørgående retning. For å benytte de to resterende svingebevegelsene må enten krysset ved Bratsbergvegen eller rampene ved Osloveien benyttes. Nye kryssløsninger vil i stor grad avhenge av etterspørselen fra den nye vegforbindelsen over Nidelva, samt den forventede fordelingen av trafikkstrømmen. Ved kun å beholde dagens rampetilkobling til E6 Omkjøringsvegen er det dermed forventet en økt belastning i lokalvegnettet.

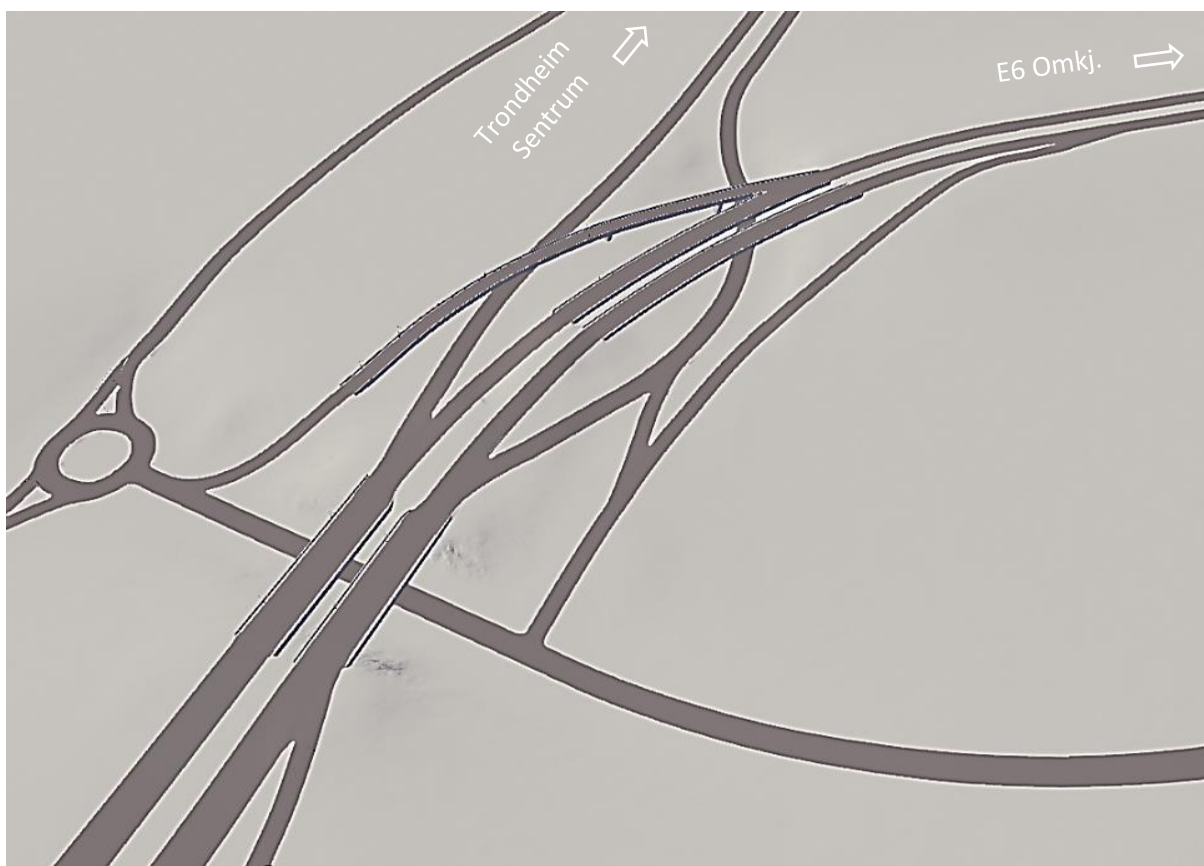
Gjennom utformingen må det også tas stilling til hvordan kollektivtransporten skal prioriteres gjennom systemet og hvor det er hensiktsmessig å anlegge bussholdeplasser, samt hvorvidt en forbindelse til Byåsen vil øke aktualiteten av Sluppen som et kollektivknutepunkt. Det vil også være nødvendig å vurdere tilgjengeligheten for gående og syklende i området.

Videre er to alternativer for å bedre trafikkavviklingen på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen illustrert. Løsningene tar kun forholdene på E6 syd i betraktning, og vil ikke fungere som fullverdige alternativer ved større endringer av det tilstøtende vegnettet.

I alternativ 1 blir koblingen mellom E6 syd og E6 Omkjøringsvegen den gjennomgående traséen. Videre blir den utvidet til to kjørefelt. Tilknytningen til sentrum vil anlegges som en avkjøringsrampe på høyre side og vil bestå av to kjørefelt i hver retning som føres under hovedtraséen. Her kan det vurderes å reservere eller legge til et ekstra kjørefelt for kollektivtransport. Videre kobles påkjøringsrampen fra Sluppenvegen både mot sentrum og E6 Omkjøringsvegen. Alternativet er illustrert i figur 16-2 og figur 16-3.



Figur 16-2: Oversiktspåtegning av alternativ 1: Hovedtrasé fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen. Forslaget er kun en illustrasjon.



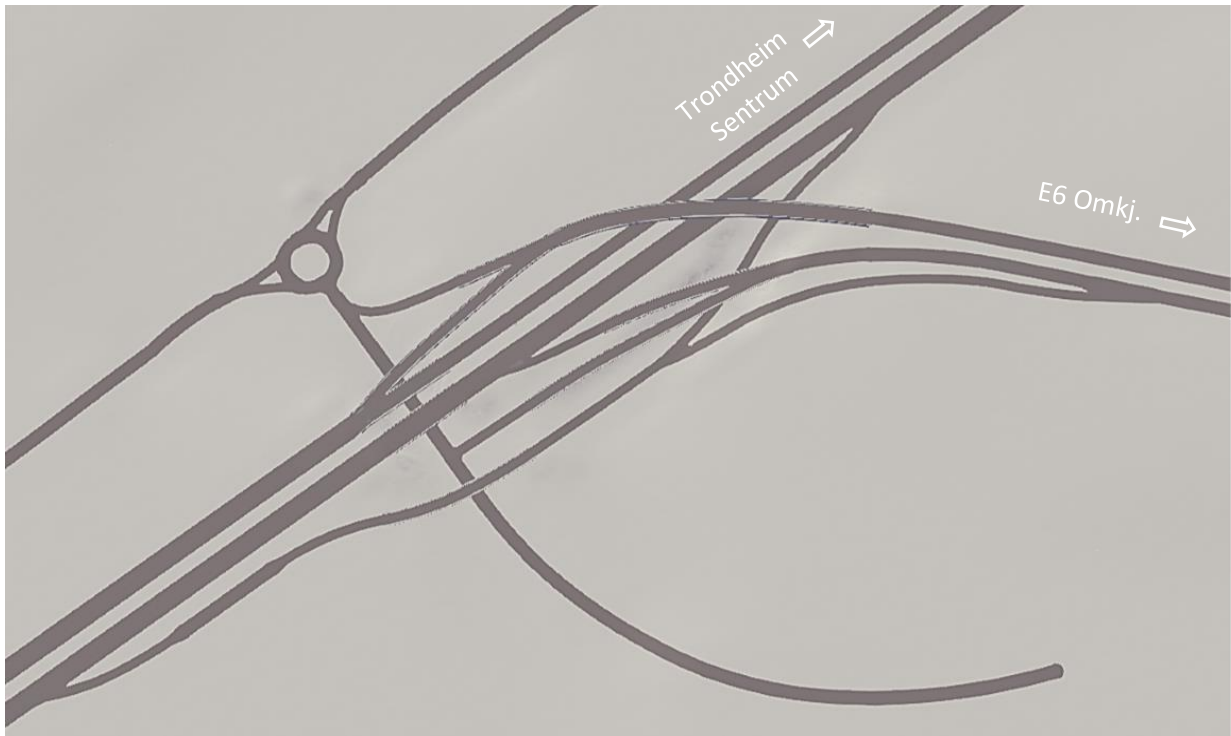
Figur 16-3: Detaljbilde av alternativ 1: Hovedtrasé fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen. Forslaget er kun en illustrasjon.

Løsningen vil beholde dagens bussholdeplass, men da det anlegges en ny avkjøringsrampe til Trondheim sentrum på høyre side vil konflikten mellom den tette trafikken i høyre kjørefelt og bussen reduseres. Videre vil det kunne oppstå utfordringer knyttet til bussruter som benytter E6 Omkjøringsvegen, da bussene må krysse gjennom høyre kjørefelt for å kunne fortsette på hovedtraséen.

Da det er betydelig færre avganger til E6 Omkjøringsvegen sammenlignet med Trondheim sentrum, vil eventuelle konflikter som oppstår mellom bussene og de resterende trafikantene reduseres betydelig. Det er likevel forventet at hastigheten på strekningen gjennom morgenrushet vil øke, noe som medfører at alternativet har noen trafiksikkerhetsmessige utfordringer knyttet til bussene.

I alternativ 2 er utkjøringen fra bussholdeplassen plassert oppstrøms for influensområdet til flaskehalsen. Dette innebærer at det må anlegges en ny bru over Sluppenvegen eller et nytt krysningpunkt i plan. Sistnevnte alternativ kan videre medføre at andre trafikanter fra E6 syd benytter bussholdeplassen som en avkjøringsrampe til Sluppenområdet. Samtidig vil en krysning i plan kunne tilrettelegge for en terminalløsning på Sluppen.

I alternativ 2 legges det opp til en planfri kryssing av Sluppenvegen. Fra bussholdeplassen anlegges det videre to påkjøringsramper mot henholdsvis E6 i retning Trondheim sentrum og E6 Omkjøringsvegen. Ved å forskyve krysningpunktet over Sluppenvegen vil dagens påkjøringsrampe fra Sluppenvegen kunne beholdes. Videre kan påkjøringsrampen mot E6 i retning Trondheim sentrum føres under E6 Omkjøringsvegen. Påkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen kan anlegges nedstrøms for påkjøringsrampen fra Sluppenvegen. Alternativet er illustrert i figur 16-4 og figur 16-5



Figur 16-4: Oversiktsbilde av alternativ 2: Ny utkjøring fra bussholdeplassen. Forslaget er kun en illustrasjon



Figur 16-5: Detaljbilde av alternativ 2: Ny utkjøring fra bussholdeplassen. Forslaget er kun en illustrasjon

17 Modellering av tiltak

Spesialtilpassede modeller kan introdusere en større usikkerhet til resultatene etter at tiltak som medfører vesentlige endringer av de trafikale forholdene implementeres i nettverket. Gjennom modelleringen av tiltak ble resultatene derfor kontrollert opp mot tilsvarende modeller der de lenkespesifikke parameterne var deaktivert. I tilfeller der resultatet av tiltaket gitt av de to modellene er relativt like vil kun resultatene fra den spesialtilpassede modellen presenteres.

For å se på effekten av de ulike tiltakene vil reisetiden mellom Tonstad og avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen, samt hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru benyttes. Sammenligningen baseres på resultatene gitt av modellen før og etter endringer i nettverket. Videre er valg av tiltak, gjennomføringen og resultatet av modelleringen av tiltak alene og i kombinasjon, samt usikkerheter ved bruk av spesialtilpassede modeller presentert.

17.1 Utelatte tiltak

Fra idemyldringen ble potensielle tiltak i nettverket kartlagt. Grunnet begrensninger som foreligger i registreringer av trafikkarakteristiske parametere i felt og simuleringsverktøyet Aimsun, er det noen av tiltakene som ikke er egnet til å analyseres ved bruk av modellen.

Den direkte effekten av ITS-tiltak, som har til hensikt å forbedre reaksjonstid, er vanskelig å analysere i en modell. Reaksjonstiden som angis i Aimsun benyttes i stor grad for å kalibrere modellen og vil derfor ikke være en direkte gjenspeiling av den virkelige reaksjonstiden. Videre vil registrert effekt av ulike ITS-tiltak være vanskelig å kvantifisere i representative utslag for reaksjonstiden i modellen.

I modellen oppstår de sene feltskiftene som en følge av at det ikke finnes tilgjengelige luker i sone 2, og er derfor ikke ansett som en planlagt handling. Ved å innføre sperrelinjer i forkant av avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen vil ikke adferdsmønsteret i modellen tilpasses de nye forholdene. Dette vil resultere i at kjøretøy som kommer inn i sone 3 mister avkjøringen og må kjøre videre mot Trondheim sentrum, noe som resulterer i mindre trafikk på avkjøringsrampen i periodene med størst avviklingsproblem. I virkeligheten ville kjøretøy tilpasset seg ved å legge seg over i høyre kjørefelt ved et tidligere tidspunkt. En sammenligning mellom effekten av tiltaket i modellen og i virkeligheten vil følgelig være vanskelig å gjennomføre, da utfallene vil være av vesentlig forskjell. Det ble derfor valgt å ikke modellere disse tiltakene.

Gjennom kartleggingen av mulige tiltak ble også en løsning der to felt på hovedvegen dedikeres til dagens avkjøringsramp presentert. Tiltaket er mulig å modellere i Aimsun, men da det ikke vil medføre større bedringer av den totale trafikkavviklingen ble det utelatt fra videre modellering.

17.2 Modellering av enkelttiltak

Gjennom modelleringen av enkelttiltak ble effekten av de største bidragsyterne til reduksjon av den totale trafikkavviklingen på Sluppen analysert. Tiltakene som ble valgt ut er knyttet til selve avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen, innvirkningen av bussholdeplassens plassering i influensområdet til flaskehalsen og fordelingen av etterspørselen gjennom morgenrushet. Følgende fire tiltak ble analysert:

- Utvide avkjøringsrampen til to kjørefelt
- Fjerne innvirkningen fra bussavgangene
- Fjerne bussholdeplassen fra influensområdet til flaskehalsen
- Utjevne etterspørselen gjennom morgenrushet

17.2.1 Utvide avkjøringsrampen til to kjørefelt

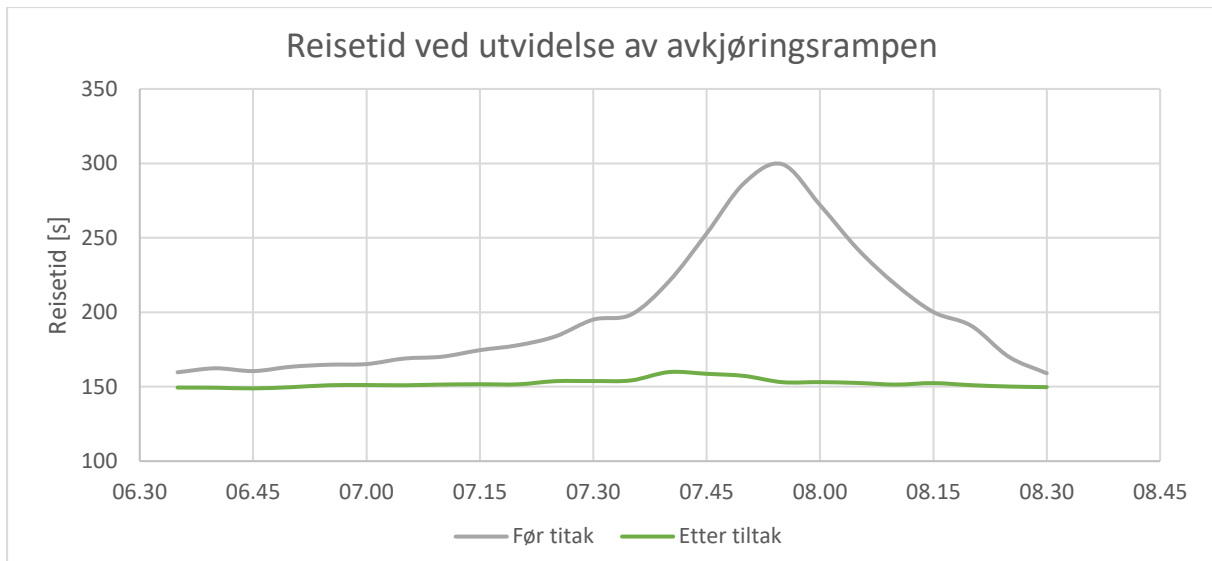
Avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen er den fysiske flaskehalsen i analyseområdet, der kapasiteten er betydelig lavere enn i det tilstøtende nettverket. Dette forholdet er ansett som den direkte utløsende årsaken til den reduserte avviklingskvaliteten gjennom morgenrushet. Avkjøringsrampen fra E6 fletter sammen med påkjøringsrampen fra Sluppenvegen og fortsetter videre som en firefelts motorveg. Det gjennomsnittlige trafikkvolumet fra Sluppenvegen ligger i overkant av 500 kjt/t i makstimen og viser til at det er tilgjengelig kapasitet oppstrøms for rampene.

Da den dimensjonerende trafikkstrømmen kommer fra E6 syd ble det gjennomført et tiltak i nettverket der avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen ble utvidet til to kjørefelt. Dette gjorde avkjøringsrampen til den gjennomgående traséen på E6 Omkjøringsvegen. Midtre kjørefelt på E6 syd ble koblet mot både sentrum og E6 Omkjøringsvegen for å bedre fordeling mellom etterspørselen og kapasiteten i vegnettet. Påkjøringsrampen fra Sluppenvegen ble flette sammen med høyre kjørefelt på E6 Omkjøringsvegen. Videre forble vikepliktsforholdet ved utkjøringen fra bussholdeplassen uendret. Løsningen er illustrert i figur 17-1.



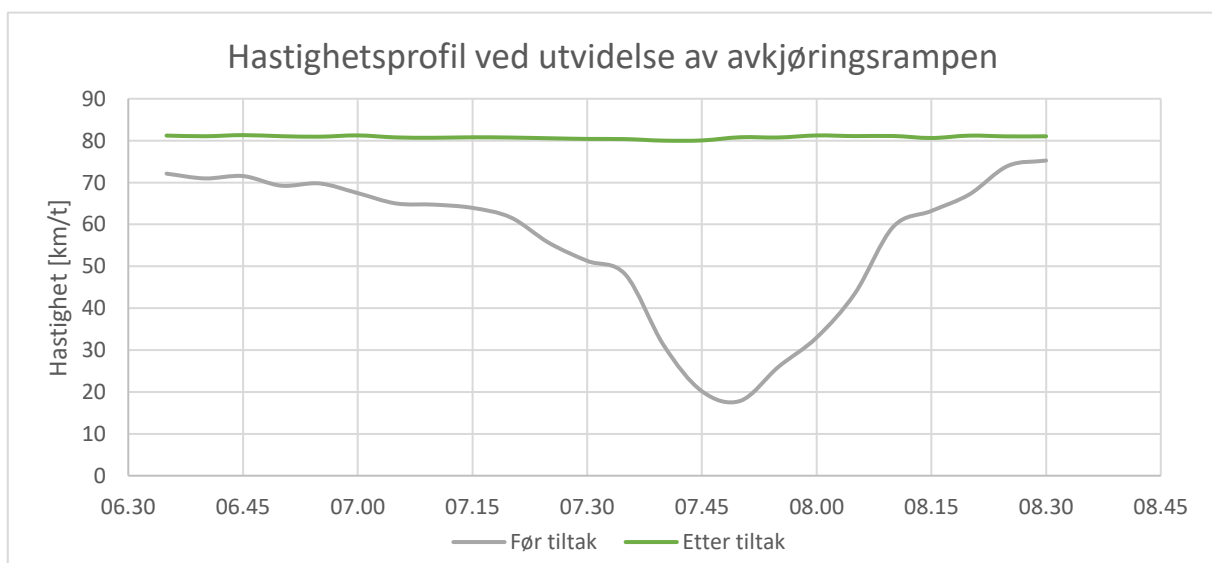
Figur 17-1: Utvidelse av avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen til to kjørefelt (t.v) og feltilknytningen fra E6 syd (t.h).

Ved å utvide avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen til to kjørefelt er den fysiske flaskehalsen fjernet, og det oppstår følgelig ingen avviklingsproblemer gjennom morgenrushet. Dette gjenspeiles i sammenligningen av reisetiden i modellen før og etter at tiltaket ble implementert, og er illustrert i figur 17-2.



Figur 17-2: Sammenligning av reisetid før og etter utvidelse av avkjøringsrampen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Fra figuren fremkommer det at modellens normale reisetid på strekningen mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen ligger rundt 150 sekunder. I perioden mellom 07:40 og 07:50 kan en minimal økning i reisetiden observeres sammenlignet med den resterende perioden etter at tiltaket ble implementert. Dette viser videre at etterspørselen er størst innenfor dette tidsrommet. Reisetiden innenfor tilsvarende tidsrom i grunnmodellen øker jevnt innenfor hele intervallet. Dette har en sammenheng med at kapasiteten overskrides og resulterer i en betydelig reduksjon av den totale avviklingskvaliteten. Fra grunnmodellen øker den forventede reisetiden til det dobbelte av normal reisetid før reduksjonen begynner rundt 07:55, etter at etterspørselen blir tilstrekkelig redusert. Ved innført tiltak er reisetiden i det samme intervallet tilbake til den normale. Dette forholdet gjenspeiles også i hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru, vist i figur 17-3.



Figur 17-3: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter utvidelse av avkjøringsrampen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Etter at tiltaket er implementert fremkommer det ingen synlige innvirkninger fra den økte etterspørselen ved detektoren på Kroppan bru, som ligger ca. 750 meter oppstrøms for avkjøringsrampen. Videre viser hastighetsprofilen i høyre kjørefelt at fartsgrensen kan opprettholdes gjennom hele simuleringsperioden. Ved å utvide avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen til to kjørefelt kommer det tydelig frem av resultatene at avviklingsproblemene i analyseområdet løses. Som tidligere beskrevet i kapittel 16 vil det imidlertid oppstå problemer knyttet til utkjøringen fra bussholdeplassen ca. 200 meter oppstrøms for rampen. Ved å utvide avkjøringsrampen til to kjørefelt tvinges bussene som skal mot sentrum til å krysse gjennom høyre kjørefelt. Da tiltaket også medfører at avviklingsproblemene ved bussholdeplassen forsvinner, vil hastighetsdifferansen mellom bussene og de resterende kjøretøyene være betydelig høyere. Det anses derfor ikke som trafiksikkerhetsmessig forsvarlig å gjennomføre dette tiltaket alene.

17.2.2 Redusere innvirkningen fra bussen

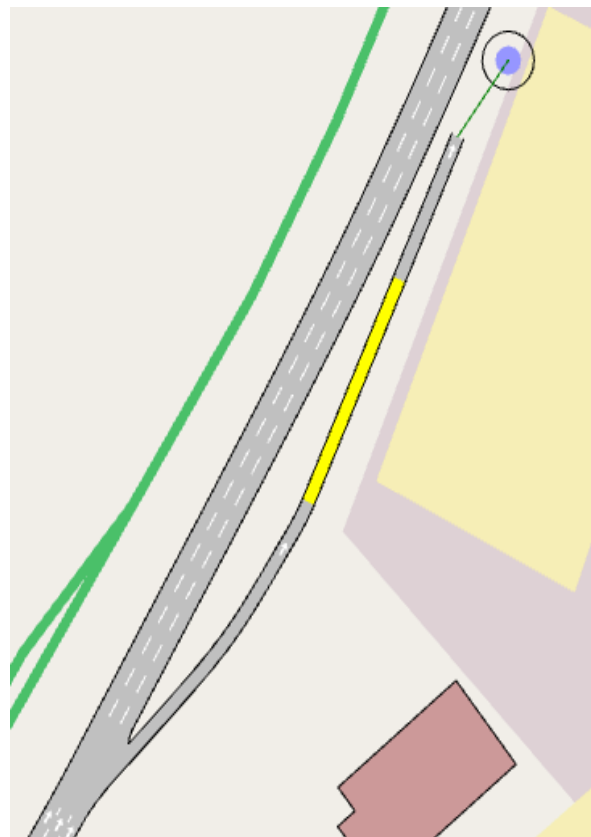
De største avviklingsproblemene i systemet forekommer like før den fysiske flaskehalsen, og markerer overgangen mellom to kapasitetsgrenser. Utkjøringen fra bussholdeplassen er som tidligere nevnt plassert ca. 200 meter oppstrøms for rampen og vil ligge innenfor influensområdet til flaskehalsen gjennom hele morgenrushet. Videre er det forventet at bussavgangen gir en større innvirkning på den totale avviklingskvaliteten ved å forstyrre den tettet trafikken i høyre kjørefelt, sammenlignet med bussankomstene. Det ble derfor sett på forskjellige løsninger i kapittel 16 der innvirkningen fra bussen reduseres. Videre ble to tiltak modellert for å se på innvirkningene fra henholdsvis bussavgangene alene og plasseringen av bussholdeplassen i sin helhet.

17.2.2.1 Fjerne innvirkningen fra bussavgangene

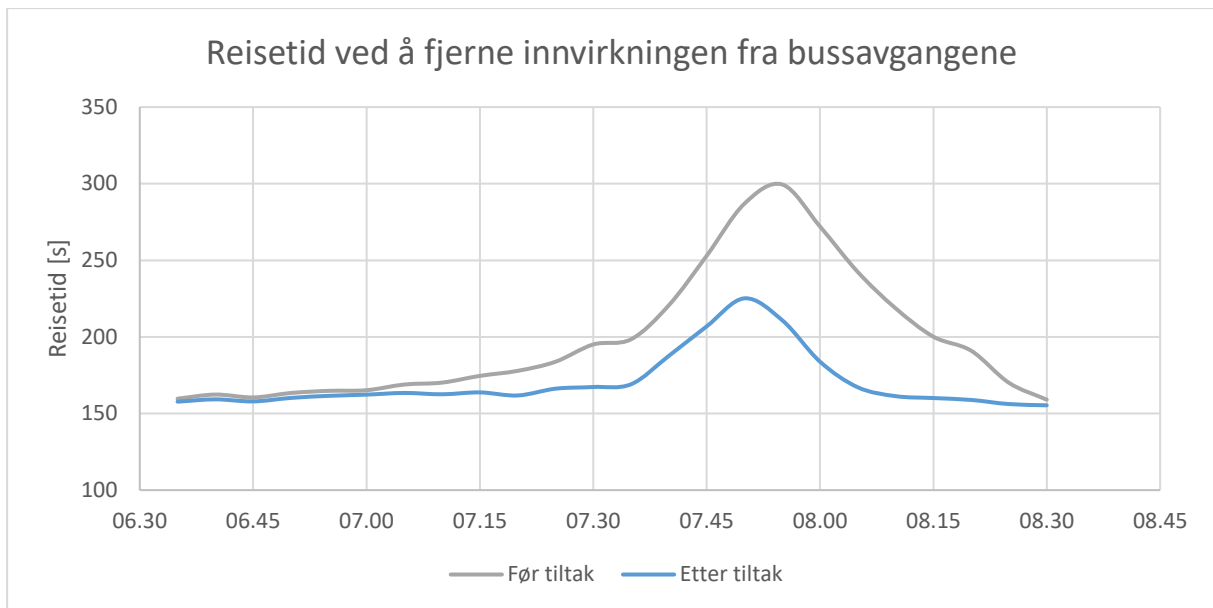
For å se på innvirkningene bussavgangene har på den totale trafikkavviklingen ble utkjøringen fra bussholdeplassen fjernet og erstattet med en sentroide, som illustrert i figur 17-4. Analysen vil dermed vise til resultatet av å forskyve bussenes tilkobling til hovedsystemet forbi influensområdet til flaskehalsen.

Ved å fjerne innvirkningen fra bussavgangene vil den resterende trafikken kunne kjøre gjennom systemet uten å påvirkes av situasjon 3. Dette er en av de utløsende årsakene for den reduserte avviklingskvaliteten i tillegg til den fysiske flaskehalsen. Effekten tiltaket har på reisetiden sammenlignet med grunnmodellen er illustrert i figur 17-5.

Fra figuren fremkommer bussavgangenes innvirkning på den totale trafikkavviklingen tydelig som forskjellen mellom reisetiden før og etter tiltak. I perioden før den største etterspørselen oppstår (06:35-07:35) vil buss-avgangene alene i stor grad være årsaken til den økte reisetiden grunnet forstyrrelsen av trafikkstrømmen i høyre kjørefelt før kapasiteten på rampen overskrides.



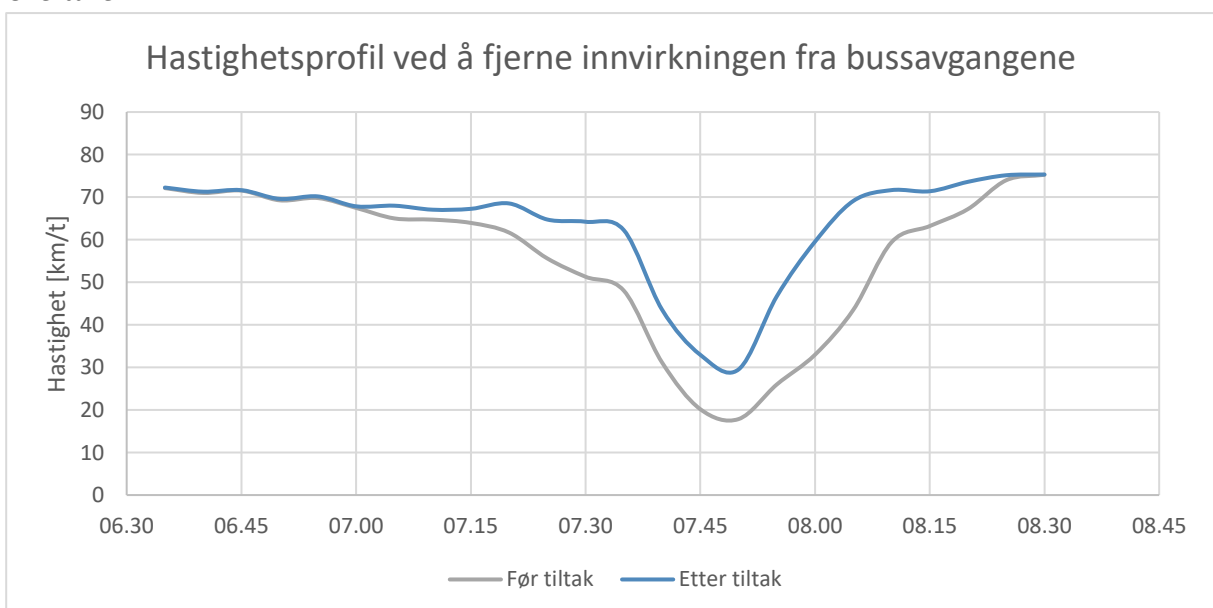
Figur 17-4: Illustrasjon av hvordan bussavgangene fjernes i modellen.



Figur 17-5: Sammenligning av reisetid før og etter at innvirkningen fra bussavganger fjernes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

I det de største avviklingsproblemene oppstår vil en fjerning av bussavgangene medføre at kødannelsen og oppløsningsfasen reduseres i omfang. Den høyeste forventede reisetiden forskyves til intervallet før, sammenlignet med grunnmodellen, og utgjør en reduksjon på ca. 75 sekunder for hvert kjøretøy. Ved å fjerne bussavgangene vil varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en reisetid over 180 sekunder, tilsvarende en strekningshastighet under 65 km/t, reduseres med ca. 60 %.

Dette forholdet gjenspeiles ikke like tydelig i hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru, som er illustrert i figur 17-6. Dette kan ha en sammenheng med at den generelle hastigheten i analyseområdet øker, noe som medfører at flere kjøretøy legger seg i høyre felt fremfor å kjøre forbi køen. Dette er forhold som styres av *Lane Change Model* og *Overtaking Manoeuvre*, der en forbikjøring utløses i sone 1 hvis et kjøretøy ikke kan oppnå ønsket hastighet ganget med parameteren *Percentage Overtake*.



Figur 17-6: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter at innvirkningen fra bussavgangene fjernes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Hastighetsprofilen korresponderer videre bra med reisetiden i periodene der det ikke oppstår større avviklingsproblemer. Den laveste gjennomsnittlige hastigheten oppstår kl. 07:50 for begge modellene, men etter å ha fjernet innvirkningen fra bussavgangene økte hastigheten med ca. 12 km/t. Varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en hastighet under 65 km/t i høyre kjørefelt på Kroppan bru reduseres med ca. 40 %.

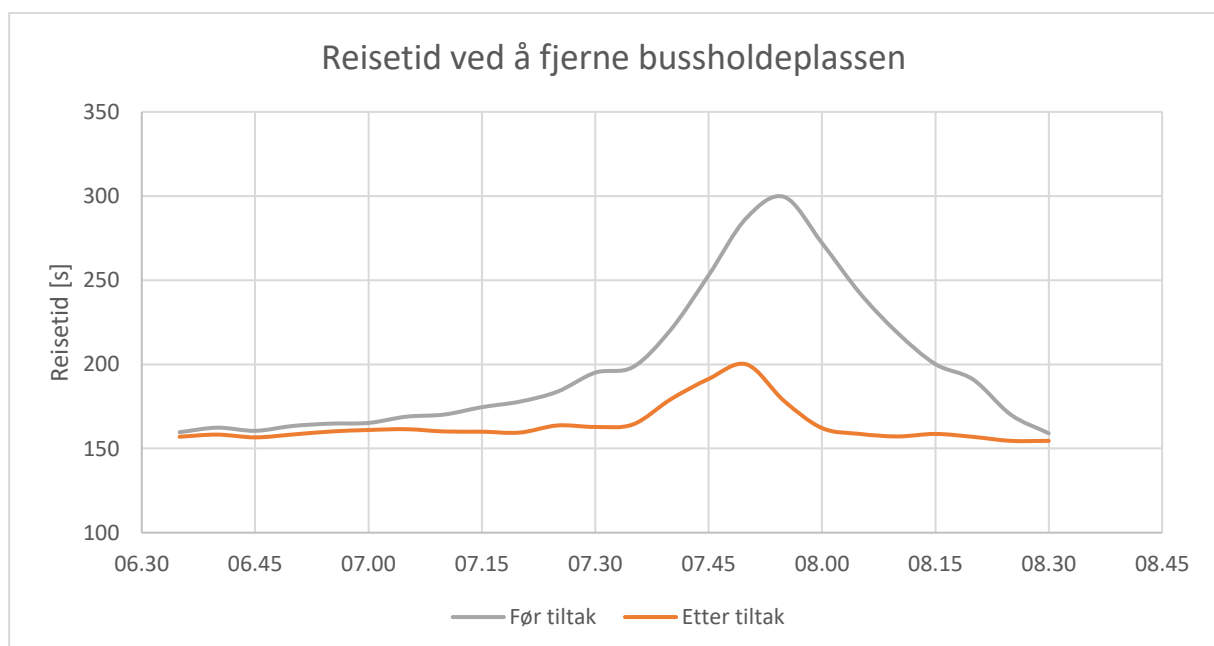
Da tiltaket krever en større omlegging av den eksisterende infrastrukturen uten at avviklingsproblemene løses i sin helhet er det forventet at forbedringene vil være mindre samfunnsøkonomisk lønnsomme.

17.2.2.2 Fjerne bussholdeplassen fra influensområdet til flaskehalsen

Bussankomstene er forventet å gi en mindre innvirkning på den totale trafikkavviklingen gjennom morgenrushet, da kun et fåtall av bussene krysser trafikkstrømmen i høyre kjørefelt ved innkjøringen. Videre vil ikke en nedbremsing i forkant av bussholdeplassen ved ankomst gi like store innvirkninger som bussavgangene, der hastighetsdifferansen er vesentlig større.

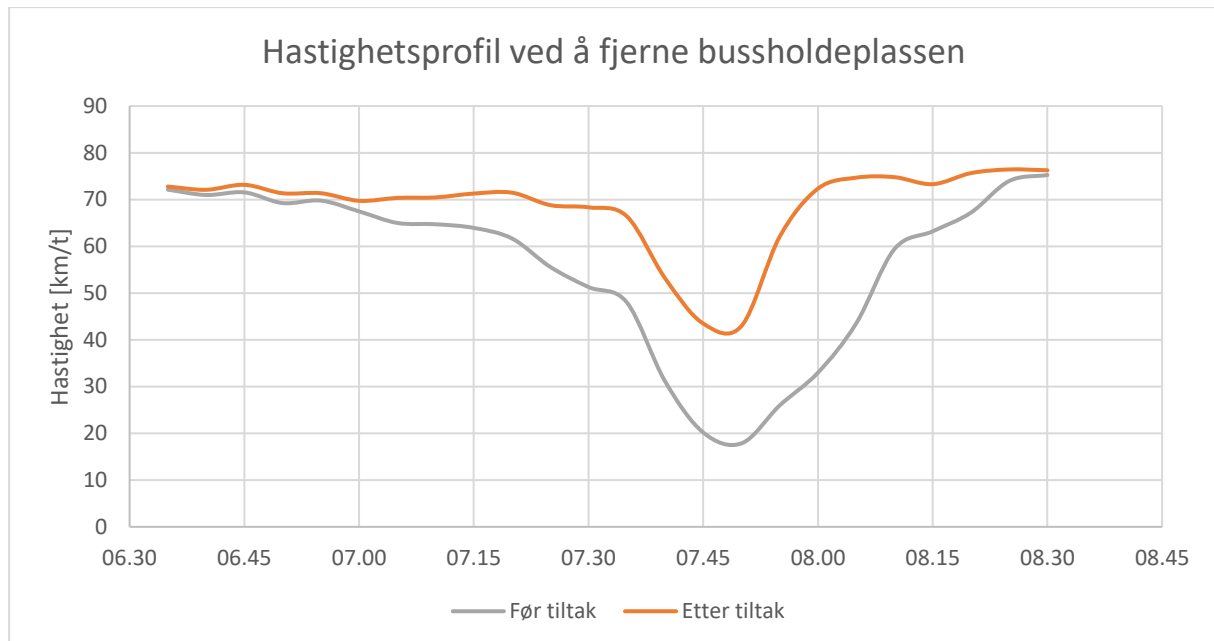
For å se på innvirkningen av bussholdeplassens plassering innenfor influensområdet til flaskehalsen ble bussholdeplassen fjernet i modellen. Analysen vil dermed vise til resultatet av å flytte eller fjerne bussholdeplassen fra strekningen med de største avviklingsproblemene. Ved å sammenligne dette tiltaket med tiltaket der bussavgangene ble fjernet vil forskjellen i reisetid på strekningen og hastighet i høyre kjørefelt på Kroppan bru tilsvare innvirkningen fra bussankomsten.

Resultatet av analysen viser at bussankomsten har liten innvirkning på avviklingsproblemene i start- og sluttfasen sammenlignet med bussavgangene. Figur 17-7 viser at ved å fjerne bussholdeplassen forskyves den høyeste forventede reisetiden til intervallet før, sammenlignet med grunnmodellen, og utgjør en reduksjon på ca. 100 sekunder for hvert kjøretøy. Videre utgjør den maksimale gjennomsnittlige forsinkelsen ca. 50 sekunder sammenlignet med en normal reisetid på 150 sekunder. Ved å flytte bussholdeplassen forbi flaskehalsen vil varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en reisetid over 180 sekunder, tilsvarende en strekningshastighet under 65 km/t, reduseres med ca. 80 %.



Figur 17-7: Sammenligning av reisetid før og etter at bussholdeplassen flyttes forbi influensområdet til flaskehalsen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru er vist i figur 17-8. På tilsvarende måte som for tiltaket der bussavgangene ble fjernet, gjenspeiles ikke resultatet like tydelig i hastigheten. Forholdet kan forklares av parameterne i *Lane Change Model* og *Overtaking Manoeuvre*, som presentert tidligere.



Figur 17-8: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter at bussholdeplassen flyttes forbi influensområdet til flaskehalsen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

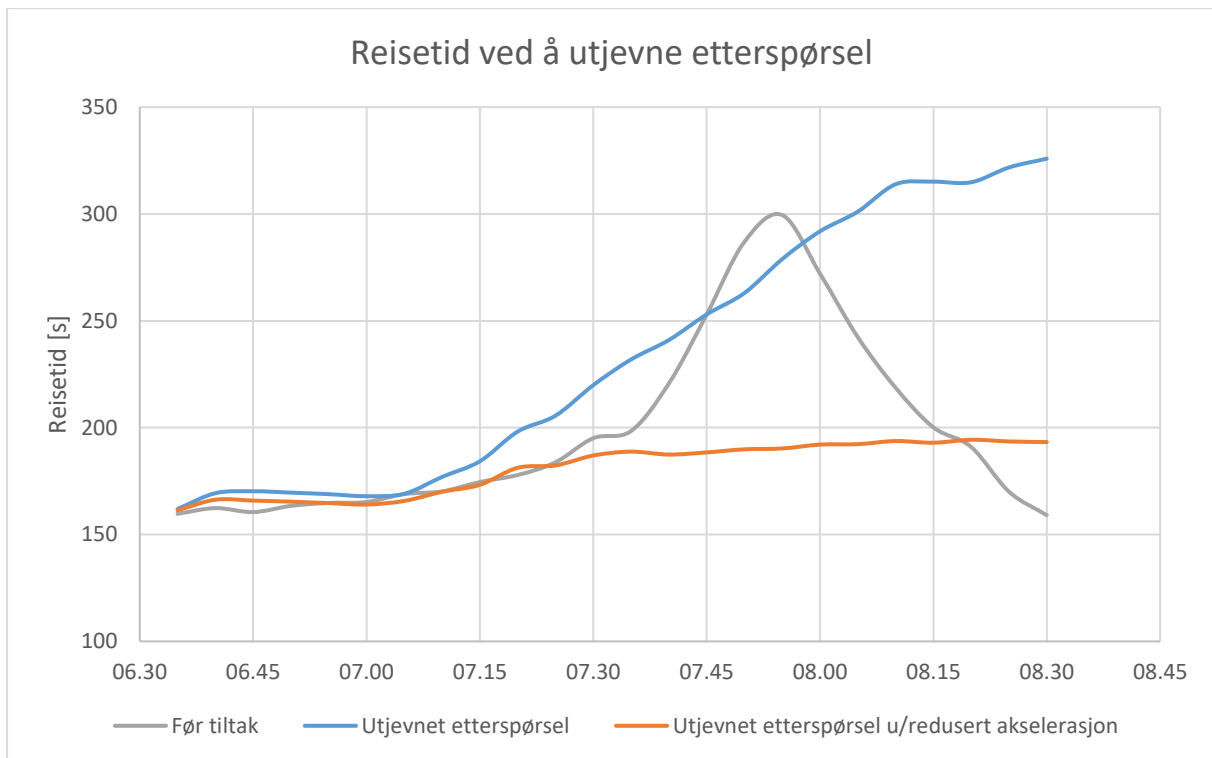
Hastighetsprofilen korresponderer bra med reisetiden i periodene der det ikke oppstår avviklingsproblemer. Den laveste gjennomsnittlige hastigheten oppstår kl. 07:50, der hastigheten ligger på ca. 40 km/t og utgjør en økning på ca. 25 km/t sammenlignet med grunnmodellen. Varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en hastighet under 65 km/t i høyre kjørefelt på Kroppan bru reduseres med ca. 70 %.

Tiltaket viser følgelig til bedre resultater enn ved å beholde dagens plassering av bussholdeplassen der en ny utkjøringsmulighet må etableres. Det er også forventet at kostnadene og kompleksiteten ved å flytte bussholdeplassen vil være lavere.

17.2.3 Utjevne etterspørselen gjennom morgenrushet

Etterspørselen ved Tonstad overstiger den tilgjengelige kapasiteten på avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen rundt kl. 07:35, noe som medfører en betydelig reduksjon av den totale avviklingskvaliteten frem til etterspørselen ble tilstrekkelig redusert. Det ble derfor gjennomført en analyse der det totale trafikkvolumet gjennom morgenrushet ble jevnt fordelt mellom intervallene. Innenfor hvert intervall ankom kjøretøyene med en uniform fordeling, gitt av modellen *Global Arrival*. For trafikken på avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen utgjorde dette en konstant trafikkmengde på 1776 kjt/t, noe som innebar at trafikkvolumet lå rundt den forventede kapasitetsgrensen.

Resultatet av analysen viser at det oppsto vesentlige forskjeller mellom modellen med og uten lenkespesifikke tilpasninger i form av redusert akselerasjonsfaktor på lenkene parallelt med og oppstrøms for bussholdeplassen. Det ble derfor valgt å presentere resultatene fra begge modellene sammen med grunnmodellen. Reisetiden for de ulike modellene er presentert i figur 17-9.



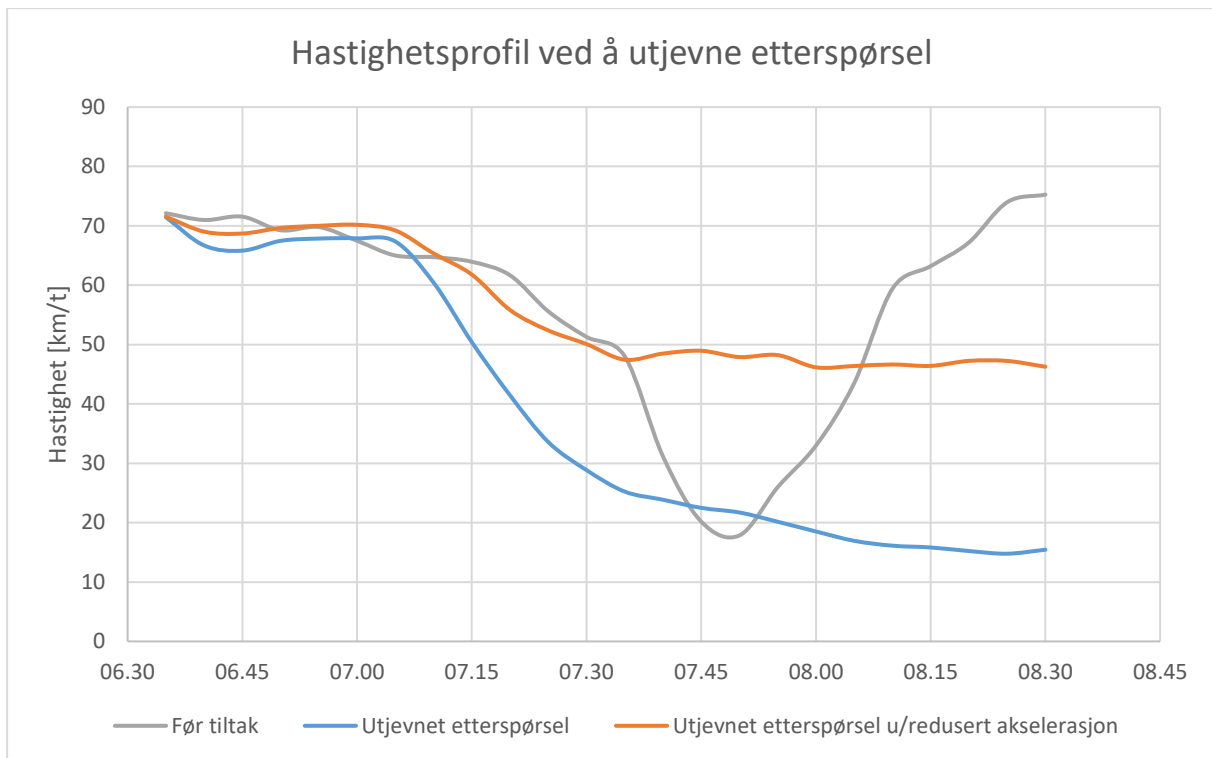
Figur 17-9: Sammenligning av reisetid før og etter at etterspørselen utjevnes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Resultatet av analysen viser at en uniform fordeling av trafikkvolumet i den spesialtilpassede modellen med lenkespesifikke tilpasninger medfører en jevn oppbygging av reisetiden fra kl. 07:05. Det oppstår en betydelig forsinkelse ved enden av simuleringsperioden, der den gjennomsnittlige reisetiden ligger på 326 sekunder. Resultatet kan ha en sammenheng med at en jevn fordeling av trafikken gjennom morgenrushet ikke vil være i stand til å tilpasse seg forstyrrelsene som oppstår i analyseområdet. Ved å ha en mer ujevn fordeling mellom kjøretøyene vil sjokkbølgene som forplanter seg kunne absorberes, og få mindre effekt.

I modellen uten lenkespesifikke tilpasninger stabiliserte reisetiden seg rundt 190 sekunder fra kl. 07:30 til enden av simuleringsperioden og medførte at forsinkelsen ble jevnere fordelt mellom trafikantene.

Ved å utjevne etterspørselen vil varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en reisetid over 180 sekunder, tilsvarende en strekningshastighet under 65 km/t, øke med henholdsvis 33 % og 25 % for tiltaket med og uten aktivering av de lenkespesifikke parameterne. Da etterspørselen og reisetidsfordelingen gjennom simuleringsperioden er vesentlig endret fra grunnmodellen vil det følgelig være naturlig å sammenligne den gjennomsnittlige aggregerte reisetiden gjennom simuleringsperioden. I den spesialtilpassede modellen økte reisetiden med ca. 33 sekunder. Samtidig ble reisetiden ved å deaktivere de lenkespesifikke tilpasningene redusert med ca. 18 sekunder.

Forholdene gjenspeiles også i hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru, vist i figur 17-10, der det fremkommer en betydelig hastighetsreduksjon i samme tidsrom som reisetiden øker for begge modellene.



Figur 17-10: Sammenligning av hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru før og etter at etterspørselen utjevnes. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en hastighet under 65 km/t i høyre kjørefelt på Kroppan bru økte med henholdsvis 21 % og 14 % for tiltaket med og uten aktivering av de lenkespesifikke parameterne. På tilsvarende vis som for reisetiden vil det være naturlig å sammenligne den gjennomsnittlige aggregerte hastighetsverdien gjennom morgenrushet da utviklingen var av vesentlig forskjell fra grunnmodellen. I den spesialtilpassede modellen med aktiverte lenkespesifikke parametere ble hastigheten redusert med ca. 15 km/t. Samtidig ble hastigheten ved å deaktivere de lenkespesifikke tilpasningene tilnærmet den samme som i grunnmodellen. Den lave forskjellen kan ha en sammenheng med at hastigheten ble vektet i henhold til antall kjøretøy. Den gjennomsnittlige hastigheten vil dermed bli høyere, da det ved lave hastigheter vil være færre kjøretøy som krysser detektoren per tidsenhet.

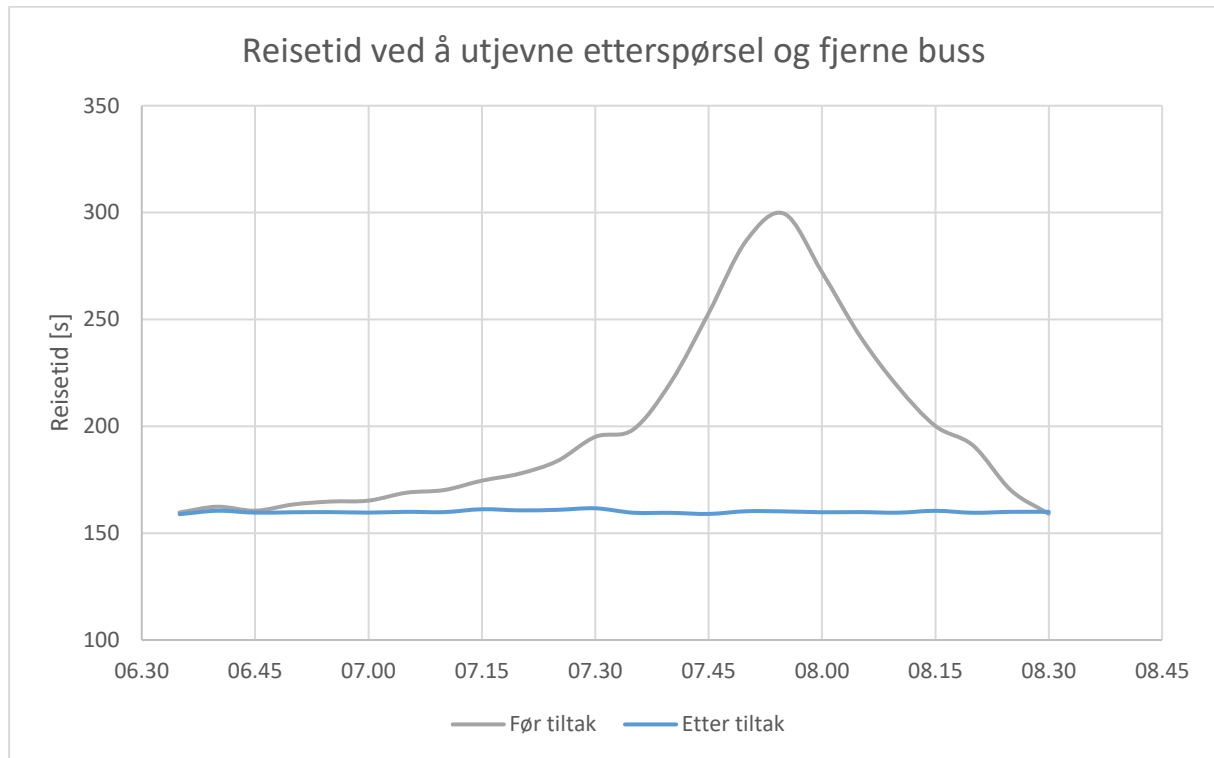
17.3 Modellering av tiltak i kombinasjon

Trafikkbildet på Sluppen er komplekst, og det kan derfor være nødvendig å kombinere flere tiltak for å løse avviklingsproblemene uten å innføre nye usikkerhetsmoment. Videre vil et utvalg kombinasjoner av enkelttiltakene som er forventet å ha en forsterket samlet effekt sammenlignet med enkelttiltakene alene presenteres. Da resultatene fra modellene var relativt stabile over simuleringsperioden ble det valgt å kun fremstille utviklingen av reisetiden.

17.3.1 Utjevnet etterspørsel og fjerning av bussholdeplass

Fra analysen med utjevnet etterspørsel og lenkespesifikke tilpasninger ble det avdekket at en jevn fordeling av trafikk er mer sårbar for forstyrrelser. Det var derfor nærliggende å gjennomføre en analyse der den utjevnete etterspørselen ikke ble forstyrret av bussenes ankomst og avgang, som er ansett som dominerende faktorer i sjokkbølgedannelsen oppstrøms for avkjøringsrampen.

Resultatet fra analysen viser til en gjennomsnittlig reisetid på 160 ± 5 sekunder gjennom hele morgenrushet, illustrert i figur 17-11, og tilsvarer med dette en minimal økning fra normal reisetid. Videre ligger verdier for hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru stabilt i overkant av 70 km/t gjennom simuleringsperioden. Dette viser at det i teorien er tilstrekkelig kapasitet på selve avkjøringsrampen gjennom morgenrushet, såfremt etterspørselen fordeles jevnt.



Figur 17-11: Sammenligning av reisetid før og etter at etterspørselen utjevnes og bussholdeplassen fjernes fra influensområdet til flaskehalsen. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

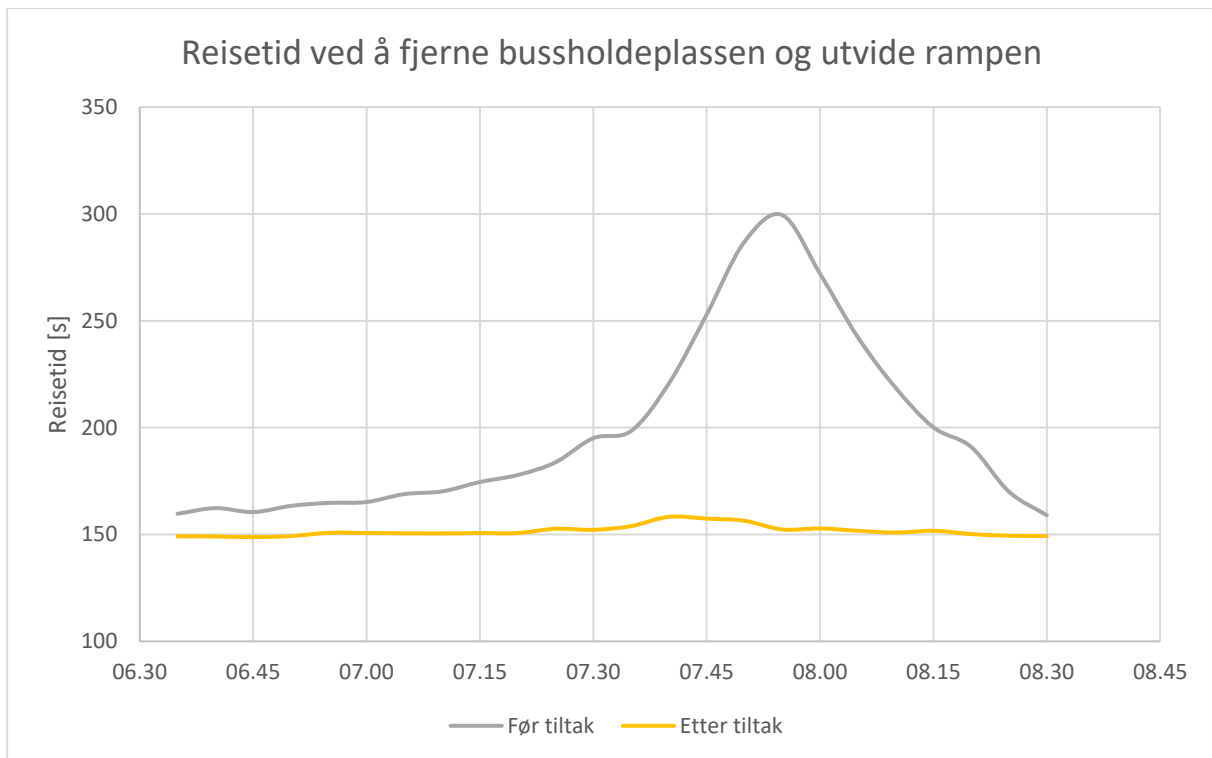
Det er mulig at modellen kjører noe bedre enn hva som kan forventes ved trafikkstrømmer som ligger på kapasitetsgrensen over en lengre periode. Fra tidligere har det blitt avdekket at små forstyrrelser i tett trafikk kan drastisk redusere den totale avviklingskvaliteten.

17.3.2 Utvidelse av rampen og fjerning av bussholdeplass

En utvidelse av rampen fjerner avviklingsproblemer gjennom morgenrushet, men er ikke trafiksikkerhetsmessig forsvarlig å gjennomføre alene grunnet konflikten med bussen. Det ble derfor valgt å analysere effekten av å utvide rampen i kombinasjon med å fjerne bussholdeplassen. Oppbyggingen av modellen vil følgelig være en kombinasjon av de to enkelttiltakene, der rampen utvides og bussholdeplassen fjernes, som beskrevet tidligere.

Ved å se på reisetiden, illustrert i figur xx, gir ikke en kombinasjon av de to tiltakene store utslag sammenlignet med en utvidelse av rampen alene. Reisetiden reduseres i en størrelsesorden på 0 til 2 sekunder og resultatet kan derfor anses som tilnærmet likt.

Ved å kombinere de to tiltakene oppsto det ingen avviklingsproblemer gjennom simuleringsperioden. Dette gjenspeiles i figur 17-12 der reisetiden aldri overstiger 160 sekunder. Kombinasjonen av de to tiltakene reduserte reisetiden i en størrelsesorden på 0 til 2 sekunder sammenlignet med effekten av å utvide av rampen alene. Resultatene kan derfor anses som tilnærmet like.



Figur 17-12: Sammenligning av reisetid før og etter at bussholdeplassen fjernes fra influensområdet til flaskehalsen og avkjøringsrampen utvides. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Da reisetidene fra kombinasjonen og utvidelsen av rampen alene var tilnærmet like, ble også hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru tilsvarende som tidligere illustrert i figur 17-3. Etter innføring av tiltak oppsto det ingen avviklingsproblemer gjennom morgenrushet og fartsgrensen kunne opprettholdes gjennom hele simuleringsperioden.

17.4 Usikkerheter ved bruk av spesialtilpassede modeller

Fra modelleringen av de ulike tiltakene ble det avdekket store forskjeller mellom hvordan den spesialtilpassede modellen innvirket på resultatene. Tiltak som forbedret den totale avviklingskvaliteten i modellen hadde en liten differanse mellom resultatene gitt med og uten aktiveringen av de lenkespesifikke parameterne. Situasjonene som ble modellert var følgelig bedre enn forholdene modellen var kalibrert etter, noe som resulterte i større perioder der de lenkespesifikke tilpasningene var inaktive. Dette var med på å redusere utslagene mellom modellene.

Resultatet fra tiltaket der etterspørselen ble jevnt fordelt gjennom morgenrushet skilte seg ut fra de resterende tiltakene, da de trafikale forholdene var betydelig endret. Forholdene som ble introdusert i modellen var forverret sammenlignet med grunnmodellen, noe som resulterte i at de lenkespesifikke parameterne ble aktivert over en lengre periode enn det grunnmodellen var kalibrert etter. Dette ga store utslag ved en sammenligning av modellen med og uten de lenkespesifikke tilpasningene. Reisetiden for den spesialtilpassede modellen ble akkumulerte gjennom simuleringsperioden, noe som viser til at modellen ikke klarte å løse opp køen etter at de lenkespesifikke parameterne ble aktivert. Da etterspørselen, som er et fundamentalt forhold i modellen, ble vesentlig endret viser dette til usikkerhetene som foreligger ved bruk av spesialtilpassede modeller. Sammenligningsgrunnlaget blir følgelig mer tvetydig når situasjonen forverres fra utgangspunktet i grunnmodellen.

18 Vurdering av tiltak

Resultatet fra modelleringen av enkelttiltakene rettet mot situasjonene som gir størst innvirkning på den totale trafikkavviklingen på Sluppen viser at det er nødvendig med større tiltak for å fjerne avviklingsproblemene. Teoretisk sett ville det vært tilstrekkelig å utvide rampen til to kjørefelt, noe som viser til at flaskehalsen isolert forårsaker avviklingsproblemene. Dette tiltaket kan derimot ikke gjennomføres alene grunnet trafiksikkerhetsmessige utfordringer knyttet til bussenes kryssing gjennom høyre kjørefelt.

De resterende situasjonene er med på å forverre avviklingen når etterspørselen nærmer seg og overskrider kapasitetsgrensen til flaskehalsen. Tiltak knyttet til bussenes innvirkning vil kunne bedre situasjonen, men ikke fjerne avviklingsproblemene i sin helhet. Da endringene av infrastrukturen kan være kostnadskrevende vil effekten av tiltakene kunne være utilstrekkelige for at prosjektene skal være økonomisk lønnsomme.

Tiltak for å utjevne etterspørselen ble også modellert, men det var store usikkerheter knyttet til resultatet da spesialtilpasningene i modellen fikk store utslag. Videre vil det i virkeligheten være vanskelige å optimalisere fordelingen av etterspørselen slik at det ikke oppstår avviklingsproblemer gjennom morgenrushet. Fundamentale endringer av trafikkbildet anses derfor ikke som realistisk å oppnå.

Fra analysene av dagens trafikkstrømmer og fordeling gjennom morgenrushet konkluderes det derfor med at det er behov for mer omfattende endringer av de fysiske løsningene for å fjerne avviklingsproblemene forårsaket av flaskehalsen. Kapasiteten på selve avkjøringsrampen må økes hvis dagens fordeling av etterspørselen skal opprettholdes. Dette medfører at det er nødvendig å utarbeide en ny løsning for bussholdeplassen. For videre vurderinger benyttes tiltakskombinasjonen der rampen utvides og bussholdeplassen fjernes fra dagens plassering.

18.1 Nullvekstmålet

Innvirkningene ved å gjennomføre tiltakene må videre diskuteres i lys av nullvekstmålet vedtatt i Nasjonal Transportplan 2014-2023 (Meld. St. nr. 26, 2012-2013) og Trondheim kommunes forpliktelser i henhold til dette gjennom bymiljøavtalen vedtatt i 2016 (Statens vegvesen, 2016). Nullvekstmålet innebærer at all vekst i persontransporten i storbyområdene skal tas med kollektivtransport, sykkel og gange, og den vedtatte bymiljøavtalen skal fungere som et virkemiddel for å oppnå dette i Trondheim.

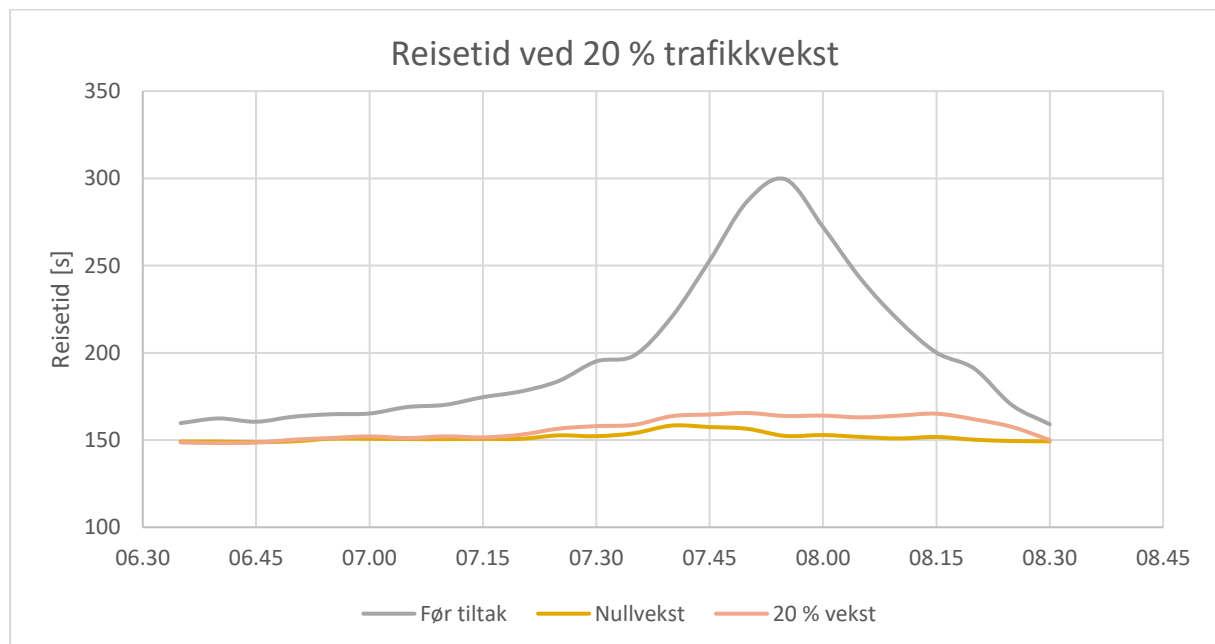
Ved å øke kapasiteten i vegsystemet på Sluppen er det mulig at etterspørselen for reiser med privatbil øker innad i Trondheim kommune, noe som vil gå imot de overordnede målene. Videre inkluderes ikke lettere næringstransport og gjennomgangstrafikk i nullvekstmålet. Da E6 Omkjøringsvegen leder trafikken utenom Trondheim sentrum og utgjør en viktig forbindelse mellom Nord- og Sør-Norge vil det være naturlig å styrke E6 Omkjøringsvegens posisjon som en gjennomgående trasé fra E6 syd.

Ombyggingen av rampesystemet på Sluppen er i stor grad betinget av utbyggingen av det nye stamvegnettet rundt Trondheim sentrum og tilretteleggingen for superbusstraséen, beskrevet i kapittel 15. De avdekkede tiltakene som kan iverksettes for å fjerne avviklingsproblemene på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen må følgelig ses i sammenheng med de resterende planene for området.

For å kartlegge effekten av de foreslåtte tiltakene for E6 syd i et lengre perspektiv ble det videre gjennomført en enkel analyse ved å øke dagens trafikkvolum gjennom morgenrushet.

18.2 Trafikkvekst med valgt tiltak

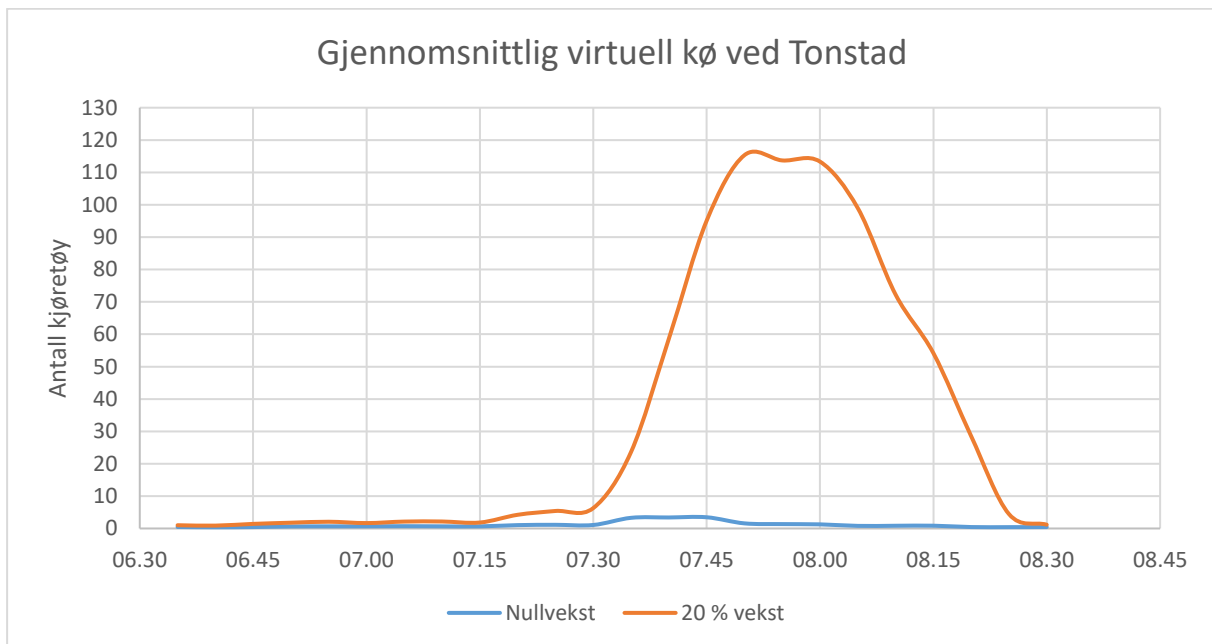
Inngangsdataene i grunnmodellen er fra en periode med store avviklingsproblemer. Det er derfor forventet at etterspørselens fordeling og størrelse gjennom morgenrushet kan endres hvis rampen utvides til to kjørefelt og en ny løsning utarbeides for bussholdeplassen. For å vurdere resultatene av tiltaket over en lengre periode ble det derfor gjennomført en enkel analyse med en trafikkvekst på 20 % gjennom morgenrushet. Dette vil vise til den nye belastning innenfor hvert tidsintervall etter en periode med økt etterspørsel.



Figur 18-1: Sammenligning av reisetid gitt av nullvekstscenariet og en trafikkøkning på 20 %, sammen med grunnmodellen før tiltak. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Ved å øke trafikkvolumet med 20 % fremkommer det av figur 18-1 at det ikke er forventet at reisetiden vil øke betydelig sammenlignet med nullvekstscenariet. Reisetiden øker i tidsrommet med størst etterspørsel, men overstiger aldri en forsinkelse på mer enn 15 sekunder sammenlignet med en normal reisetid på 150 sekunder. Dette indikerer videre at kapasitetsutfordringene har flyttet seg oppstrøms i systemet.

I nordgående retning består dagens kryssløsning på Tonstad av fire kjørefelt som videre fletter sammen til to. Ved å hente informasjon knyttet til den virtuelle køen på utsiden av modellen ved Tonstad ble kapasitetsutfordringene på denne lenken avdekket. Fra figur 18-2 kommer det tydelig frem at en trafikkvekst på 20 % vil overstige denne kapasiteten fra kl. 07:30. Den virtuelle køen løses opp like før enden av simuleringsperioden. Dette viser at etterspørselen er på grensen av hva dagens system kan håndtere gjennom morgenrushet. Da flettingen fra fire til to kjørefelt nedstrøms for Tonstadkrysset ikke inkluderes i modellen, vil det kunne forventes et større sammenbrudd i virkeligheten enn hva som gjenspeiles i resultatene.



Figur 18-2: Sammenligning av virtuell kø på utsiden av modellen ved Tonstad, gitt av nullvekstscenariet og en trafikkøkning på 20 %. Registreringene er gitt med en oppløsning på 5 minutter og er fremstilt på intervallenes sluttidspunkt.

Ved en videre økning av etterspørselen i modellen, vil kapasiteten på Tonstad overskrides gjennom hele morgenrushet og reisetiden stabilisere seg rundt 170 til 175 sekunder for kjøretøy som har kommet inn i systemet. Dette viser at det ikke vil oppstå vesentlige forsinkelser på avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen etter at den utvides til to kjørefelt og bussholdeplassen fjernes.

Videre vil løsningen for påkjøringsrampen fra Sluppenvegen få større avviklingsproblemer ved en trafikkvekst. Dette kan delvis være forårsaket av den korte lengden på akselerasjonsfeltet som medførte at enkelte kjøretøy stoppet helt opp grunnet den høye belastningen på hovedvegen. Videre førte dette til en aktivering av parameteren *Reaction Time at Stop*, som skapte lengre reaksjonstider da modellen var kalibrert i henhold til kødannelse på selve motorvegen.

Resultatet viser at en ny kryssløsning på Sluppen må ses i sammenheng med de resterende endringene som er forventet gjennomført i nærliggende områder, samt den forventede trafikkveksten.

19 Generalisering

Innvirkningen av en flaskehals vil være begrenset frem til etterspørselen overskrider kapasiteten, og aktiverer flaskehalsen. I det dette skjer vil videre utvikling av avviklingskvaliteten avhenge sterkt av de trafikale forholdene opp- og nedstrøms for flaskehalsen. Da belastningen ofte er generelt høy i perioder der etterspørselen er større enn kapasitet, vil små forstyrrelser kunne få store etterfølgere. Rushperiodene utgjør typisk perioder der etterspørselen overskrider kapasiteten, og aktiverer flaskehalsene. Karakteristisk for disse periodene er en større utstrekning i tid. Da køutstrekningen oppstrøms for flaskehalsen øker med tiden kapasiteten er overskredet, vil lengere sammenhengende perioder gi større forsinkelser enn kortere perioder. Dette forsterkes av redusert gjennomstrømning i flaskehalsen i høyt belastede perioder ved at den totale tiden tilbrakt i systemet har en lineær sammenheng med den vektete summen av trafikkvolumet i trafikkstrømmene som forlater systemet (Wang et al., 2016).

Registreringene viste en tydelig sammenheng mellom reisetid og etterspørsel. Etter at kapasiteten ble overskredet økte reisetiden jevnt frem til etterspørselen ble redusert til et nivå som var lavere enn kapasiteten. Først når etterspørselen var lav nok begynte køens oppløsningsfase, ved at tilførselen oppstrøms ble lavere enn oppløsningen i front. Dette oppløsningsmønsteret er typisk for fysiske flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger (May, 1990).

I det kødannelsen begynner oppstrøms for en flaskehals blir trafikksituasjonen ekstra sårbar for forstyrrelser. Dette gjelder spesielt flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger, som avkjøringsrampen på Sluppen. Ved forstyrrelser oppstrøms for flaskehalsen vil det dannes luker i trafikkstrømmen som forhindrer at gjennomstrømningen optimaliseres i forhold til kapasiteten. Dette vil kunne føre til uutnyttet kapasitet gjennom flaskehalsen, og på den måten forsterke flaskehalsmekanismen. I tilfeller med en nedstrøms kapasitetsbegrensning vil det kunne oppstå tilbakeblokkering gjennom flaskehalsen. Hvis dette skjer vil ikke flaskehalsen lengre være aktiv og forstyrrelser oppstrøms får mindre innvirkning på den totale avviklingskvaliteten. For flaskehals uten konstant kapasitet vil perioder med redusert kapasitet kunne samle opp trafikk og absorbere lukene i trafikkstrømmen for å optimalisere denne i senere perioder når det er større kapasitet i nettverket. Sårbarheten for forstyrrelser blir dermed mindre.

Selv om sårbarheten for forstyrrelser er noe mindre i flaskehals med nedstrøms kapasitetsbegrensninger og flaskehals uten konstant kapasitet vil den totale kapasiteten over tid kunne være større for flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger. Dette henger sammen med at kapasiteten hverken begrenses over tid eller av tilstøtende aktive

flaskehalsen. Dette gjør at den samlede konsekvensen av flaskehalsen på Sluppen ikke nødvendigvis er like stor som for andre flaskehalstyper.

Karakteristisk for avkjøringsrampen på Sluppen er den store utstrekningen av homogene trafikkstrømmer oppstrøms for flaskehalsen, kombinert med den lave graden av innvirkning på resterende trafikkstrømmer. En vanlig form for flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger er innsnevring av en hovedveg. Til forskjell fra Sluppen vil denne typen flaskehals kun bestå av én trafikkstrøm, og mulighetene for eksterne forstyrrelser som reduserer avviklingskvaliteten vil være begrenset. Da kun høyre kjørefelt benyttes på og oppstrøms for avkjøringsrampen vil trafikkstrømmen kunne fungere som en forlengelse av den fysiske flaskehalsen. Dette gjør trafikken i høyre kjørefelt lett tilgjengelig for forstyrrende elementer fra resterende trafikkstrømmer som kan bryte den homogene trafikkstrømmen. Den isolerte trafikkstrømmen gjør det enklere å identifisere årsaken og effekten bak forstyrrelsene.

Det at køen som skal til avkjøringsrampen ikke dekker flere kjørefelt hindrer den i å «fange» trafikkstrømmen som skal mot Trondheim sentrum og danne et *first-in-first-out*-system. Dette gjør at trafikkstrømmene i stor grad fungerer som to adskilte trafikkstrømmer. Kødannelse i flerrørsregimer kan forventes å ha 10% lavere tetthet en tilsvarende trafikkmengde i én samlet kø (Muñoz og Daganzo, 2002). Dette har sammenheng med sjåførenes ønske om å ha større avstandsluker når trafikken i de ulike kjørefeltene har ulik hastighet og flere feltskifter kan være forventet. Flerrørseffekten vil trolig være mindre utslagsgivende på Sluppen, da midtre kjørefelt delvis fungerer som en buffersone mellom de to trafikkstrømmene. Uten denne buffersonen er det forventet at flerrørseffekten ville fått større utslag. Dette vil igjen føre til en økt risiko for dannelse av et *first-in-first-out*-system.

Avstanden til nærmeste oppstrøms av- og påkjøringsrampe er også lengere enn køutstrekningen på Sluppen. Dette hindrer forverret kødannelse gjennom blokkering av oppstrøms ramper og resulterende degradering av infrastrukturkapasiteten (Wang et al., 2016). For andre flaskehalsen vil blokkering av oppstrøms av- og påkjøringsramper kunne være en avgjørende faktor for køutstrekningen og resulterende forsinkelser, da flere trafikkstrømmer involveres i kødannelsen.

Flaskehalsen på Sluppen har begrensede konsekvenser for området da den i liten grad innvirker på de resterende trafikkstrømmene. Da etterspørselen mot sentrum er betydelig lavere enn den tilgjengelige kapasiteten som foreligger i nettverket er det liten risiko for at det oppstår et *first-in-first-out*-system. I tilfeller der det oppstår et *first-in-first-out*-system som følge av avkjøringsrampen avdekket (Muñoz og Daganzo, 2002) at gjennomstrømningen begrenses til 1500 kjt/t per kjørefelt uavhengig av antall kjørefelt på motorvegen. Dette innebar en reduksjon av det faktiske trafikkvolumet på ca. 25 % sammenlignet med trafikkstrømmen nedstrøms for den aktive flaskehalsen, noe som videre viser til viktigheten av å forstå årsaken og mekanismene bak flaskehalsen.

20 Konklusjon

Kartleggingen viste at den høyest belastede perioden for avkjøringsrampen på Sluppen var morgenrushet. Den største etterspørselen fra Tonstad til E6 Omkjøringsvegen oppsto mellom 07:30 og 07:45 og utgjorde et trafikkvolum 550 kjt/15 min, tilsvarende 2200 kjt/t. Etterspørselen var noe lavere gjennom makstimen, definert fra 06:45 til 07:45, og tilsvarte et trafikkvolum på ca. 2000 kjt/t. Trafikken mot E6 Omkjøringsvegen utgjorde 63 % av trafikken på E6 syd. Dette førte til en skjevhet i trafikkfordelingen sammenlignet med kapasitetsfordelingen gitt av antall kjørefelt.

Gjennom morgenrushet oversteg etterspørselen kapasiteten og den fysiske flaskehalsen ble aktivert. Dette initierte avviklingsproblemer, der den forventede reisetiden mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen økte til ca. 300 sekunder, tilsvarende en dobling av den normale reisetiden. Avviklingsproblemer ble forsterket av 5 forstyrrende situasjoner som skapte sjokkbølger som forplantet seg bakover i trafikkstrømmen oppstrøms for avkjøringsrampen. Forstyrrelsene ble forårsaket av akselerasjonsproblemer gjennom flaskehalsen, sene feltskifter inn i en allerede saktegående trafikkstrøm rett i forkant av avkjøringsrampen og oppstrøms for bussholdeplassen, samt bussenes ankomst til og avgang fra bussholdeplassen. Effekten av forstyrrelsen var en forskyving av den trafikale flaskehalsen oppstrøms for den fysiske flaskehalsen på avkjøringsrampen.

Av de fem situasjonene ble bussavgangen trukket frem som den forstyrrelsen med størst negativ effekt på den totale trafikkavviklingen, grunnet en kombinasjon av stor innvirkning, høy frekvens og få muligheter til å tette lukene i trafikkstrømmen før den fysiske flaskehalsen. Da analysene forgikk på et makroskopisk detaljnivå var det ikke mulig å knytte tall direkte til innvirkningen fra hvert kjøretøy eller hver situasjon. Effekten av forstyrrelsene samlet var likevel større enn summen av forstyrrelsene hver for seg.

Gjennom modelleringen ble det erfart at en spesialtilpasset modell kunne gå på bekostning av den helhetlige gjenskapingen av virkelige forhold. Ved gjenskaping av flere hendelsesforløp økte kompleksiteten av modellen. Det ble derfor nødvendig å velge mellom en overordnet korrekt modell og en modell med representativ gjenskaping av alle de observerte hendelsesforløpene.

Ved bruk av node- og lenkespesifikke tilpasninger i nettverket er det i stor grad mulig å gjenskape detaljerte hendelsesforløp i Aimsun. Det oppstår i midlertid problemer i tilfeller der de samme parameterne må benyttes for å beskrive flere handlingsmønstre, da det ikke er mulig å skille mellom parameterens innvirkning på ulike kjøretøysklasser. Avhengig av modellens bruksområde vil det derfor ofte være nødvendig å vurdere hvilke hendelsesforløp som skal prioriteres eller om situasjonene bør gjenskapes hver for seg. Enkelte situasjoner vil også være vanskelig å gjenskape grunnet mangel på

parametere for å styre den spesifikke oppførselen. Dette gjelder spesielt situasjoner der enkeltkjøretøy tar egoistiske beslutninger på bekostning av den resterende trafikkstrømmen.

Kompleksiteten av en spesialtilpasset modell øker også med utstrekningen og ved trafikkvolum som ligger opp mot kapasitetsgrensen. Da enkelte parametere kun gir utslag når bestemte situasjoner inntreffer vil en modell med trafikkvolum opp mot kapasitetsgrensen kunne få stor variasjon mellom de ulike replikasjonene. Økt kompleksitet skaper videre usikkerheter ved endring i nettverket under modellering av tiltak.

Modeller er en tilnærming til virkeligheten som i hovedsak benyttes for å analysere behovet for og effekten av tiltak i nettverket. Ved å benytte modeller som kun er tilpasset ved bruk av globale parametere kan effekten av tiltak være mer entydig enn tilsvarende for spesialtilpassede modeller. Tiden som medgår til spesialtilpasning av en modell kan dermed være overflødig i henhold til videre anvendelse.

Hvis spesialtilpassede modeller likevel benyttes krever det at brukeren er kjent med tilpasningene som er implementert i modellen og hvilke utslag dette kan medføre. For å redusere usikkerhetene, samt øke brukervennligheten, kan det derfor være hensiktsmessig å kun benytte spesialtilpasninger for å gjenspeile statiske forhold i nettverket. Videre foreligger muligheten for at den observerte trafikksituasjonen som ble modellert ikke vil være representativ ved større endringer av de trafikale forholdene, da enkelte parametere kun gir utslag når bestemte situasjoner inntreffer.

For å oppnå en god representasjon av dagens situasjon ble det fokuset på å gjenskape den fysiske flaskehalsen, sene feltskifter oppstrøms for bussholdeplassen, samt bussens ankomst og avgang. Kartleggingen av dagens trafikksituasjon viste at etterspørselen var høyere enn kapasiteten på avkjøringsrampe. Det vil dermed ikke være mulig å løse avviklingsproblemene oppstrøms for flaksehalsen uten å øke kapasiteten eller redusere etterspørselen. Gjennom modelleringen av tiltakene ble det fokusert på tiltak for å øke kapasiteten på avkjøringsrampen, samt økt kapasitetsutnyttelse gjennom redusert innvirkning fra de forstyrrende situasjonene oppstrøms for flaksehalsen. Tiltak for å utjevne etterspørselen ble også modellert, men det var store usikkerheter knyttet til resultatet da spesialtilpasningene i modellen fikk store utslag.

Etter modelleringen av tiltakene ble en utvidelse av avkjøringsrampen til to kjørefelt trukket frem som løsningen med størst effekt, men av trafiksikkerhetsmessige årsaker vil ikke utvidelsen kunne gjennomføres uten å introdusere en ny løsning for bussholdeplassen. Tiltak rettet mot de forstyrrende situasjonen forbedret også situasjonen, men fjernet ikke avviklingsproblemene i sin helhet.

Gjennom kartleggingen og modelleringen kom det tydelig frem at området oppstrøms for en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger vil være veldig sårbart for forstyrrelser. Situasjonen på Sluppen har samtidig begrensede konsekvenser, da det hverken skapes *first-in-first-out*-systemer som «fanger» trafikken som skal mot Trondheim sentrum eller tilbakeblokkeringer som sperrer oppstrøms ramper.

21 Forslag til videre arbeid

Gjennom kartleggingen av området på Sluppen er flere av de forstyrrende faktorer knyttet til kjøreadferd. Bakgrunnen for valgt kjøreadferd i forkant av og gjennom flaskehalsen er derimot lite dekket og vil kunne danne grunnlaget for videre arbeid. Kartleggingen legger også grunnlag for videre analyser av effekten av enkeltsituasjonene på og oppstrøms for avkjøringsrampen.

Grunnet tekniske begrensninger i datainnsamlingen var det ikke mulig å samle inn detaljerte datasett som overlappet i tid. Ved å samle inn detaljerte data fra samme tidsperiode vil området og de observerte hendelsene kunne analyseres med høyere detaljeringsgrad og mindre usikkerhet.

Avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen utgjør kun en liten del av et større vegsystem på Sluppen. Vurderingene av behovet for tiltak vil kunne implementeres i utarbeidelsen av en helhetlig løsning for området og bør sees i sammenheng med pågående prosjekter og kommende planer. Da strekningen utgjør en av hovedtraséene i kollektivnettverket i Trondheim vil videre arbeid rettet mot løsninger for kollektivtrafikken gjennom området være aktuelt.

Det er mange likhetstrekk rundt faktorene som innvirker på avviklingskvaliteten mellom det analyserte caseområdet og påkjøringsrampen fra E6 Omkjøringsvegen til E6 i sørgående retning. Situasjonen kan være noe mer kompleks da krysset ved Bratsbergvegen ligger innenfor influensområdet til flaskehalsen. Videre er en bussholdeplass plassert nedstrøms for påkjøringsrampen, noe som innebærer at busser fra sentrum må krysse den tette trafikkstrømmen i høyre kjørefelt for å betjene holdeplassen. Det vil derfor være mulig å gjennomføre tilsvarende analyser for rampene i sørgående retning.

Referanseliste

- AAKRE, A. (2016) *PowerPoint Presentasjon: Trafikkstrømsteori - Mikromodeller og simulering*. BA6062. TRAFIKKTEKNISK SENTER: NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET.
- AAKRE, E., AAKRE, A. & HAUGEN, T. (2016) *Driver Cooperation in Traffic: A Closed Track Experiment*. Barcelona: ASSOCIATION FOR EUROPEAN TRANSPORT.
- ANDERSEN, M. (2017) Vurderer ekstra kjørefelt øverst i Okstadbakken. *Adresseavisen* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.adressa.no/pluss/2017/05/18/Vurderer-ekstra-kj%C3%B8refelt-%C3%B8verst-i-Okstadbakken-14737182.ece> [Lest: 24. mai 2017].
- ARCHER, J. & CUNNINGHAM, A. (2005) *Mikrosimuleringsoppdrag - Handledning för nöjda beställare och utförare av mikrosimuleringsoppdrag*. Stockholm, Sverige: TRAFIKKONTORET STOCKHOLM STAD.
- ARNOTT, R. (2013) A bathtub model of downtown traffic congestion. *Journal of Urban Economics*, 76, s. 110-121.
- ATB. Sør-Trøndelag fylkeskommune. Tilgjengelig fra: www.atb.no
- BANG, B., HJELKREM, O. A. & TVEIT, Ø. (2010) *PRINT - Prioritering av næringstransport ved feltbruk. Trafikksimulering av effekter*. SINTEF A16794. Trondheim, Norge.
- BURGHOUT, W. (2004) *A note on the number of replication runs in stochastic traffic simulation models*. CRT2004:01. Stockholm, Sverige.
- BÅNG, K.-L., OLSTAM, J., KÖHLER, J., WAHLSTEDT, J. & ANDERSSON, J. (2014) *Handbok för kapacitetsanalys med hjälp av simulering*. TRV2013/79994. Borlänge, Sverige: TRAFIKVERKET.
- CASAS, J., FERRER, J. L., GARCIA, D., PERARNAU, J. & TORDAY, A. (2010) Traffic Simulation with Aimsun. I: BARCELÓ, J. (ed.) *Fundamentals of Traffic Simulation*. New York, NY: Springer New York.
- DAGANZO, C. F. (1997) A continuum theory of traffic dynamics for freeways with special lanes. *Transportation Research Part B*, 31, s. 83-102.

- DEPARTMENT OF TRANSPORT (1996) *Design Manual for Roads and Bridges: Volum 12*. London, England.
- DOWLING, R., SKABARDONIS, A. & ALEXIADIS, V. (2004) *Traffic Analysis Toolbox Volum III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software*. FHWA-HRT-04-040. Washington D.C.
- DRAKE, J. S., SCHOFER, J. L. & MAY JR., A. D. (1967) A statistical analysis of speed-density hypotheses. *Highway research record*, 154, s. 112-117.
- FRØYLAND, P., RISTESUND, Ø. & SIMONSEN, S. (2014) *Superbusskonsept og midtstilt kollektivfelt*. Statens vegvesens rapporter Nr. 312. STATENS VEGVESEN.
- GIPPS, P. G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B*, 15, s. 105-111.
- GIPPS, P. G. (1986a) A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B*, 20, s. 403.
- GIPPS, P. G. (1986b) Multsim: a model for simulating vehicular traffic on multi-lane arterial roads. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28, s. 291-295.
- GRUT, A., WUTTUDAL, T., WIDERØE, J. A. & STATENS VEGVESEN SØR-TRØNDELAG (2002). *På god veg : glimt fra Sør-Trøndelags veghistorie 1945-2001*, Trondheim, Statens vegvesen Sør-Trøndelag.
- HALL, F. L. (1975) Traffic Stream Characteristics. I: GARTHER, N. H., MESSER, C. J. & RATHI, A. K. (eds.) *Traffic Flow Theory*. update and expansion ed.: Federal Highway Administration.
- HANSSEN, T. (2017) Sjekk ruter og holdeplasser i vårt nye superbusskart. *Adresseavisen* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.adressa.no/pluss/nyheter/2017/03/20/Sjekk-ruter-og-holdeplasser-i-v%C3%A5rt-nye-superbusskart-14474588.ece> [Lest: 28. mai 2017].
- HOYER, R. & FELLENDORF, M. (1997) Parametrization of microscopic traffic flow models through image processing. *8th IFAC Symposium on Transport Systems*. Chania, Greece.
- KUFÅS, P. E. (2017) Biler i 80–90 km/t raser over brua i midt- og venstrefelt og kaster seg inn i høyrefila. *Adresseavisen* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.adressa.no/meninger/ordetfritt/2017/05/21/Biler-i-80%E2%80%9390-kmt-raser-over-brua-i-midt-og-venstrefelt-og-kaster-seg-inn-i-h%C3%B8yrefila-14755192.ece> [Lest: 21. mai 2017].
- LANGAAS, M. D., SIMONSEN, S. & TRØAN, R. (2008) *Vegsystemet på Sluppen*. Konseptvalgutredning. Trondheim: STATENS VEGVESEN.
- LIGHTHILL, M. J. & WHITHAM, J. B. (1955) On kinematic waves. I Flow movement in long rivers. II A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings Royal Society A*, 229, s. 281-345.
- MAY, A. D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*, New Jersey, Prentice-Hall.
- MELD. ST. NR. 26 (2012-2013) Nasjonal transportplan 2014 – 2023.
- MUÑOZ, J. C. & DAGANZO, C. F. (2002) The bottleneck mechanism of a freeway diverge. *Transportation Research Part A*, 36, s. 483-505.

- NEWELL, G. F. (1999) Delays caused by a queue at a freeway exit ramp. *Transportation Research Part B*, 33, s. 337-350.
- NVDB - *Nasjonal Vegdatabank* [Internett]. Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: www.vegkart.no
- OLSTAM, J. J. & TAPANI, A. (2004) *Comparison of Car-following models*. VTI meddelande 960A. Linköping, Sverige.
- RICHARDS, P. I. (1956) Shockwaves on the highway. *Operations Research*, 4, s. 42-51.
- SOLLIE, J., STORRØNNING, H. & LILLIESTRÅLE, A. (2016) *Framtidig rutestruktur med superbuss i Stor-Trondheim 2019 – 2029*. Sammendragsrapport med anbefalinger. Trondheim: ATB AS.
- STATENS VEGVESEN (2009) *Planprogram for E6 Sluppen-Stavne til politisk behandling i Trondheim kommune* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/Riksveg/rv706sluppenstavne/Nyhetsarkiv/planprogram-for-e6-sluppen-stavne-til-politisk-behandling-i-trondheim-kommune> [Lest: 24. jan. 2017].
- STATENS VEGVESEN (2010) *Sluppen - Stavne*. Kommunedelplan med konsekvensutredning. Trondheim: STATENS VEGVESEN REGION MIDT.
- STATENS VEGVESEN (2013) *Utvikling av Superbusskonsept i Trondheim*. Trondheim: MILJØPAKKEN.
- STATENS VEGVESEN (2014a) *Slik blir den nye brua på Sluppen i Trondheim* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/Riksveg/rv706sluppenstavne/Nyhetsarkiv/slik-blir-den-nye-brua-p%C3%A5-sluppen> [Lest: 24. mai 2017].
- STATENS VEGVESEN (2014b) *Veileder i trafikkdata*. Håndbok V714. VEGDIREKTORATET.
- STATENS VEGVESEN (2016) *Første bymiljøavtale inngått* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/nasjonalt/f%C3%B8rste-bymilj%C3%B8avtale-inng%C3%A5tt> [Lest: 27. mai 2017].
- STATENS VEGVESEN (2017) *Årsdøgntrafikk trafikkregistreringspunkt Sør-Trøndelag*. Trafikkdata. STATENS VEGVESEN.
- STATENS VEGVESEN (u.å.) *E6 Trondheim–Melhus Miljøpakken* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/Europaveg/e6trondheim> [Lest: 24. mai 2017].
- STORE NORSKE LEKSIKON (2009) *Flaskehals* [Internett]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/flaskehals> [Lest: 23. mai 2017].
- STORE NORSKE LEKSIKON (2017) *Store talls lov* [Internett]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/store_talls_lov [Lest: 08. juni 2017].
- TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS (2017). *Aimsun 8.2 Users' Manual*, Barcelona, Spain, Transportation Simulation Systems.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2016). *Highway Capacity Manual*, Washington DC, The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
- WANG, Y., PANG, Y., CHEN, X. & KAN, Y. (2016) Off-Ramp Blockage on Freeways. *IFAC-PapersOnLine*, 49, s. 159-164.

YAMAGUCHI, D., OKANO, T., SUDO, H., KOBAYASHI, M., OGIHARA, T., IZUMI, N., TANAKA, A. & YOSHII, T. (2016) Identification of Factors that May Affect the Discharge Flow at a Bottleneck. *Transportation Research Procedia*, 15, s. 356-365.

DEL 2:
VITENSKAPELIG ARTIKKEL

Flaskehalsen på avkjøringsramper

Et casestudie av E6 i nordgående retning på Sluppen, Trondheim

Oddrun Dalgard og Håvard Norgård

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for bygg- og miljøteknikk

Sammendrag

Avviklingsproblemer som en konsekvens av flaskehalsen i trafikken utgjør et stort samfunnsproblem. For å øke forståelsen rundt fenomenet er det derfor behov for å kartlegge hva som skjer og hvordan dette kan påvirkes. Denne studien tar utgangspunkt i avkjøringsrampen fra E6 syd i nordgående retning på Sluppen i Trondheim som et caseområde. Rampen kan kategoriseres som en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger. Gjennom en omfattende datainnsamling har det blitt kartlagt hvilke faktorer som er med på å forme dagens trafikksituasjon. Kartleggingen viste at området oppstrøms for flaskehalsen var preget av flere forstyrrende situasjoner som reduserte avviklingskvaliteten gjennom morgenrushet. Ved bruk av mikrosimuleringsverktøyet Aimsun ble en spesialtilpasset modell for caseområdet konstruert med den hensikt å gjenskape de kartlagte situasjonene. Gjennom arbeidet med simuleringsmodellen ble det avdekket at en spesialtilpasset modell kunne gå på bekostning av den helhetlige gjenskapningen av de virkelige forholdene. For å oppnå en god representasjon ble det dermed kun fokusert på de mest fremtredende situasjonene. Ved å ta utgangspunkt i tilnærmingen til dagens situasjon har tiltak for å forbedre trafikkavviklingen på Sluppen blitt vurdert og modellert. Da etterspørselen er høyere enn kapasiteten på avkjøringsrampen vil det ikke være mulig å løse avviklingsproblemer oppstrøms for flaskehalsen uten å øke kapasiteten eller redusere etterspørselen. Tiltak rettet mot de forstyrrende situasjonene vil derimot kunne bedre situasjonen, men ikke fjerne avviklingsproblemer i sin helhet. Gjennom kartleggingen og modelleringen kom det tydelig frem at området oppstrøms for en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger vil være veldig sårbart for forstyrrelser.

Stikkord/Nøkkelord: Flaskehals, avkjøringsrampe, trafikkavvikling, Aimsun

1 Introduksjon

En flaskehals er definert som et ledd som sinker eller stanser en prosess. De resterende leddene blir hindret i å fungere fullgodt ved at flaskehalsen har lavere kapasitet enn det resterende systemet (Store norske leksikon, 2009). I en trafikksammenheng blir flaskehalsen et punkt eller en strekning som markerer overgangen mellom to kapasitetsgrenser, der kapasiteten nedstrøms ikke er tilstrekkelig for å betjene etterspørselen. Dette medfører at trafikken samler seg oppstrøms for flaskehalsen. Avhengig av forskjellen mellom kapasitet og etterspørsel vil flaskehalsen kunne skape avviklingsproblemer av ulik grad. Det er bred enighet om at dårlig trafikkavvikling er et samfunnsproblem som bør løses. Utfordringen med flaskehalsen er at alle er unike, og generelle løsninger må i mer eller mindre grad tilpasses hver situasjon individuelt. Det er derfor behov for å kartlegge hva som skjer og hvordan dette kan påvirkes, for å øke forståelsen rundt fenomenet.

Videre vil avkjøringsrampen fra E6 syd i nordgående retning på Sluppen i Trondheim benyttes som et caseområde. Her består E6 av tre kjørefelt i retning Trondheim sentrum, med en ettfelts avkjøringsrampe mot E6 Omkjøringsvegen, som er hovedfartsåren utenom Trondheim sentrum. Avkjørings-

rampen kan kategoriseres som en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger. Flaskehalsen aktiveres når etterspørselen overstiger kapasiteten, gjennomstrømningen optimaliseres gjennom flaskehalsen og det dannes kø oppstrøms (Transportation Research Board, 2016).

I et område med en flaskehals med konstant kapasitet vil punktet på strekningen med lavest kapasitet alltid utgjøre den fysiske flaskehalsen. Når flaskehalsen aktiveres vil det bli en trafikkansamling oppstrøms, mens trafikken nedstrøms er i et friflytsregime (May, 1990). Samtidig vil situasjoner som oppstår i området kunne redusere kapasitetsutnyttelsen midlertidig. Dette kan sammenlignes med en midlertidig trafikal flaskehals. Hvis det faktiske trafikkvolumet gjennom den fysiske flaskehalsen reduseres til under kapasiteten vil kødannelsen oppstrøms kunne forsvinne og skjule flaskehalsen (Transportation Research Board, 2016).

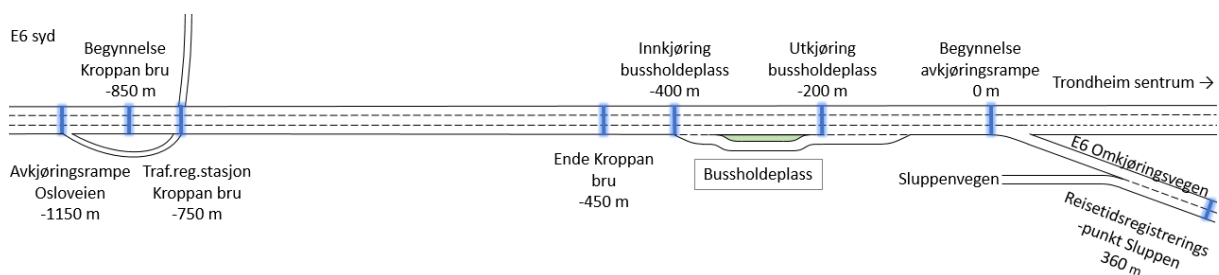
Trafikksituasjonen på Sluppen er kompleks og mange faktorer spiller inn i det totale trafikkbildet. Både person- og næringstransportene beskriver vegsystemet på Sluppen som en flaskehals med store forsinkelser i trafikken, spesielt i rushperiodene (Langaas et al., 2008).

Med utgangspunkt i dette vil dagens situasjon på Sluppen beskrives og forklares gjennom en kartlegging av hvilke faktorer som er med på forme dagens trafikksituasjon. Videre vil området modelleres med mikrosimuleringsverktøyet Aimsun for å undersøke i hvor stor grad det er mulig å gjenskape dagens trafikksituasjon i en modell. Til slutt vil modellen være grunnlag for en vurdering av behovet for tiltak. Muligheten for å generalisere resultatene for bruk i lignende situasjonsvurderinger vil også bli diskutert.

I videre kartlegging av flaskehalsen i caseområdet vil kapasitet være definert som den forventede maksimale gjennomstrømningen i et punkt eller på en strekning, gitt av nettverket. Kjøreforhold og kjøreegenskaper vil være avgjørende faktorer i henhold til hvor mye av den tilgjengelige kapasiteten, satt av nettverket, som benyttes.

2 Datainnsamling

Som grunnlag for kartleggingen ble det samlet inn ulike trafikktekniske data fra området på Sluppen. En illustrasjon av området med avstand fra avkjøringsrampen til et utvalg interessepunkter er vist i figur 1. Etter avkjøringsrampen vil høyre kjørefelt mot Trondheim sentrum være reservert for kollektivtransport.



Figur 1: Illustrasjon av området på Sluppen med avstand fra avkjøringsrampen til et utvalg interessepunkter.

Da trafikk er en kompleks sammensetning av enkeltindividers kjøreadferd begrenset av infrastrukturen og andre kjøretøy, var det ønskelig å avdekke flere aspekter ved trafikken. Datainnsamlingen ble derfor gjennomført ved bruk av videoregistreringer, registreringer fra trafikkregistreringsstasjoner, bomsnittsregistreringer og reisetidsregistreringer, i tillegg til observasjoner gjennom befaringer i området. Det var ønskelig å gjennomføre datainnsamlingen i samme tidsperiode for å få størst mulig grad av overlappende registreringer. Dette lot seg ikke gjøre grunnet tekniske begrensninger.

Det ble gjennomført 6 dager med videoregistreringer fordelt på 2 uker i oktober 2016. Det ble satt opp 3 kameraer for å dekke en størst mulig del av området på og oppstrøms for avkjøringsrampen. I etterkant ble 2 av registreringsdagene valg ut til manuelle videoregistreringer, mens de resterende filmene ble benyttet som et supplement til observasjonene fra befaringsene som ble gjennomført i forkant av og under videoregistreringene. De manuelle videoregistreringene inkluderte utvalgte trafikkvolum registrert i sanntid, samt forekomst av utvalgte handlingsmønstre observert gjennom befaringsene.

Gjennom et samarbeid med Statens vegvesen ble registreringer fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru, ca. 750 meter oppstrøms for avkjøringsrampen, tilgjengeliggjort. Registreringsstasjonen er et nivå 1 tellepunkt med kontinuerlig registrering av kjøretøy. Datasettet som ble mottatt inneholdt 2 perioder på ca. 10 dager med aggregerte timesgjennomsnitt, i tillegg til 2 hverdager med registreringer av enkeltkjøretøy. Alle registreringene var fra oktober 2016, men kun de aggregerte timesgjennomsnittene overlappet delvis med videoregistreringene. Grunnet tekniske problemer med registreringene i venstre kjørefelt var kun registreringer fra høyre og midtre kjørefelt tilgjengelig.

Som et supplement til de mangelfulle dataene gitt på Kroppan bru ble registreringer fra 2 forskjellige bomsnitt tilgjengeliggjort av Statens vegvesen. Det første bomsnittet er plassert like etter at avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og hovedvegen mot sentrum skiller lag, og registrerer kun kjøretøy som skal mot Trondheim sentrum. Det andre bomsnittet er plassert ved Tonstadkrysset, ca. 3,2 km oppstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen, og registrerer all trafikk som benytter seg av strekningen. Mellom bomsnittene er det 2 avkjøringsmuligheter, en avkjøringsrampe mot Osloveien og den aktuelle avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen. Dette muliggjorde en estimering av etterspørselen til avkjøringsrampen på Sluppen. Det tilgjengeliggjorte datasettet dekker uke 37, 2016.

Reisetidsregistreringene ble gjennomført på strekningen fra Tonstad, ca. 2,9 km oppstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen, til E6 Omkjøringsvegen, ca. 0,3 km nedstrøms for begynnelsen av avkjøringsrampen. Datasettet ble tilgjengeliggjort gjennom Statens vegvesen og inneholdt registreringer fra en periode på 13 dager i midten av februar 2017.

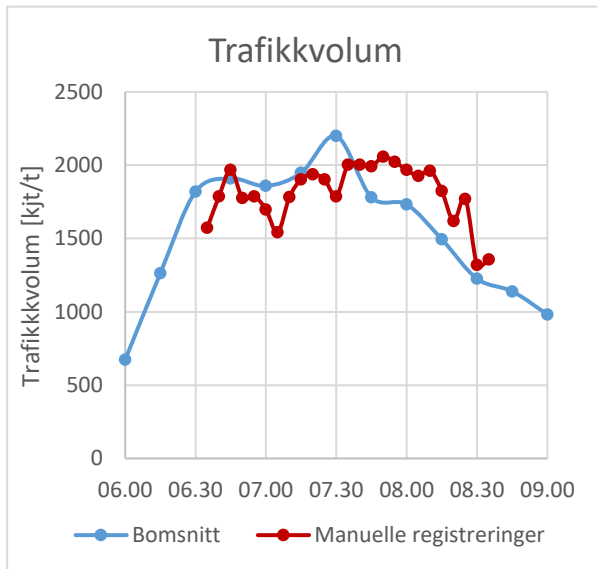
3 Dagens trafikksituasjon

Registreringer fra trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru og bomsnittet på Tonstad viser at perioden med høyest belastning er morgenrushet mellom 06:30 og 08:30. I det høyest belastede kvarteret er trafikkvolumet oppstrøms for avkjøringsrampen på Sluppen ca. 3500 kjt/t. Videre viser de manuelle videoregistreringene at den gjennomsnittlige trafikkfordelingen gjennom morgenrushet er 63 % til E6 Omkjøringsvegen mens den resterende trafikken fortsetter mot Trondheim sentrum. Dette fører til en skjevhet i trafikkfordelingen sammenlignet med kapasitetsfordelingen gitt av antall kjørefelt.

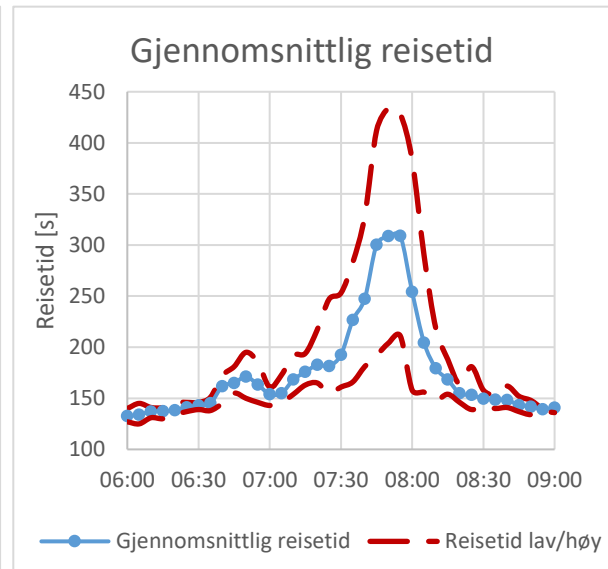
Figur 2 viser registreringene av trafikkvolum mot E6 Omkjøringsvegen fra bomsnittet på Tonstad og de manuelle videoregistreringene gjennom morgenrushet. Registreringene viser hvordan etterspørselen, gitt av trafikkvolumet på Tonstad som ligger oppstrøms for influensområdet til flaskehalsen, er høyere enn trafikkvolumet som kommer gjennom flaskehalsen. Dette resulterer i en flatere rushtopp i form av en lengere periode med høye trafikkvolum på avkjøringsrampen enn på Tonstad.

Reisetidene mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen, fremstilt i figur 3, viser hvordan forsinkelsen på strekningen henger sammen med kapasitetsoverskridelsene på avkjøringsrampen. I samme tidsrom som etterspørselen reduseres kan det observeres en korresponderende maksimal gjennomsnittlig reisetid på 309 sekunder. Dette tilsvarer en dobling av normal reisetid på strekningen. Det er også stor

variasjon mellom registreringsdagene, noe som gjenspeiles i ekstremalverdiene i form av høyeste og laveste registrerte verdi i hvert tidsintervall.

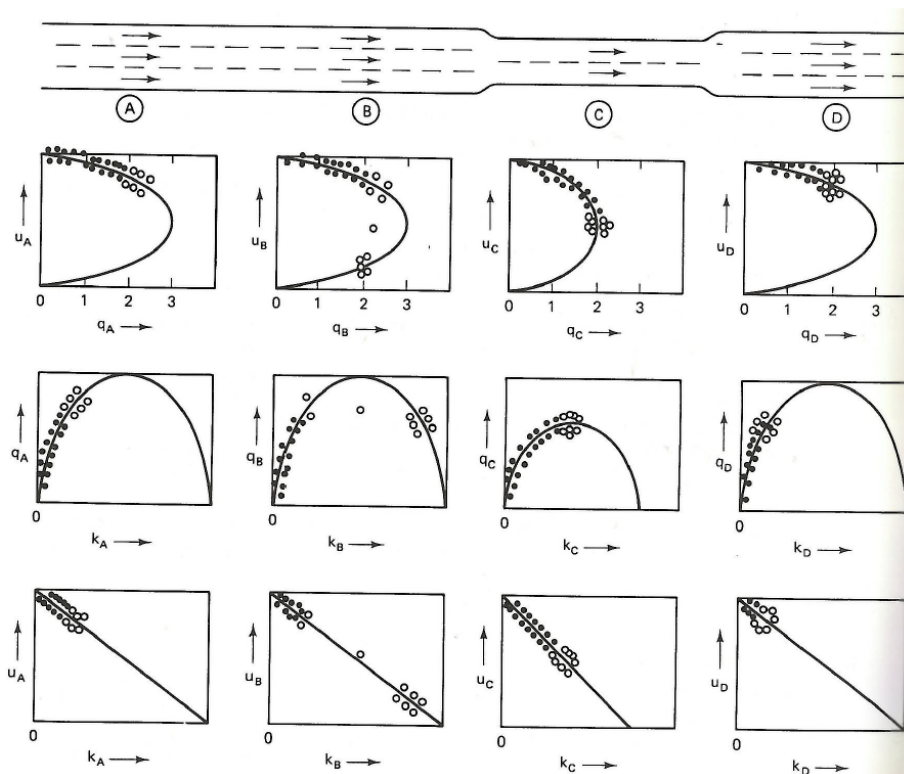


Figur 2: Registreringer av trafikkvolum mot E6 Omkjøringsvegen fra bomsnittet på Tonstad (kvartersoppløsning) og de manuelle videoregistreringene (5-minutters oppløsning). Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt.



Figur 3: Gjennomsnittlig reisetid gjennom morgenrushet fremstilt sammen med registrerte ekstremalverdi i hvert intervall. Registreringene er fremstilt på intervallenes starttidspunkt med 5-minutters oppløsning.

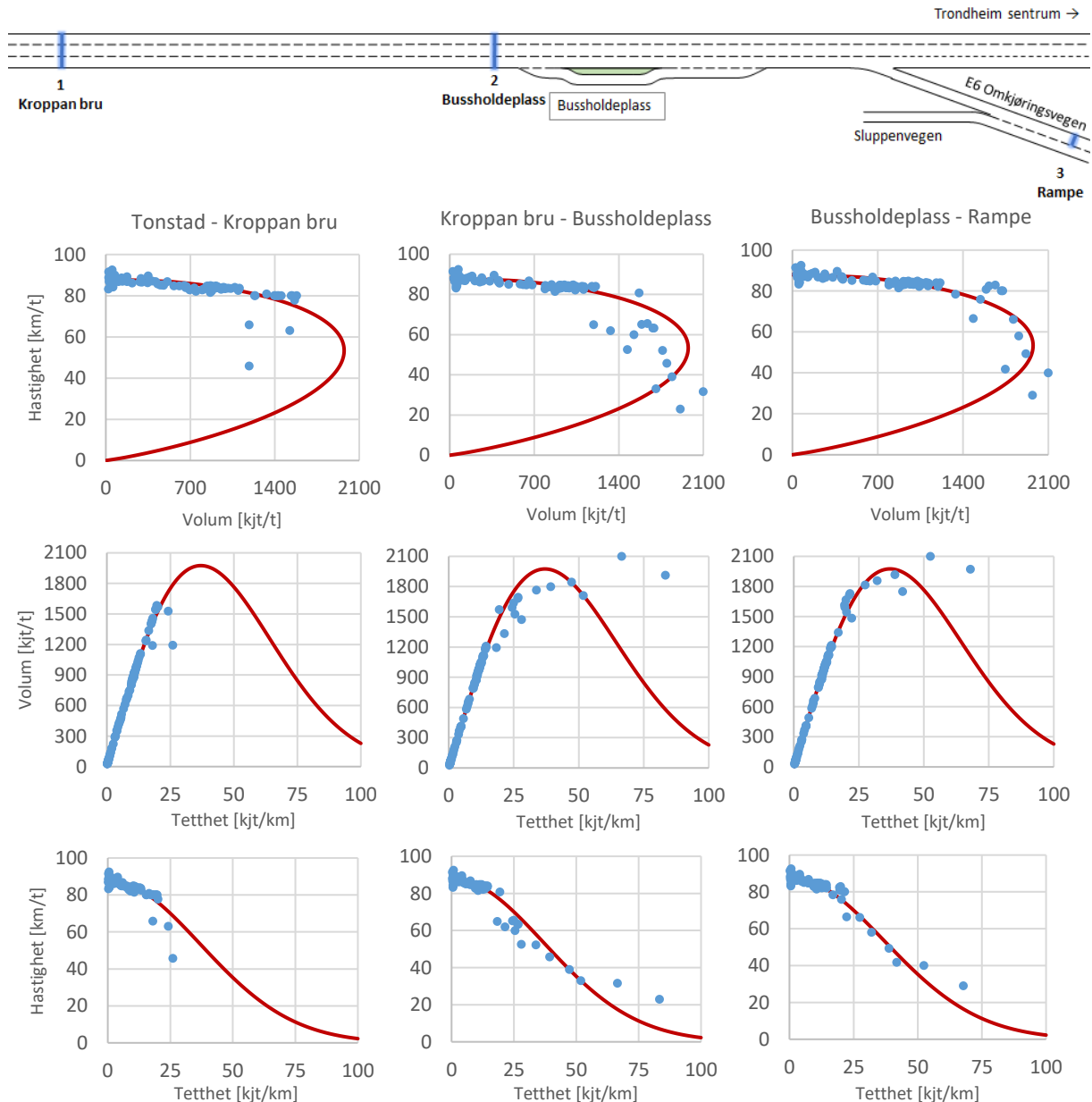
Oppstrøms for, gjennom og nedstrøms for en flaskehals vil trafikkarakteristikkene volum, hastighet og tetthet følge et karakteristisk mønster (May, 1990). Dette mønsteret er presentert i figur 4, der de svarte punktene representerer registreringer i perioder med lave trafikkvolum opp mot kapasiteten av to kjørefelt, og de hule punktene representerer registreringer i perioder med et trafikkvolum tilsvarende kapasiteten gitt av to og et halvt kjørefelt.



Figur 4: Illustrasjon av innvirkningen en flaskehals har på forholdet mellom volum, hastighet og tetthet ved ulike lokasjoner fremstilt ved bruk av en Greenshield-tilnærming (May, 1990, s. 288).

Gjennom en forenklet estimering, basert på de manuelle videoregistreringene, bomsnittsregistreringene og reisetidsregistreringene, har verdier for trafikkarakteristikkene blitt beregnet for tre delstrekninger mellom Tonstad og avkjøringsrampen. Sammenhengen mellom trafikkarakteristikkene over et gjennomsnittsdøgn er presentert i figur 5, sammen med sluttpunktene på de tre delstrekningene.

E6 syd



Figur 5: Sammenhengen mellom volum, hastighet og tetthet for de definerte delstrekningene, basert på estimerer, illustrert sammen med sluttpunktene på de ulike delstrekningene. Punktene viser gjennomsnittlige kvartersverdier for et døgn og er fremstilt sammen med en tilpasning til trafikstrømsmodellen Northwestern, presentert av Drake et al. (1967).

Ved å sammenligne resultatene med mønsteret presentert av May fremkommer det tydelige likhetstrekk mellom estimatene og det fiktive eksemplet. Estimaten gir en tydelig indikasjon på at flaskehalsens influensområde strekker seg tilbake til delstrekning 1 (Tonstad – Kroppan bru). Dette stemmer også med registreringene fra trafikkregistreringsstasjonen. Det er likevel kun gjennom de høyest belastede periodene av morgenrushet at influensområdet til flaskehalsen på Sluppen vil innvirke på trafikavviklingen på delstrekning 1.

Delstrekning 2 (Kroppan bru – Bussholdeplass) vil korrespondere med strekningen B som May presenterer som strekningen med de største avviklingsproblemene, der trafikken ligger mellom friflytsregimet og det overbelastede regimet. Videre vil gjennomstrømningen på delstrekning 3 (Bussholdeplass – Rampe) nærme seg kapasitetsgrensen, noe som innebærer at trafikkstrømmen nærmer seg den optimale verdien for hastighet og tetthet. Dette er forenelig med situasjon C i tilnærmingen til May, der han viser til at selve flaskehalsen vil ha en mer uniform fordeling av registreringer rundt kapasitetsgrensen.

Resultatene gir også en indikasjon på at den trafikale flaskehalsen er forskjøvet oppstrøms for den fysiske flaskehalsen.

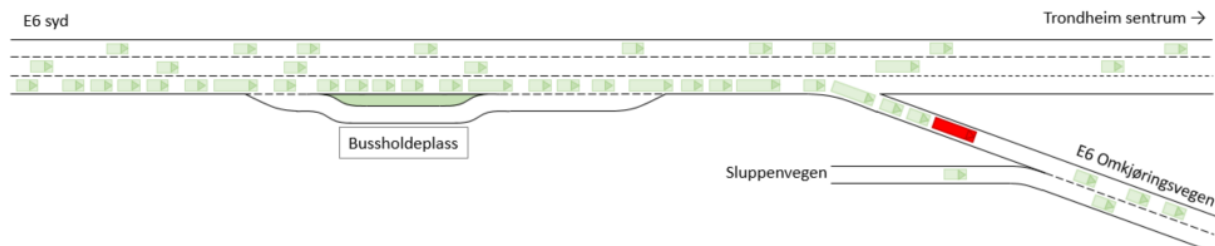
Observasjoner viser at resultatet av den skjeve trafikkfordelingen, i kombinasjon med den høye etterspørselen, er kødannelse oppstrøms for avkjøringsrampen. Dette henger sammen med at kapasiteten er for lav i forhold til etterspørselen. Grunnet utformingen av vegsystemet tvinges kjøretøyene som skal til avkjøringsrampen å samle seg i høyre kjørefelt for å ikke miste avkjøringen. Dette gjør at kapasiteten oppstrøms for avkjøringsrampen kan tilnærmes til kapasiteten av et kjørefelt, som er den samme kapasiteten som i selve flaskehalsen. Forenklet sett vil utstrekningen av den fysiske flaskehalsen være forlenget. Dette gjør området veldig sårbart for situasjoner som kan forstyrre trafikkstrømmen og redusere kapasiteten ytterligere gjennom midlertidige trafikale flaskehalsen.

Gjennom observasjonene er det avdekket 5 situasjoner som er med på å skape og forverre trafikk-situasjonen gjennom å skape sjokkbølger som forplanter seg bakover i trafikken. En oversikt over de 5 situasjonene med en kort beskrivelse er vist i tabell 1.

Tabell 1: Oversikt over de 5 observerte situasjonene på Sluppen.

Situasjon	Beskrivelse
1	Saktegående kjøretøy på avkjøringsrampen
2	Kjøretøy som tvinger frem luker i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen
3	Busser som fletter sammen med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt
4	Busser som krysser gjennom eller reduserer hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøring til bussholdeplassen
5	Kjøretøy som legger seg inn i eller rett før oppløsningsfronten

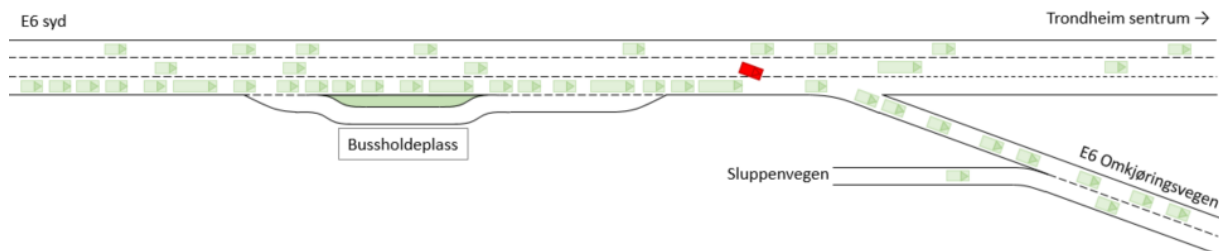
Den første situasjonen skapes av trafikken på selve rampen. Her er det en liten stigning, noe som gjør at enkelte kjøretøy, spesielt tyngre, med lav hastighet sliter med å akselerere oppover bakken. Påvirkningen dette har på den resterende trafikken er illustrert i figur 6.



Figur 6: Illustrasjon av situasjon 1, saktegående kjøretøy på avkjøringsrampen.

Konsekvensene av situasjon 1 blir dermed at kjøretøy lenger bak må bremse ned rett i forkant av rampen. Disse vil igjen kunne få utfordringer med å holde følge med trafikken opp bakken. Samtidig blir hastigheten på selve rampen redusert, noe som resulterer i at et lavere trafikkvolum får passert gjennom flaskehalsen. Da trafikken fra påkjøringsrampen fra Sluppenvegen grupperer seg vil kjøretøyene fra E6 syd i perioder kunne få utfordringer med å legge seg over i høyre kjørefelt etter at de kommer inn på E6 Omkjøringsvegen. Dette vil kunne forverre situasjonen ved å forlenge strekningen med lav hastighet.

Den andre situasjonen er kjøretøy som legger seg i midtre felt, kjører forbi den tette trafikken i høyre kjørefelt, for til slutt å tvinge seg inn i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen. Disse kjøretøyene kutter trafikkstrømmen, og tvinger frem en luke som i utgangspunktet ikke er der. Situasjonen er illustrert i figur 7.

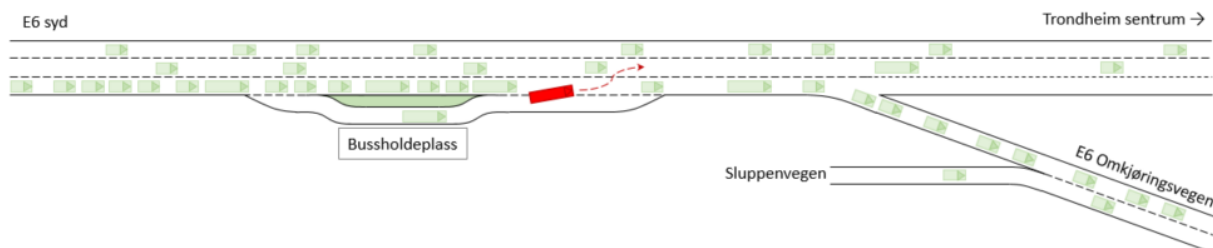


Figur 7: Illustrasjon av situasjon 2, kjøretøy som tvinger frem luker i høyre kjørefelt rett før avkjøringsrampen.

Observasjoner viser at denne typen manøver typisk skjer foran tungtransport, da disse holder noe større luke enn personbilene. Hyppigheten øker også med økt kødannelse oppstrøms i høyre kjørefelt, noe som trolig har en sammenheng med sjåførens oppfatning av økt innspart tid på strekningen. De manuelle videoregistreringene viser at i underkant av 7 % av trafikken på avkjøringsrampen foretok et sent feltskifte i det høyest belastede kvarteret i morgenrushet. Resultatet av feltskiftet blir ofte stor nedbremsing for bakenforliggende kjøretøy, noe som reduserer den totale avviklingskvaliteten til trafikkstrømmen i høyre felt. Da hendelsen oppstår sporadisk kan den for mange komme som et overraskelsesmoment. Dette gjør at flere kjøretøy kan overkompensere under nedbremsingen, og på den måten forverre den totale situasjonen.

Bussen skaper situasjon tre når den kommer ut av bussholdeplassen og må flette med trafikken i høyre kjørefelt på E6 syd for å komme seg tilbake på veggen. Da det er flere ruter som betjener bussholdeplassen blir avgangsfrekvensen høy. De manuelle videoregistreringene viser at det i gjennomsnitt er 1 minutt og 14 sekunder mellom hver avgang, men stor variasjon gjør at det ofte kommer flere busser samtidig.

Ved tradisjonell fletting fra akselerasjonsfelt på en flerfeltsveg vil trafikken i høyre kjørefelt ha muligheten til å skifte kjørefelt mot venstre for å gjøre plass til kjøretøyet som kommer fra akselerasjonsfeltet. Dette er derimot ikke tilfellet i denne situasjonen, da trafikken i høyre kjørefelt er «fanget» der for å kunne fortsette videre på E6 Omkjøringsvegen. Selv om det i teorien er bussene som har vikeplikt praktiseres det i stor grad motsatt. Dette gjør at kjøretøyene i høyre kjørefelt ofte bremser kraftig ned for å slippe frem bussen. Resultatet er en drastisk reduksjon i hastigheten i høyre kjørefelt, som fort forplanter seg bakover i trafikkstrømmen. I tilfeller der tungtransport er involvert blir denne effekten forsterket. Selv om nedbremsingen er stor, bærer situasjonen preg av at bussen er godt synlig for flere kjøretøy bakover i trafikkstrømmen. Observasjoner viste at det i mange tilfeller var en kollektiv tilpasning blant kjøretøyene, og ikke kun en direkte reaksjon på at kjøretøyet foran bremset. Figur 8 illustrerer situasjonen som oppstår.

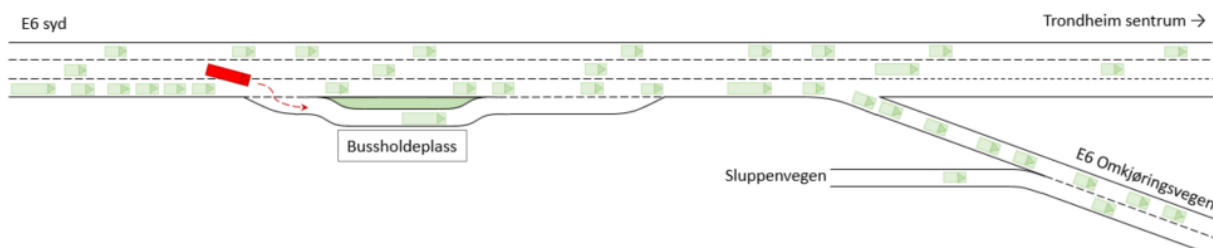


Figur 8: Illustrasjon av situasjon 3, busser som fletter sammen med trafikkstrømmen i høyre kjørefelt.

Når bussen først har kommet over i høyre kjørefelt velger den i de fleste tilfeller å legge seg rett over i det midtre kjørefeltet, da majoriteten av bussene skal fortsette på E6 mot Trondheim sentrum. Dette gjør at kjøretøyene som bremses ned for bussen fort kan akselerere tilbake opp i hastighet ved å tette luken etter bussen. Resultatet er at den saktegående, og i enkelte tilfeller også stillestående, delen av køen får liten fysisk utstrekning, da oppløsningen kan begynne nesten umiddelbart.

Det ble også observert en del tilfeller der bussen som lå i høyre kjørefelt på ulikt vis kom i konflikt med kjøretøy i situasjon 2, da disse ønsket et kryssende feltskifte på samme sted. De fleste bussene valgte da å bli liggende i kjørefelt, da dette ikke hindret dem i å fortsette i riktig retning, men kun reduserte hastigheten over en kortere strekning. I tilfeller der kjøretøy i situasjon 2 kommer like etter at bussen har gjennomført et feltskifte til midtre kjørefelt vil omfanget av situasjon 2 kunne bli vesentlig redusert, da kjøretøyet kan benytte luken etterlatt av bussen i stedet for å tvinge frem en luke som ikke er der.

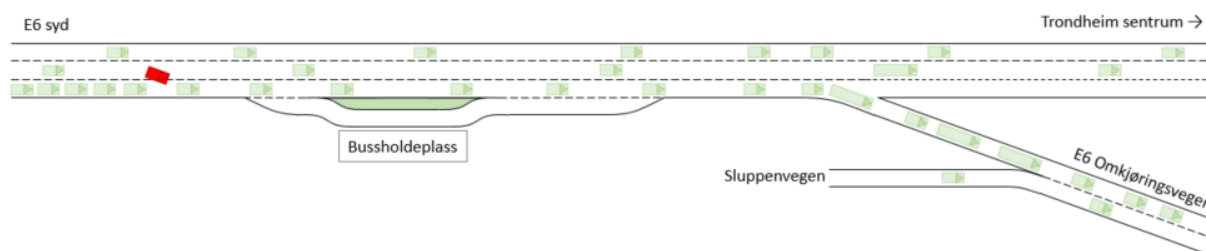
Bussen er også årsaken til den fjerde situasjonen, ved at denne må krysse gjennom eller redusere hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøringen til bussholdeplassen. Praksisen er ulik fra sjåfør til sjåfør, men observasjoner viser at enkelte av bussene velger å legge seg i midtre kjørefelt over Kroppan bru for å slippe å ligge i den saktegående trafikkstrømmen i høyre kjørefelt. Størsteparten av disse skal likevel inn til Kroppanbrua bussholdeplass. Dette gjør at bussene må krysse gjennom den saktegående trafikkstrømmen i høyre kjørefelt, noe som resulterer i at de i enkelte tilfeller må stoppe helt opp og tvinge frem en luke. Denne situasjonen er illustrert i figur 9.



Figur 9: Illustrasjon av situasjon 4, busser som krysser gjennom eller reduserer hastigheten i høyre kjørefelt ved innkjøring til bussholdeplassen.

Trafikkavviklingen oppstrøms for bussholdeplassen blir i stor grad negativt påvirket av manøvrene fra situasjon 4. Situasjonen har en selvforsterkende effekt, der hyppigheten øker med køens utstrekning i høyre kjørefelt på brua. Samtidig vil bussene etterlate seg luker i trafikken som kan redusere konsekvensene av situasjon tre.

Den femte situasjonen kan i stor grad minne om situasjon 2, da denne også omhandler kjøretøy i midtre kjørefelt, som legger seg over i høyre kjørefelt etter at trafikkstrømmen har begynt å tetne til. Forskjellen er at hendelsene som utgjør situasjon 5 skjer på et tidligere tidspunkt. Sjåførene kan oppfattes som mer passive, og det kan i flere tilfeller virke som de tolker situasjonen som siste mulighet for feltskifte før avkjøringsrampen. Dette er illustrert i figur 10.



Figur 10: Illustrasjon av situasjon 5, kjøretøy som legger seg inn i eller rett før oppløsningsfronten.

Felles for kjøretøyene i situasjon 5 er at de legger seg over i høyre kjørefelt i eller rett før det punktet i trafikken der sjokkbølgen løses opp. Dette er typisk et område der avstanden mellom kjøretøyene øker noe grunnet hastighetsendringen. Ettersom hastigheten på trafikkstrømmen i høyre kjørefelt typisk er lav, vil kjøretøyet fra midtre kjørefelt måtte senke hastigheten. Dette gjør at kjøretøyet har en nedadgående hastighet i det feltskiftet gjennomføres, i motsetning til trafikkstrømmen i høyre kjørefelt der de har en oppadgående hastighet. Oppløsningen av sjokkbølgen vil dermed kunne forstyrres, og en ny forverret sjokkbølge vil kunne dannes i den allerede eksisterende sjokkbølgen. Hendelsen er likevel sporadisk i en allerede saktegående trafikkstrøm, noe som gjør at de totale konsekvensene av påvirkningen blir lavere. Hyppigheten vil samtidig øke med økt kødannelse på Kroppan bru, av samme årsak som for situasjon 2 og 4.

Da datainnsamlingen har foregått på et makroskopisk detaljnivå vil det ikke være mulig å knytte tall direkte til innvirkningen fra hvert kjøretøy eller hver situasjon. Basert på de avviklingsproblemene som er kartlagt for hele analyseområdet vil det likevel være mulig å knytte den samlede effekten opp mot hendelsene i området.

Kartleggingen viser at avviklingsproblematikken i morgenrushet initieres av den fysiske flaskehalsen. Uten denne ville det ikke vært grunnlag for like stor konsentrasjon av trafikk i høyre kjørefelt før avkjøringsrampen, og dermed heller ikke for problematikken knyttet til flere av situasjonene. Men når den tette trafikkstrømmen først oppstår vil de fem situasjonene påvirke den allerede belastede situasjonen i større eller mindre grad. Sjokkbølgeeffekten dette skaper vil igjen påvirke dannelsen og oppløsningen av andre sjokkbølger, og den samlede effekten vil være større enn hver av situasjonene isolert sett.

Av de fem observerte hendelsene kan situasjon tre trekkes frem som den med størst negativ effekt på den totale trafikkavviklingen. Dette skyldes kombinasjonen av stor innvirkning, høy frekvens og få muligheter for å tette lukene i trafikkstrømmen før de når den fysiske flaskehalsen.

Hadde datainnsamlingen vært detaljert nok til at situasjonene kunne vært analysert på et mikroskopisk detaljnivå ville det fremdeles ikke vært mulig å skille effektene helt fra hverandre, da situasjonene vil være avhengig av hverandre og ikke nødvendigvis oppstå alene. Det er likevel mulig å undersøke effekten av hendelsene ved å gjenskape dem i en simuleringsmodell. Dette vil videre bli gjort med fokus på å gjenskape de fem situasjonene sammen med den fysiske flaskehalsen.

4 Kalibrering og validering

De innsamlede dataene ble benyttet som inngangsdata i simuleringsmodellen konstruert ved bruk av mikrosimuleringsverktøyet Aimsun. Modellen ble kalibrert mot kapasitet og overordnet systemytelse i henhold til anbefalt strategi for kalibreringsfasen gitt av Dowling et al. (2004). Da rutevalget i modellen var forhåndsbestemt ble ikke kalibrering mot dette gjennomført.

Gjennom kalibreringsfasen var det ønskelig å gjenskape de fem observerte situasjonene sammen med den fysiske flaskehalsen. Aktuelle delmodeller i Aimsun ble dermed *Car-Following Model*, *Lane-Change Model* og *Give Way Model*, der parametere knyttet til reaksjonstid, reaksjonstid ved stopp, ønsket kjørefeltplassering, køkarakteristikk og lukeaksept er sentrale (Transport Simulation Systems, 2017).

For validering av modeller er det anbefalt å benytte krav knyttet til fordeling av trafikkvolum i nettverket og reisetid over strekningen (Department of Transport, 1996, Dowling et al., 2004). Det er også mulig å gjennomføre en visuell validering av volum-hastighetssammenhenger og køutstrekning ved flaskehals (Dowling et al., 2004).

Da det ikke var mulig å kalibrere mot rutevalg ble valideringskriteriet knyttet til dette ikke benyttet. Videre er et vanlig krav for kalibrering mot reisetid er at 85% av alle rutene har en feil på 15% eller mindre (Department of Transport, 1996, Dowling et al., 2004). Da modellen skal være en spesialtilpasset modell for et lite område over en kort tidsperiode, vil vanlige kriterier knyttet til reisetid være for grove. Reisetiden mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen gitt av de virkelige registreringene ble sammenlignet med simuleringsmodellen på 5-minuttersintervall. Valideringskriteriet ble videre skjerpet til at 85% av alle reisetidene skulle ligge mellom ekstremalverdiene fra reisetidsregistreringene. Som supplement til reisetidene ble videoregistreringene og hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru også benyttet for å visuelt validere volum-hastighetssammenhengene og køutstrekningen oppstrøms for flaskehalsen.

Simuleringsmodeller ivaretar variasjonen i virkelige registreringer gjennom stokastiske elementer. Det var dermed nødvendig å kjøre flere replikasjoner av modellen for å få en god tilnærming til dagens situasjon og stabile resultater. Da modellen aldri vil være en perfekt tilnærming til virkeligheten er det nødvendig å estimere nødvendig antall replikasjoner for å oppnå tilfredsstillende, stabilt resultater (Burghout, 2004). Dette ble gjort ved å benytte en student t-test med utgangspunkt i en tillatt feil på den gjennomsnittlige reisetiden gjennom morgenrushet på 6 sekunder. Resultatet viste at det var nødvendig å kjøre 31 replikasjoner før kravet ble innfridd. Med utgangspunkt i dette ble resultatet etter endt validering at 85,5 % av alle reisetidene lå mellom ekstremalverdiene.

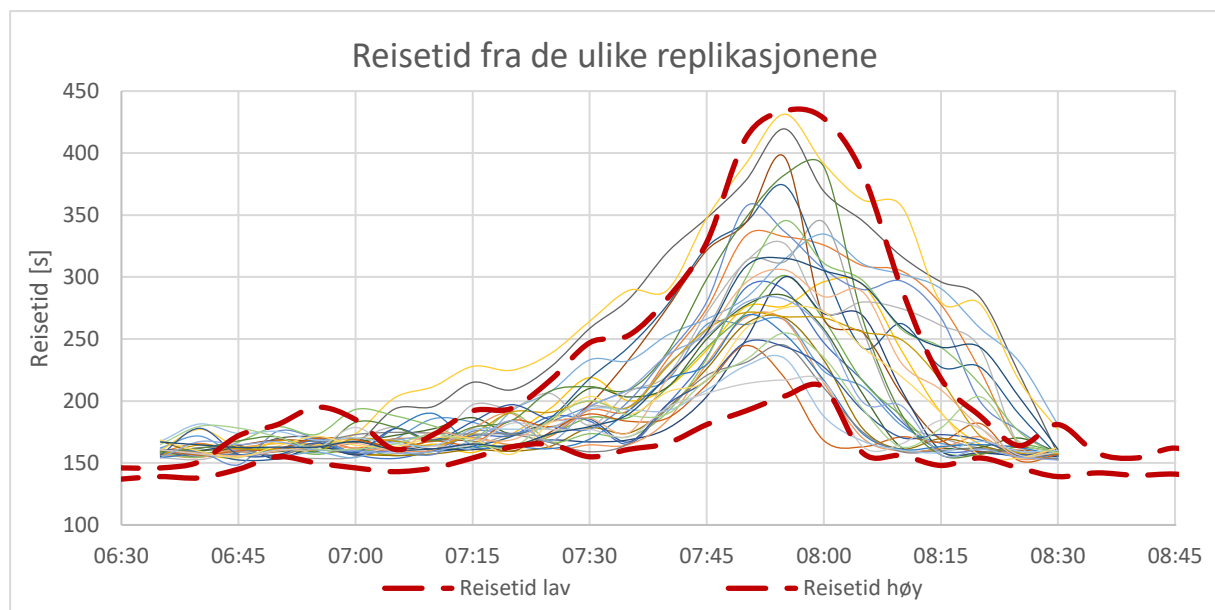
5 Simuleringsmodellen

Gjennom arbeidet med simuleringsmodellen ble det erfart at en detaljtilpasset modell kunne gå på bekostning av den helhetlige gjenskapningen av de virkelige forholdene. Kompleksiteten økte med antall spesifikke hendelsesforløp som skulle gjenskapes, der tilførselen av en ny situasjon kunne medføre at et annet hendelsesforløp ikke oppsto. Dette gjorde det nødvendig å velge mellom en overordnet korrekt modell og en modell med representativ gjenskapning av de ulike hendelsesforløpene.

For å oppnå en god representasjon av analyseområdet gjennom den overordnede modellen for Sluppen ble det dermed fokusert på situasjon 3, 4 og 5, samt trafikkfordelingen mellom avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen og E6 mot Trondheim sentrum. Dette sørget for at de viktigste elementene i analyseområdet var representert. Hvis hver enkelt situasjon skulle blitt gjenskapt i detalj, ville det vært nødvendig å se på og modellere de ulike hendelsene isolert. Enkelte situasjoner vil også

være vanskelig å gjenskape grunnet mangel på parametere for å styre den spesifikke oppførselen. Dette gjelder spesielt situasjoner der sjåførere tar egoistiske beslutninger på bekostning av den resterende trafikkstrømmen.

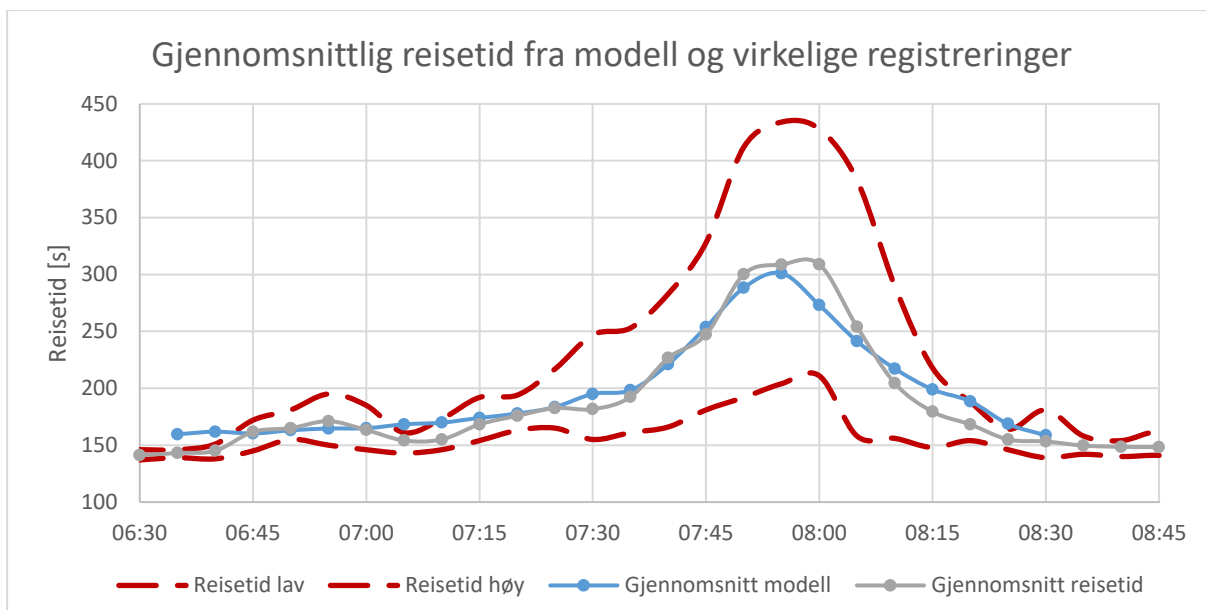
Den endelige modellen viser til store variasjoner i avviklingskvaliteten gjennom morgenrushet, som fremstilt i figur 11. Variasjonen kan ha sammenheng med at trafikkvolumet overskrider den tilgjengelige kapasiteten i flaskehalsen. Innvirkningen fra de ulike situasjonene som medfører sjokkbølgedannelse kan variere stort avhengig av når og hvordan de inntreffer. Videre viser fordelingen til en god overensstemmelse med de virkelige reisetidsregistreringene, men replikasjonene viser noe større variasjon. Dette kan ha sammenheng med at det er flere replikasjoner enn dager med reisetidsregistreringer. Variasjonen er derimot ikke større enn det som kan forventes ved å gjennomføre flere registreringer.



Figur 11: Reisetid mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen fra de ulike replikasjonene og ekstremalverdiene fra de virkelige reisetidsregistreringene, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.

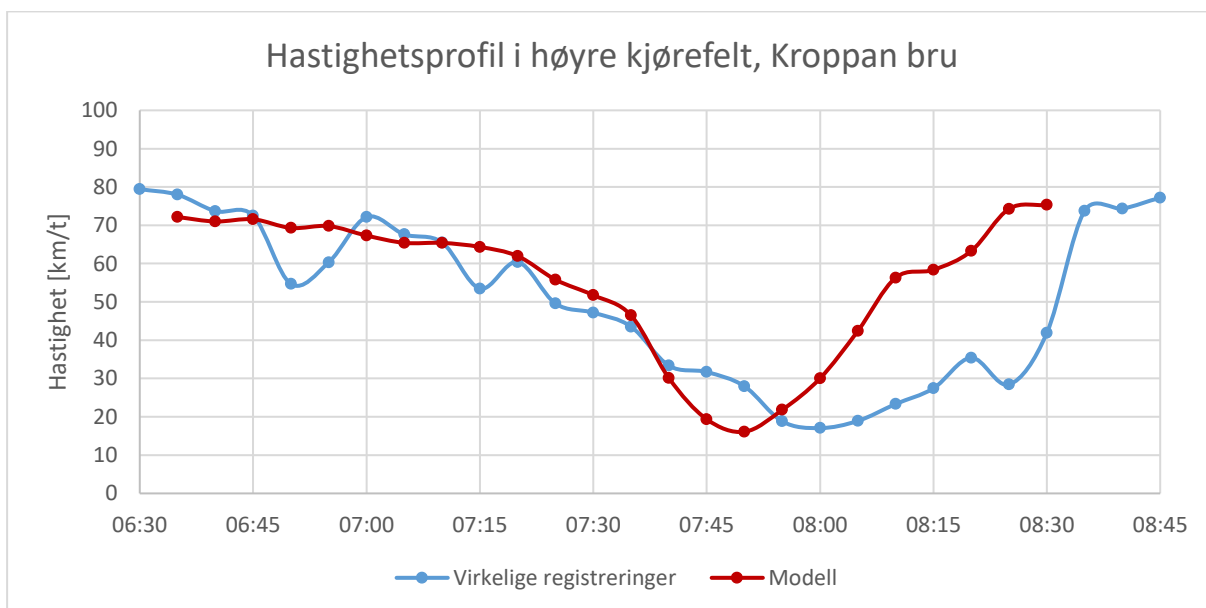
I de to intervallene som utgjør perioden 06:30 – 06:40 ligger alle resultatene fra simuleringene over ønsket verdi. Dette kan ha sammenheng med at kjøretøyene i modellen generelt overholder fartsgrensen mer konsekvent enn i virkeligheten. Videre kan parameterne knyttet til tidlig plassering i høyre kjørefelt for kjøretøy som skal ut på rampen skape mer kø i perioder med lite trafikk, der det i virkeligheten oppstår en bedre fordeling av kjøretøy mellom midtre og høyre kjørefelt. Da det ikke er antydninger til avviklingsproblemer i denne perioden ble de to første intervallene utelatt i valideringsfasen.

For å gi en enklere illustrasjon av reisetidene gitt av simuleringmodellen sammenlignet med de virkelige reisetidsdataene, er gjennomsnittsverdier fra begge dataseriene presentert sammen i figur 12. Av intervallene mellom 06:45 og 08:30 ligger den gjennomsnittlige reisetiden fra modellen over ekstremalpunktene i 3 av 21 tilfeller. Den største differansen mellom de virkelige registreringene og resultatet gitt av simuleringmodellen oppstår kl. 08:00, der reisetiden i modellen ligger mer enn 35 sekunder under faktisk reisetid. Dette forholdet har sammenheng med problemer knyttet til kalibreringsfasen, der det var vanskelig å oppnå en tilstrekkelig kjøpløsning etter at rushtoppen var nådd. For å holde reisetiden tilnærmet innenfor ønsket intervall ved enden av modellens simuleringsperiode ble det derfor valgt å benytte en modell der oppløsningsfasen begynte litt tidligere.



Figur 12: Gjennomsnittlig reisetid mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen fra modell og virkelige registreringer, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.

I figur 13 er den gjennomsnittlige hastighetsprofilen i høyre kjørefelt på Kroppan bru illustrert sammen med den tilsvarende gjennomsnittlige hastighetsprofilen gitt av de 31 replikasjonene i simuleringsmodellen. Figuren viser et godt samsvar mellom de to hastighetsprofilene i perioden 06:30 – 07:35. Videre når modellen bunnpunktet i perioden mellom 07:45 og 07:50, 10 minutter før det virkelige datasettet. Modellen preges av en kortere oppløsningsfase ved trafikkregistreringsstasjonen på Kroppan bru sammenlignet med det virkelige datasettet. Samtidig ble det fra reisetidsregistreringene konstatert at modellen har problemer med å redusere reisetiden ved enden av simuleringsperioden. Avviklingsproblemene nedstrøms for Kroppan bru kan ha sammenheng med at flere kjøretøy i modellen benytter midtre kjørefelt ved økt kødannelse, før de tvinger seg inn i høyre kjørefelt. Dette er med på å forkorte køens utstrekning. Videre vil det medføre en kontinuerlig forstyrrelse av trafikkstrømmen i perioder med mye trafikk, som igjen vil resultere i en redusert oppløsningshastighet.



Figur 13: Gjennomsnittlig hastighetsprofil i høyre kjørefelt på Kroppan bru fra virkelige registreringer og modellen, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.

Det er likevel vurdert at de trafikale forholdene i modellen gir en god gjenspeiling av de faktiske forholdene på strekningen da de karakteristiske trekkene gitt av hastighetsreduksjonen ved begynnelsen av morgenrushet, den lave hastigheten gjennom perioden med størst avviklingsproblemer, samt den raske oppløsningen ved slutten av perioden er gjenskapet.

6 Tiltak

Det er mange typer tiltak som kan innføres for å bedre avviklingen på Sluppen, men størrelsen og omfanget vil i stor grad variere. Tiltakene kan deles inn i fire til dels overlappende hovedkategorier: adferdsendrende tiltak, mindre fysiske tiltak, tiltak som reduserer innvirkningen fra bussen og nye konseptuelle løsninger. Den virkelige effekten av adferdsendrende tiltak er vanskelig å gjenskape i en modell og denne hovedkategorien er dermed ikke inkludert i videre vurdering. Tiltak som endrer etterspørselen er heller ikke vurdert da det er knyttet store usikkerheter til utslaget ved å endre de generaliserte kostnadene.

Tidligere har situasjon 3 blitt trukket frem som den situasjonen med størst negativ effekt på den totale trafikkavviklingen etter at kødannelsen initieres av den fysiske flaskehalsen. Videre har det blitt fokusert på tiltak som kan øke gjennomstrømningen gjennom den fysiske flaskehalsen for å øke avviklingskvaliteten og redusere sårbarheten for hendelser oppstrøms, samt tiltak som reduserer innvirkningen fra bussen.

Med utgangspunkt i dette har fire ulike tiltak blitt modellert og sammenlignet med resultatene fra grunnmodellen. Det første tiltaket er å utvide avkjøringsrampen til to kjørefelt. Dette vil øke kapasiteten og sørge for høyere prioritet for gjennomgangstrafikken. Innvirkningen fra situasjon 1 vil også begrenses. En utfordring med tiltaket er økt konflikt mellom bussen og trafikkstrømmen oppstrøms for rampen. Innføringen av tiltaket vil tvinge bussene til å gjennomføre to feltskifter på en relativt kort og trafikkert strekning for å kunne fortsette mot Trondheim sentrum.

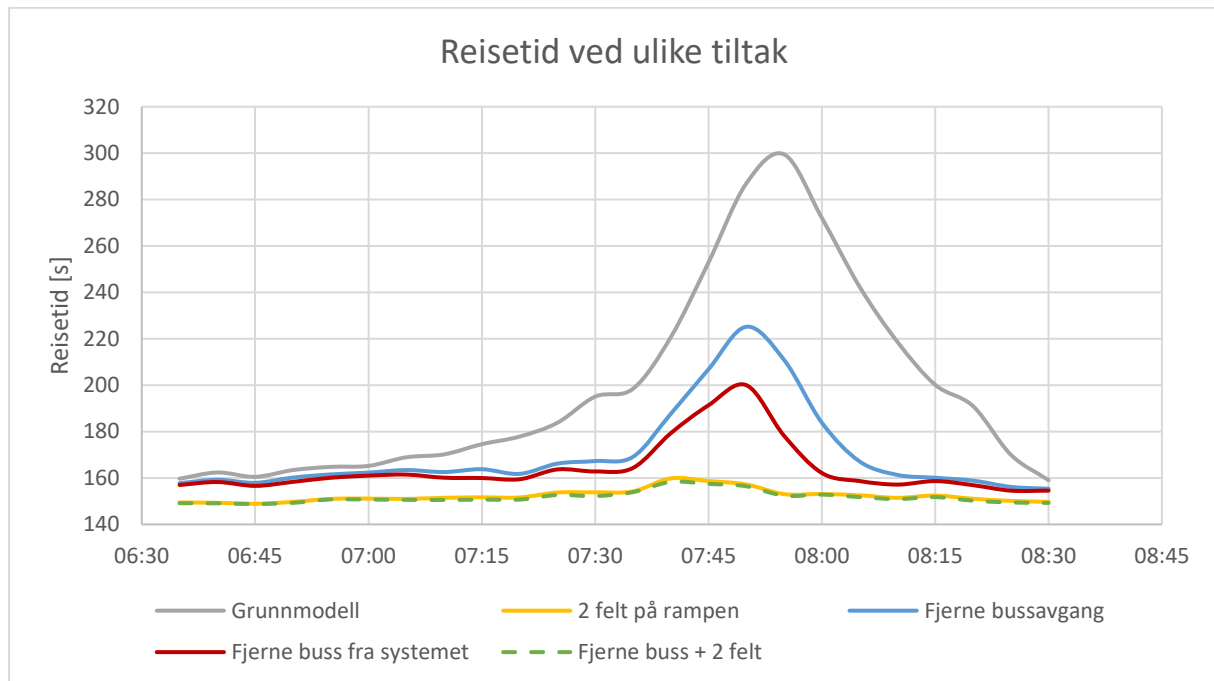
Det andre tiltaket er å flytte utkjøringen fra bussholdeplassen, samtidig som bussholdeplassen beholdes. Forenklet sett kan dette sammenlignes med en fjerning av bussavgangen. Her vil busstraséen for eksempel kunne legges utenom og under Sluppenrampene, for å kobles opp mot E6 mot Trondheim sentrum etter avkjøringsrampen. På denne måten unngås situasjon 3, samtidig som situasjon 4 er uendret. Dette tiltaket vil grense over mot en ny konseptuell løsning.

Det tredje tiltaket er å fjerne bussen helt fra systemet, og på den måten unngå både situasjon 3 og 4. Dette vil for eksempel kunne tilsvare en flytting av bussholdeplassen nedstrøms for flaskehalsen, men kan også være en del av en ny konseptuell løsning.

For å gjøre tiltaket med to kjørefelt på rampen trafiksikkerhetsmessig forsvarlig er en kombinasjon av det første og det tredje tiltaket modellert som et fjerde tiltak. Kapasiteten på avkjøringsrampen vil altså økes til to kjørefelt, kombinert med en fjerning av bussen fra konfliktområdet.

En sammenligning av reisetiden gjennom systemet for de fire tiltakene og grunnmodellen er gitt i figur 14. Ved å utvide avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen til to kjørefelt er den fysiske flaskehalsen fjernet, og det oppstår følgelig ingen avviklingsproblemer gjennom morgenrushet. Fra figuren fremkommer det at den normale reisetiden på strekningen ligger rundt 150 sekunder. I perioden mellom 07:40 og 07:50 kan en minimal økning i reisetiden observeres sammenlignet med den resterende perioden etter at tiltaket ble implementert. Dette viser videre til at etterspørselen er størst innenfor dette tidsrommet. Reisetiden innenfor tilsvarende tidsrom i grunnmodellen øker jevnt innenfor dette intervallet. Dette har en sammenheng med at kapasiteten overskrides, noe som resulterer i en betydelig reduksjon av den totale avviklingskvaliteten. Fra grunnmodellen øker den

forventede reisetiden til det dobbelte av normal reisetid før etterspørselen reduseres rundt 07:55. Etter innført tiltak er reisetiden i det samme tidsintervallet tilbake til den normale.



Figur 14: Reisetid ved de ulike tiltakene, fremstilt på intervallenes sluttidspunkt med 5 minutters oppløsning.

Fra figuren fremkommer bussavgangenes innvirkning på den totale trafikkavviklingen tydelig. I perioden før den største etterspørselen oppstår vil bussavgangene alene i stor grad være årsaken til den økte reisetiden grunnet forstyrrelsen av trafikkstrømmen i høyre kjørefelt før kapasiteten på rampen overskrides.

I det de største avviklingsproblemene oppstår vil en fjerning av bussavgangene medføre at kødannelse og oppløsningsfasen reduseres i omfang. Den høyeste forventede reisetiden forskyves til intervallet før, sammenlignet med grunnmodellen, og utgjør en reduksjon på ca. 75 sekunder for hvert kjøretøy. Ved å fjerne bussavgangene vil varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en reisetid over 180 sekunder, tilsvarende en strekningshastighet under 65 km/t, reduseres med ca. 60 %.

Endringen av reisetid ved å fjerne bussholdeplassen fra systemet sammenlignet med å fjerne innvirkningene fra bussavgangene alene vil tilsvare innvirkningen fra bussankomsten. Bussankomstene gir en mindre innvirkning på den totale trafikkavviklingen gjennom morgenrushet, da et fåtall av bussene krysser trafikkstrømmen i høyre kjørefelt ved innkjøringen. Videre vil ikke en nedbremsing i forkant av bussholdeplassen ved ankomst gi like store innvirkninger som bussavgangene, der hastighetsdifferansen er vesentlig større.

Resultatet av analysen viser til at bussankomsten har liten innvirkning på avviklingsproblemene i start- og slutfasen sammenlignet med bussavgangene. Ved å flytte bussholdeplassen forskyves den høyeste forventede reisetiden til intervallet før, sammenlignet med grunnmodellen, og utgjør en reduksjon på ca. 100 sekunder for hvert kjøretøy. Videre utgjør den maksimale gjennomsnittlige forsinkelsen ca. 50 sekunder sammenlignet med normal reisetid. Ved å flytte bussholdeplassen forbi flaskehalsen vil varigheten av de utstrakte avviklingsproblemene med en reisetid over 180 sekunder reduseres med ca. 80 %.

Reisetiden ved en kombinasjon av det første og tredje tiltaket gir ikke store utslag sammenlignet med en utvidelse av rampen alene. Reisetiden reduseres i en størrelsesorden på 0 til 2 sekunder og resultatet kan derfor anses som tilnærmet likt.

Resultatet av enkelttiltakene rettet mot situasjonene som gir størst innvirkning på den totale trafikkavviklingen på Sluppen viser at det er nødvendig med større tiltak for å fjerne avviklingsproblemene. Teoretisk sett ville det vært tilstrekkelig å utvide rampen til to kjørefelt, noe som viser til at flaskehalsen isolert forårsaker avviklingsproblemene. Dette tiltaket kan ikke gjennomføres alene grunnet trafiksikkerhetsmessige utfordringer knyttet til bussenes kryssing gjennom høyre kjørefelt.

De resterende situasjonene er med på å forverre avviklingen når etterspørselen nærmer seg og overskrider kapasitetsgrensen til flaskehalsen. Tiltak rettet mot dem vil likevel kunne bedre situasjonen, men ikke fjerne avviklingsproblemene i sin helhet.

7 Diskusjon

Innvirkningen av en flaskehals vil være begrenset frem til etterspørselen overskrider kapasiteten, og aktiverer flaskehalsen. I det dette skjer vil videre utvikling av avviklingskvaliteten avhenge sterkt av de trafikale forholdene opp- og nedstrøms for flaskehalsen. Da belastningen ofte er generelt høy i perioder der etterspørselen er større enn kapasitet, vil små forstyrrelser kunne få store etterfølgere. Rushperiodene utgjør typisk perioder der etterspørselen overskrider kapasiteten, og aktiverer flaskehalsene. Karakteristisk for disse periodene er en større utstrekning i tid. Da køutstrekningen oppstrøms for flaskehalsen øker med tiden kapasiteten er overskredet, vil lengere sammenhengende perioder gi større forsinkelser enn kortere perioder. Dette forsterkes av redusert gjennomstrømning i flaskehalsen i høyt belastede perioder ved at den totale tiden tilbrakt i systemet har en lineær sammenheng med den vektete summen av trafikkvolumet i trafikkstrømmene som forlater systemet (Wang et al., 2016).

Registreringene viste en tydelig sammenheng mellom reisetid og etterspørsel. Etter at kapasiteten ble overskredet økte reisetiden jevnt frem til etterspørselen ble redusert til et nivå som var lavere enn kapasiteten. Først når etterspørselen var lav nok begynte køens oppløsningsfase, ved at tilførselen oppstrøms ble lavere enn oppløsningen i front. Dette oppløsningsmønsteret er typisk for fysiske flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger (May, 1990).

I det kødannelsen begynner oppstrøms for en flaskehals blir trafikksituasjonen ekstra sårbar for forstyrrelser. Dette gjelder spesielt flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger, som avkjøringsrampen på Sluppen. Ved forstyrrelser oppstrøms for flaskehalsen vil det dannes luker i trafikkstrømmen som forhindrer at gjennomstrømningen optimaliseres i forhold til kapasiteten. Dette vil kunne føre til uutnyttet kapasitet gjennom flaskehalsen, og på den måten forsterke flaskehalsmekanismen. I tilfeller med en nedstrøms kapasitetsbegrensning vil det kunne oppstå tilbakeblokkering gjennom flaskehalsen. Hvis dette skjer vil ikke flaskehalsen lengre være aktiv og forstyrrelser oppstrøms får mindre innvirkning på den totale avviklingskvaliteten. For flaskehals uten konstant kapasitet vil perioder med redusert kapasitet kunne samle opp trafikk og absorbere lukene i trafikkstrømmen for å optimalisere denne i senere perioder når det er større kapasitet i nettverket. Sårbarheten for forstyrrelser blir dermed mindre.

Selv om sårbarheten for forstyrrelser er noe mindre i flaskehals med nedstrøms kapasitetsbegrensninger og flaskehals uten konstant kapasitet vil den totale kapasiteten over tid kunne være større for flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger. Dette henger sammen med at kapasiteten hverken begrenses over tid eller av tilstøtende aktive flaskehals. Dette gjør at den samlede konsekvensen av flaskehalsen på Sluppen ikke nødvendigvis er like stor som for andre flaskehals typer.

Karakteristisk for avkjøringsrampen på Sluppen er den store utstrekningen av homogene trafikkstrømmer oppstrøms for flaskehalsen, kombinert med den lave graden av innvirkning på resterende trafikkstrømmer. En vanlig form for flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger er innsnevring av en hovedveg. Til forskjell fra Sluppen vil denne typen flaskehals kun bestå av én trafikkstrøm, og mulighetene for eksterne forstyrrelser som reduserer avviklingskvaliteten vil være begrenset. Da kun høyre kjørefelt benyttes på og oppstrøms for avkjøringsrampen vil trafikkstrømmen kunne fungere som en forlengelse av den fysiske flaskehalsen. Dette gjør trafikken i høyre kjørefelt lett tilgjengelig for forstyrrende elementer fra resterende trafikkstrømmer som kan bryte den homogene trafikkstrømmen. Den isolerte trafikkstrømmen gjør det enklere å identifisere årsaken og effekten bak forstyrrelsene.

Det at køen som skal til avkjøringsrampen ikke dekker flere kjørefelt hindrer den i å «fange» trafikkstrømmen som skal mot Trondheim sentrum og danne et *first-in-first-out*-system. Dette gjør at trafikkstrømmene i stor grad fungerer som to adskilte trafikkstrømmer. Kødannelse i flerrørsregimer kan forventes å ha 10% lavere tetthet en tilsvarende trafikkmengde i én samlet kø (Muñoz og Daganzo, 2002). Dette har sammenheng med sjåførenes ønske om å ha større avstandsluker når trafikken i de ulike kjørefeltene har ulik hastighet og flere feltskifter kan være forventet. Flerrørseffekten vil trolig være mindre utslagsgivende på Sluppen, da midtre kjørefelt delvis fungerer som en buffersone mellom de to trafikkstrømmene. Uten denne buffersonen er det forventet at flerrørseffekten ville fått større utslag. Dette vil igjen føre til en økt risiko for dannelse av et *first-in-first-out*-system.

Avstanden til nærmeste oppstrøms av- og påkjøringsrampe er også lengere enn køutstrekningen på Sluppen. Dette hindrer forverret kødannelse gjennom blokkering av oppstrøms ramper og resulterende degradering av infrastrukturkapasiteten (Wang et al., 2016). For andre flaskehals vil blokkering av oppstrøms av- og påkjøringsramper kunne være en avgjørende faktor for køutstrekningen og resulterende forsinkelser, da flere trafikkstrømmer involveres i kødannelsen.

Flaskehalsen på Sluppen har begrensede konsekvenser for området da den i liten grad innvirker på de resterende trafikkstrømmene. Da etterspørselen mot sentrum er betydelig lavere enn den tilgjengelige kapasiteten som foreligger i nettverket er det liten risiko for at det oppstår et *first-in-first-out*-system. I tilfeller der det oppstår et *first-in-first-out*-system som følge av avkjøringsrampen avdekket Muñoz og Daganzo (2002) at gjennomstrømningen begrenses til 1500 kjt/t per kjørefelt uavhengig av antall kjørefelt på motorvegen. Dette innebar en reduksjon av det faktiske trafikkvolumet på ca. 25 % sammenlignet med trafikkstrømmen nedstrøms for den aktive flaskehalsen, noe som videre viser til viktigheten av å forstå årsaken og mekanismene bak flaskehalsen.

8 Konklusjon

Kartleggingen viser at den høyest belastede perioden for avkjøringsrampen på Sluppen var morgenrushet. I det høyest belastede kvarteret var trafikkvolumet oppstrøms for avkjøringsrampen ca. 3500 kjt/t, hvorav 63 % skulle videre mot E6 Omkjøringsvegen og 37 % mot Trondheim sentrum. Dette førte til en skjevhet i trafikkfordelingen sammenlignet med kapasitetsfordelingen gitt av antall kjørefelt.

Gjennom morgenrushet oversteg etterspørselen kapasiteten og den fysiske flaskehalsen ble aktivert. Dette initierte avviklingsproblemer, der den forventede reisetiden mellom Tonstad og E6 Omkjøringsvegen økte til 309 sekunder, tilsvarende en dobling av den normale reisetiden. Avviklingsproblemer ble forsterket av 5 forstyrrende situasjoner som skapte sjokkbølger som forplanter seg bakover i trafikkstrømmen oppstrøms for avkjøringsrampen. Forstyrrelsene ble forårsaket av akselerasjonsproblemer gjennom flaskehalsen, sene feltskifter inn i en allerede

saktegående trafikkstrøm rett i forkant av avkjøringsrampen og oppstrøms for bussholdeplassen, samt bussenes ankomst til og avgang fra bussholdeplassen. Effekten av forstyrrelsen var en forskyving av den trafikale flaskehalsen oppstrøms for den fysiske flaskehalsen på avkjøringsrampen. Av de fem situasjonene er bussavgangen trukket frem som den forstyrrelsen med størst negativ effekt på den totale trafikkavviklingen, grunnet en kombinasjon av stor innvirkning, høy frekvens og få muligheter til å tette lukene i trafikkstrømmen før den fysiske flaskehalsen. Effekten av forstyrrelsene samlet var likevel større enn summen av forstyrrelsene hver for seg.

Gjennom modelleringen ble det erfart at en spesialtilpasset modell kunne gå på bekostning av den helhetlige gjenskapningen av virkelige forhold. Ved gjenskapning av flere hendelsesforløp økte kompleksiteten av modellen. Det ble derfor nødvendig å velge mellom en overordnet korrekt modell og en modell med representativ gjenskapning av alle de observerte hendelsesforløpene. For å oppnå en god representasjon av dagens situasjon ble det dermed fokuset på å gjenskape den fysiske flaskehalsen, sene feltskifter oppstrøms for bussholdeplassen, samt bussens ankomst og avgang.

Da etterspørselen er høyere enn kapasiteten på avkjøringsrampen vil det ikke være mulig å løse avviklingsproblemene oppstrøms for flaskehalsen uten å øke kapasiteten eller redusere etterspørselen. Gjennom modelleringen av tiltakene ble det fokusert på tiltak for å øke kapasiteten på avkjøringsrampen, samt økt kapasitetsutnyttelse gjennom redusert innvirkning fra de forstyrrende situasjonene oppstrøms for flaskehalsen. En utvidelse av avkjøringsrampen til to kjørefelt ble trukket frem som løsningen med størst effekt, men av trafiksikkerhetsmessige årsaker vil ikke utvidelsen kunne gjennomføres uten å introdusere en ny løsning for bussholdeplassen. Tiltak rettet mot de forstyrrende situasjonen vil også kunne bedre situasjonen, men ikke fjerne avviklingsproblemene i sin helhet.

Gjennom kartleggingen og modelleringen kom det tydelig frem at området oppstrøms for en fysisk flaskehals med konstant kapasitet, uten nedstrøms kapasitetsbegrensninger vil være veldig sårbart for forstyrrelser. Situasjonen på Sluppen har samtidig begrensede konsekvenser, da det hverken skapes *first-in-first-out*-systemer som «fanger» trafikken som skal mot Trondheim sentrum eller tilbakeblokkeringer som sperrer oppstrøms ramper.

Forslag til videre arbeid

Gjennom kartleggingen av området på Sluppen er flere av de forstyrrende faktorer knyttet til kjøreadferd. Bakgrunnen for valgt kjøreadferd i forkant av og gjennom flaskehalsen er derimot lite dekket og vil kunne danne grunnlaget for videre arbeid. Kartleggingen legger også grunnlag for videre analyser av effekten av enkeltsituasjonene på og oppstrøms for avkjøringsrampen.

Grunnet tekniske begrensninger i datainnsamlingen var det ikke mulig å samle inn detaljerte datasett som overlappet i tid. Ved å samle inn detaljerte data fra samme tidsperiode vil området og de observerte hendelsene kunne analyseres med høyere detaljeringsgrad og mindre usikkerhet.

Avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen utgjør kun en liten del av et større vegsystem på Sluppen. Vurderingene av behovet for tiltak vil kunne implementeres i utarbeidelsen av en helhetlig løsning for området og bør sees i sammenheng med pågående prosjekter og kommende planer. Da strekningen utgjør en av hovedtraséene i kollektivnettverket i Trondheim vil videre arbeid rettet mot løsninger for kollektivtrafikken gjennom området være aktuelt.

Det er mange likhetstrekk rundt faktorene som innvirker på avviklingskvaliteten mellom det analyserte caseområdet og påkjøringsrampen fra E6 Omkjøringsvegen til E6 i sørgående retning. Situasjonen kan være noe mer kompleks da krysset ved Bratsbergvegen ligger innenfor influensområdet til flaske-

halsen. Videre er en bussholdeplass plassert nedstrøms for påkjøringsrampen, noe som innebærer at busser fra sentrum må krysse den tette trafikkstrømmen i høyre kjørefelt for å betjene holdeplassen. Det vil derfor være mulig å gjennomføre tilsvarende analyser for rampene i sørgående retning.

Takk

Det er ønskelig å rette en takk til førsteamanuensis Arvid Aakre for faglig støtte og veiledning gjennom arbeidet og Statens vegvesen for tilgjengeliggjøring av datamateriale.

Referanseliste

- BURGHOUT, W. (2004) A note on the number of replication runs in stochastic traffic simulation models. CRT2004:01. Stockholm, Sverige.
- DEPARTMENT OF TRANSPORT (1996) Design Manual for Roads and Bridges: Volum 12. London, England.
- DOWLING, R., SKABARDONIS, A. & ALEXIADIS, V. (2004) Traffic Analysis Toolbox Volum III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software. FHWA-HRT-04-040. Washington D.C.
- DRAKE, J. S., SCHOFER, J. L. & MAY JR., A. D. (1967) A statistical analysis of speed-density hypotheses. Highway research record, 154, s. 112-117.
- LANGAAS, M. D., SIMONSEN, S. & TRØAN, R. (2008) Vegsystemet på Sluppen. Konseptvalgutredning. Trondheim: STATENS VEGVESEN.
- MAY, A. D. (1990). Traffic Flow Fundamentals, New Jersey, Prentice-Hall.
- MUÑOZ, J. C. & DAGANZO, C. F. (2002) The bottleneck mechanism of a freeway diverge. Transportation Research Part A, 36, s. 483-505.
- STORE NORSKE LEKSIKON (2009) Flaskehals [Internett]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/flaskehals> [Lest: 23. mai 2017].
- TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS (2017). Aimsun 8.2 Users' Manual, Barcelona, Spain, Transportation Simulation Systems.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2016). Highway Capacity Manual, Washington DC, The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
- WANG, Y., PANG, Y., CHEN, X. & KAN, Y. (2016) Off-Ramp Blockage on Freeways. IFAC-PapersOnLine, 49, s. 159-164.

Vedlegg

Trykte vedlegg i rapporten:

- Vedlegg 1: Oppgavetekst
- Vedlegg 2: Gjennomføring av videoregistreringene
- Vedlegg 3: Datainnsamling videoregistrering
- Vedlegg 4: Rutetider AtB
- Vedlegg 5: Trafikk fra bomsnittet sammenlignet med de manuelle videoregistreringene
- Vedlegg 6: Reisetid forsinkelse og strekningshastighet
- Vedlegg 7: OD-matriser

I tillegg til de trykte vedleggene er følgende digitale vedlegg lagt ved gjennom elektronisk innlevering i DAIM:

- Innsamlede data, originaler
 - o Manuelle videoregistreringer
 - o Trafikkregistreringer
 - o Bomsnittsregistreringer
 - o Reisetidsregistreringer
- Estimering av trafikkfordeling fra bomsnitt
- Estimering av volum-, hastighet- og tetthetssammenhenger til trafikkstrømsmodeller
- Sjokkbølgeanalyse
- Grunnmodell av dagens situasjon fra Aimsun
- Modeller av tiltak fra Aimsun

Vedlegg 1: Oppgavetekst

MASTEROPPGAVE

(TBA4945 TRANSPORT, masteroppgave)

VÅREN 2017

for

Oddrun Dalgard og Håvard Norgård

Flaskehalsar på avkjøringsramper

Et casestudie av E6 i nordgående retning på Sluppen, Trondheim

BAKGRUNN

Flaskehalsar i vegsystemet kan defineres som punkt eller strekninger som har en redusert kapasitet sammenliknet med det tilstøtende nettverket. Dette innebærer vidare at tilgjengelig kapasitet nedstrøms for flaskehalsen ikke benyttes, samtidig som det skaper avviklingsproblemer oppstrøms.

Utfordringen med flaskehalsar er at alle er unike, og generelle løsningar må i mer eller mindre grad tilpassas hver situasjon individuelt. Det er derfor behov for å kartlegge hva som skjer og hvordan dette kan påvirkas, for å øke forståelsen rundt fenomenet.

OPPGAVE

For å bedre forståelsen av flaskehalsar på motorveger uten nedstrøms kapasitetsbegrensningar har avkjøringsrampen på Sluppen, fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen i nordgående retning blitt valgt ut som caseområde.

Formålet med oppgaven er å beskrive, forklare og modellere dagens trafikksituasjon. Gjennom en innledende del skal de ulike faktorene som er med på å forme dagens trafikksituasjon kartlegges og analyseres ved bruk av trafikktekniske modeller. Videre skal det utarbeides en spesialtilpasset mikrosimuleringsmodell i Aimsun som gjenspeiler dagens trafikksituasjon i caseområdet. Arbeidet med modellen vil danne et grunnlag for en sammenlikning med den kartlagte situasjonen i området, for å undersøke i hvor stor grad det er mulig å gjenskape dagens situasjon i en modell. Med utgangspunkt i kartleggingen og modellen skal behovet for tiltak i caseområdet vurderes. Til slutt vil aktuelle tiltak modelleres for å analysere effekten. Det er også ønskelig å se på muligheten for å generalisere resultatene for bruk i lignende situasjonsvurderingar.

Med utgangspunkt i dette skal følgende tre forsknings spørsmål besvares:

«Hvilke faktorer innvirker i størst grad på den totale trafikkavviklingen på Sluppen?»

«I hvor stor grad er det mulig å gjenskape dagens trafikksituasjon i en modell?»

«Er det behov for omfattende endringer i de fysiske løsningene, eller vil mindre tiltak kunne gi tilsvarende eller bedre effekt?»

Vektlegging av de ulike delene kan vurderes av kandidatene i samråd med veileder.

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 [student ved IBM wikiside](#))
- 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 rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på [student ved IBM wikiside](#)

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 godkjenning 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 og Statens vegvesen.

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, befarings, 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/iv/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 kontakt@ibm.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 hos ekstern samarbeidspartner:

Jenny Persson (Asplan Viak)

Børge Bang (Statens vegvesen)

Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU

Dato: 15.01.2017, revidert: 07.06.2017

Underskrift



Faglærer

Vedlegg 2:
Gjennomføring av videoregistreringene

I forkant av videoregistreringene ble det satt av tid til å bli kjent med de ulike funksjonene og begrensningene som forelå ved den utvalgte teknologien som skulle benyttes til gjennomføringen. Det har gått med ca. to hele arbeidsdager til denne prosessen, som er beskrevet mer detaljert i kapittel 6.1. Foruten om dette har det blitt benyttet mye tid på blant annet overføring av rådata, ladning av kameraene og powerbankene, importering og behandling av enkeltfiler i programvaren Virb Edit samt reiser til og fra området.

Gjennomføringen av datainnsamlingen, samt videre arbeid med oppgaven har vært avhengig av at begge partene har deltatt i forberedelsene og orientert seg rundt de teknologiske løsningene, samt valg av kameraposisjon og -montering for å sikre gode data. En sentral del av oppgaven tar utgangspunkt i dagens situasjon og det er derfor viktig at begge partene har deltatt i observasjonene for å få et klart bilde over hvilke momenter som burde undersøkes og analyseres nærmere.

En oversikt over effektiv tid tilbrakt på Sluppen i forbindelse med de ulike aktivitetene i forkant av, under og etter videoregistreringene er vist i tabellen under. Det er også inkludert en kort beskrivelse av arbeidet som ble utført.

Dato	Dag	Tidspunkt	Beskrivelse
13.09.16	Tirsdag	12.00-14.00	Første befaring med observasjoner av område. Hvor oppstår aktuelle situasjoner? Hvor bør kameraene plasseres for best mulig dekning?
21.09.16	Onsdag	06.50-09.00	Observasjon av morgenrushet (til kl. 08.20), observasjon av området og befaring på Stålgården.
04.10.16	Tirsdag	11.30-14.00	Montering av kamera på stålgården og befaring på område.
05.10.16	Onsdag	06.30-09.00	Montering/demontering av kamera 2 og 3, og filming.
06.10.16	Torsdag	06.30-10.00	Montering/demontering av kamera 2 og 3, filming og overføring av data fra fastmontert kamera på Stålgården.
07.10.16	Fredag	06.30-10.00	Montering av kamera 2 og 3, filming og demontering av alle kameraene.
14.10.16	Fredag	12.00-16.00	Oppfølgingsbesøk Sluppen brannstasjon og montering av kamera på Stålgården.
17.10.16	Mandag	06.30-10.00	Montering/demontering av kamera 2 og 3, filming, overføring av data fra fastmontert kamera på Stålgården og befaring på Sluppen brannstasjon.
19.10.16	Onsdag	06.30-09.00	Montering/demontering av kamera 2 og 3, og filming.
20.10.16	Torsdag	06.30-12.00	Montering av kamera 2 og 3, filming, demontering av alle kameraene og rengjøring av tak.

Vedlegg 3:
Datainnsamling videoregistreringer

Trafikk på avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen og påkjøringsrampen fra Sluppenvegen fredag 07.10.16. Tallene oppgitt på 15 minutters intervaller basert på filmenes oppstart og slutt. Unntaket er siste tidsintervall som er den resterende tiden av registreringsperioden.

Avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen – 07.10.16														
Starttid	Sluttid	Trafikkvolum	Lette kjøretøy		Tunge kjøretøy		Tidslukke							
			Antall	Andel	Antall	Andel	<1 sek	1-2 sek	2-3 sek	3-4 sek	4-5 sek	5-7 sek	7-10 sek	>=10 sek
06:28:10	06:43:10	389	351	90,2 %	38	9,8 %	3	128	162	41	18	20	10	5
06:43:10	06:58:10	443	406	91,6 %	37	8,4 %	2	151	188	64	20	14	4	0
06:58:10	07:13:11	426	393	92,3 %	33	7,7 %	3	152	180	49	13	19	8	3
07:13:11	07:28:11	476	426	89,5 %	50	10,5 %	0	190	202	54	16	10	4	0
07:28:11	07:43:11	496	458	92,3 %	38	7,7 %	3	218	202	54	8	4	6	1
07:43:11	07:58:13	513	485	94,5 %	28	5,5 %	6	213	229	45	12	6	2	0
07:58:13	08:13:13	475	426	89,7 %	49	10,3 %	2	190	191	64	18	7	3	0
08:13:13	08:28:13	417	368	88,2 %	49	11,8 %	5	142	158	60	24	22	6	0
08:28:13	08:43:13	319	280	87,8 %	39	12,2 %	3	76	129	42	21	26	12	10
08:43:13	08:54:04	209	182	87,1 %	27	12,9 %	2	42	68	41	16	22	10	8
TOTAL		4163	3775	90,7 %	388	9,3 %	29	1502	1709	514	166	150	65	27

Påkjøringsrampen fra Sluppenvegen – 07.10.16														
Starttid	Sluttid	Trafikkvolum	Lette kjøretøy		Tunge kjøretøy		Tidslukke							
			Antall	Andel	Antall	Andel	<1 sek	1-2 sek	2-3 sek	3-4 sek	4-5 sek	5-7 sek	7-10 sek	>=10 sek
06:28:10	06:43:10	59	58	98,3 %	1	1,7 %	0	6	8	4	2	11	5	22
06:43:10	06:58:10	90	87	96,7 %	3	3,3 %	0	6	12	9	4	12	10	37
06:58:10	07:13:11	66	63	95,5 %	3	4,5 %	0	5	4	4	11	7	5	30
07:13:11	07:28:11	108	104	96,3 %	4	3,7 %	0	4	22	12	11	15	14	30
07:28:11	07:43:11	129	123	95,3 %	6	4,7 %	2	9	24	14	16	23	16	25
07:43:11	07:58:13	125	123	98,4 %	2	1,6 %	1	9	18	12	14	17	26	28
07:58:13	08:13:13	117	115	98,3 %	2	1,7 %	0	9	25	13	10	17	15	27
08:13:13	08:28:13	114	111	97,4 %	3	2,6 %	1	9	18	15	12	13	19	28
08:28:13	08:43:13	66	65	98,5 %	1	1,5 %	0	4	7	8	3	7	9	28
08:43:13	08:54:04	43	42	97,7 %	1	2,3 %	0	3	7	1	1	5	6	20
TOTAL		917	891	97,2 %	26	2,8 %	4	64	145	92	84	127	125	275

Trafikk på avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen og påkjøringsrampen fra Sluppenvegen onsdag 19.10.16. Tallene oppgitt på 15 minutters intervaller basert på filmenes oppstart og slutt. Unntaket er siste tidsintervall som er den resterende tiden av registreringsperioden.

Avkjøringsrampen mot E6 Omkjøringsvegen – 19.10.16														
Starttid	Sluttid	Trafikkvolum	Lette kjøretøy		Tunge kjøretøy		Tidsluke							
			Antall	Andel	Antall	Andel	<1 sek	1-2 sek	2-3 sek	3-4 sek	4-5 sek	5-7 sek	7-10 sek	>=10 sek
06:33:16	06:48:16	427	389	91,1 %	38	8,9 %	3	149	189	45	12	16	10	2
06:48:16	07:03:17	444	416	93,7 %	28	6,3 %	1	170	188	43	21	13	6	2
07:03:17	07:18:17	431	390	90,5 %	41	9,5 %	1	151	189	49	17	14	6	3
07:18:17	07:33:18	467	426	91,2 %	41	8,8 %	3	184	197	57	8	9	10	0
07:33:18	07:48:18	479	450	93,9 %	29	6,1 %	2	176	220	58	15	5	3	0
07:48:18	08:03:18	502	472	94,0 %	30	6,0 %	2	201	223	57	12	7	0	0
08:03:18	08:18:19	496	460	92,7 %	36	7,3 %	5	191	230	45	14	10	1	0
08:18:19	08:33:19	450	398	88,4 %	52	11,6 %	2	161	198	59	15	8	6	1
08:33:19	08:45:11	293	256	87,4 %	37	12,6 %	2	89	112	47	14	15	9	5
TOTAL		3989	3657	91,7 %	332	8,3 %	21	1472	1746	460	128	97	51	13

Påkjøringsrampen fra Sluppenvegen – 19.10.16														
Starttid	Sluttid	Trafikkvolum	Lette kjøretøy		Tunge kjøretøy		Tidsluke							
			Antall	Andel	Antall	Andel	<1 sek	1-2 sek	2-3 sek	3-4 sek	4-5 sek	5-7 sek	7-10 sek	>=10 sek
06:33:16	06:48:16	79	76	96,2 %	3	3,8 %	0	8	14	10	4	9	2	31
06:48:16	07:03:17	127	124	97,6 %	3	2,4 %	0	9	36	10	10	17	15	30
07:03:17	07:18:17	72	70	97,2 %	2	2,8 %	0	3	6	8	10	8	7	30
07:18:17	07:33:18	120	117	97,5 %	3	2,5 %	0	11	27	14	8	15	13	32
07:33:18	07:48:18	138	136	98,6 %	2	1,4 %	0	14	23	16	12	28	14	31
07:48:18	08:03:18	153	149	97,4 %	4	2,6 %	1	22	31	25	14	23	14	23
08:03:18	08:18:19	138	135	97,8 %	3	2,2 %	0	15	20	19	5	21	29	29
08:18:19	08:33:19	87	85	97,7 %	2	2,3 %	0	5	10	9	7	7	16	33
08:33:19	08:45:11	55	49	89,1 %	6	10,9 %	0	1	8	7	4	6	7	22
TOTAL		969	941	97,1 %	28	2,9 %	1	88	175	118	74	134	117	261

Trafikkvolum mot Trondheim sentrum fredag 07.10.16. Tallene er oppgitt på hele 5-minutters intervaller.

Trafikkvolum mot Trondheim sentrum – 07.10.16					
Oppstartstidspunkt	Lette kjøretøy		Tunge kjøretøy		Total
	Midtre kjørefelt	Venstre kjørefelt	Midtre kjørefelt	Venstre kjørefelt	
06:30:00	26	15	2	0	43
06:35:00	31	31	6	1	69
06:40:00	30	39	2	1	72
06:45:00	29	33	4	0	66
06:50:00	46	41	4	0	91
06:55:00	36	36	2	2	76
07:00:00	19	40	8	0	67
07:05:00	32	36	6	1	75
07:10:00	33	47	10	1	91
07:15:00	25	42	8	3	78
07:20:00	24	43	5	0	72
07:25:00	29	37	7	1	74
07:30:00	37	67	5	1	110
07:35:00	40	58	4	2	104
07:40:00	35	79	8	2	124
07:45:00	33	78	4	1	116
07:50:00	32	68	4	2	106
07:55:00	42	66	5	1	114
08:00:00	44	71	8	3	126
08:05:00	41	68	2	1	112
08:10:00	31	45	12	1	89
08:15:00	58	38	5	0	101
08:20:00	41	40	3	0	84
08:25:00	38	20	4	1	63
08:30:00	26	31	4	1	62
08:35:00	33	21	7	0	61
08:40:00	30	36	2	0	68
08:45:00	30	23	7	2	62
TOTAL	951	1249	148	28	2376

Trafikkvolum mot Trondheim sentrum onsdag 19.10.16. Tallene er oppgitt på hele 5-minutters intervaller.

Trafikkvolum mot Trondheim sentrum – 19.10.16					
Oppstarts- tidspunkt	Lette kjøretøy		Tunge kjøretøy		Total
	Midtre kjørefelt	Venstre kjørefelt	Midtre kjørefelt	Venstre kjørefelt	
06:35:00	27	28	2	3	60
06:40:00	29	41	3	3	76
06:45:00	24	44	0	2	70
06:50:00	32	37	3	0	72
06:55:00	31	38	1	2	72
07:00:00	23	35	5	4	67
07:05:00	25	40	7	1	73
07:10:00	25	48	5	1	79
07:15:00	21	56	7	1	85
07:20:00	29	37	3	1	70
07:25:00	39	60	5	1	105
07:30:00	40	59	6	0	105
07:35:00	40	57	4	1	102
07:40:00	22	68	7	1	98
07:45:00	31	85	7	1	124
07:50:00	38	75	8	2	123
07:55:00	43	70	3	1	117
08:00:00	34	71	7	4	116
08:05:00	39	61	3	0	103
08:10:00	38	57	6	5	106
08:15:00	48	45	6	1	100
08:20:00	33	53	6	1	93
08:25:00	34	46	4	2	86
08:30:00	30	35	8	2	75
08:35:00	33	34	5	1	73
08:40:00	30	37	12	1	80
TOTAL	838	1317	133	42	2330

Sene feltskifter registrert på strekningen mellom avkjøringsrampen og utkjøringen fra bussholdeplassen. Tallene oppgitt på 15 minutters intervaller basert på filmenes oppstart og slutt. Unntaket er siste tidsintervall som er den resterende tiden av registreringsperioden.

Sene feltskifter – 07.10.2016													
Starttidspunkt	06.28.10	06.43.10	06.58.10	07.13.10	07.28.10	07.43.10	07.58.10	08.13.10	08.28.10	08.43.10	08.58.10	09.13.10	09.28.10
Sluttidspunkt	06.43.10	06.58.10	07.13.10	07.28.10	07.43.10	07.58.10	08.13.10	08.28.10	08.43.10	08.58.10	09.13.10	09.28.10	09.43.10
Filmlengde	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.15.00	00.10.51
Midttidspunkt	06.35.40	06.50.40	07.05.40	07.20.40	07.35.40	07.50.40	08.05.40	08.20.40	08.35.40	08.50.40	09.05.40	09.20.40	09.35.40
Totalt # sene feltskifter	3	11	6	10	18	31	25	9	7	1			1
Trafikkvolum avkjøringsrampen	389	443	426	476	496	513	475	417	319	209			209
Andel sene feltskifter	0,77 %	2,48 %	1,41 %	2,10 %	3,63 %	6,04 %	5,26 %	2,16 %	2,19 %	0,48 %			0,48 %

Sene feltskifter – 19.10.2016													
Starttidspunkt	06:33:16	06:48:16	07:03:16	07:18:16	07:33:16	07:48:16	08:03:16	08:18:16	08:33:16	08:48:16	09:03:16	09:18:16	09:33:16
Sluttidspunkt	06:48:16	07:03:16	07:18:16	07:33:16	07:48:16	08:03:16	08:18:16	08:33:16	08:48:16	09:03:16	09:18:16	09:33:16	09:48:16
Filmlengde	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:11:55
Midttidspunkt	06:40:46	06:55:46	07:10:46	07:25:46	07:40:46	07:55:46	08:10:46	08:25:46	08:40:46	08:55:46	09:10:46	09:25:46	09:40:46
Totalt # sene feltskifter	4	6	8	7	15	29	27	15	6				6
Trafikkvolum avkjøringsrampen	427	444	431	467	479	502	496	450	293				293
Andel sene feltskifter	0,94 %	1,35 %	1,86 %	1,50 %	3,13 %	5,78 %	5,44 %	3,33 %	2,05 %				2,05 %

Registrering av ankomst, avgang og tilhørende frekvens fra bussholdeplassen Kroppanbrua. Tallene oppgitt på 15 minutters intervaller basert på filmenes oppstart og slutt. Unntaket er siste tidsintervall som er den resterende tiden av registreringsperioden.

Registreringer fra bussholdeplassen – 07.10.16												
Starttid	Film-lengde	Busser			Biler			Samlet				
		Ankomst	Avgang	Avgangsfrekvens Per minutt	Ankomst	Avgang	Avgangsfrekvens Per minutt	Ankomst	Avgang	Avgangsfrekvens Per minutt	Per time	
06:53:58	00:15:00	8	8	0,53	32	0	0	0,00	0	8	0,53	32
07:08:59	00:15:00	14	14	0,93	56	2	2	0,13	8	16	1,07	64
07:23:59	00:15:00	12	12	0,80	48	1	1	0,07	4	13	0,87	52
07:38:59	00:15:00	15	14	0,93	56	1	1	0,07	4	15	1,00	60
07:53:59	00:15:00	11	12	0,80	48	1	1	0,07	4	13	0,87	52
08:08:59	00:15:00	8	8	0,53	32	1	0	0,00	0	8	0,53	32
08:24:00	00:04:30	2	2	0,44	27	1	2	0,44	26,67	3	0,27	16
TOTAL		70	70	0,74	44,44	7	7	0,07	4,44	77	0,81	48,89

Registreringer fra bussholdeplassen – 19.10.16												
Starttid	Film-lengde	Busser			Biler			Samlet				
		Ankomst	Avgang	Avgangsfrekvens Per minutt	Ankomst	Avgang	Avgangsfrekvens Per minutt	Ankomst	Avgang	Avgangsfrekvens Per minutt	Per time	
06:58:20	00:15:00	11	10	0,67	40	1	1	0,07	4	12	0,73	44
07:13:20	00:15:00	11	11	0,73	44	2	2	0,13	8	13	0,87	52
07:28:20	00:15:00	14	14	0,93	56	1	1	0,07	4	15	1,00	60
07:43:20	00:15:00	12	13	0,87	52	5	5	0,33	20	17	1,20	72
07:58:20	00:15:00	11	7	0,47	28	3	3	0,20	12	14	0,67	40
08:13:21	00:09:00	3	7	0,47	28	1	1	0,07	4	4	0,53	32
TOTAL		62	62	0,74	44	13	13	0,15	9	75	5,00	53,57

Vedlegg 4: Rutetider AtB

Busser mot Trondheim sentrum som betjener Kroppanbrua bussholdeplass (K) gjennom morgenrushet, hentet fra sanntidssystemet til AtB.

Rute	Klokkeslett [tt:mm]	Tid mellom avgang [tt:mm]
6	06:30	
47	06:31	00:01
86	06:36	00:05
9	06:38	00:02
11	06:38	00:00
46	06:40	00:02
4	06:42	00:02
6	06:50	00:08
310	06:50	00:00
38	06:54	00:04
46	06:55	00:01
9	06:58	00:03
340	07:00	00:02
47	07:01	00:01
4	07:02	00:01
38	07:04	00:02
46	07:05	00:01
310	07:05	00:00
11	07:07	00:02
410	07:07	00:00
9	07:08	00:01
4	07:10	00:02
6	07:10	00:00
38	07:14	00:04
46	07:15	00:01
47	07:16	00:01
9	07:18	00:02
6	07:20	00:02
310	07:20	00:00
460	07:21	00:01
4	07:22	00:01
38	07:24	00:02
3	07:25	00:01
46	07:25	00:00
9	07:28	00:03
4	07:30	00:02
6	07:30	00:00
340	07:30	00:00
47	07:31	00:01
9	07:33	00:02
38	07:34	00:01
6	07:35	00:01
46	07:35	00:00
310	07:35	00:00

Rute	Klokkeslett [tt:mm]	Tid mellom avgang [tt:mm]
86	07:36	00:01
11	07:37	00:01
410	07:37	00:00
9	07:38	00:01
3	07:40	00:02
6	07:40	00:00
47	07:41	00:01
4	07:42	00:01
9	07:43	00:01
38	07:44	00:01
46	07:45	00:01
9	07:48	00:03
4	07:50	00:02
6	07:50	00:00
310	07:50	00:00
38	07:54	00:04
46	07:55	00:01
47	07:56	00:01
9	07:58	00:02
6	08:00	00:02
340	08:00	00:00
4	08:02	00:02
38	08:04	00:02
6	08:05	00:01
46	08:05	00:00
310	08:05	00:00
410	08:07	00:02
9	08:08	00:01
11	08:08	00:00
4	08:10	00:02
6	08:10	00:00
47	08:11	00:01
38	08:14	00:03
46	08:15	00:01
9	08:18	00:03
6	08:20	00:02
310	08:20	00:00
4	08:22	00:02
38	08:24	00:02
46	08:25	00:01
9	08:28	00:03
4	08:30	00:02
6	08:30	00:00
340	08:30	00:00

Vedlegg 5:
Trafikk fra bomsnittet sammenlignet med
de manuelle videoregistreringene

Sammenligning mellom registrert trafikkvolum fra E6 syd til E6 Omkjøringsvegen og Trondheim sentrum fra de manuelle videoregistreringene (V) og balanseregnskapet (B) basert på registreringer fra bomsnitt.

Til rampen	Lette kjøretøy			Tunge kjøretøy		
	Bomsnittsregistreringer	Video-registreringer	Differanse (B-V)	Bomsnittsregistreringer	Video-registreringer	Differanse (B-V)
06:30	427	370	57	28	38	-10
06:45	438	411	27	39	33	6
07:00	421	392	30	43	37	6
07:15	444	426	18	43	46	-3
07:30	512	454	58	38	34	4
07:45	410	479	-68	35	29	6
08:00	388	443	-55	45	43	3
08:15	327	383	-56	46	51	-4
08:30	264	268	-4	42	38	4
Total	3632	3625	7	359	347	13

Til sentrum	Lette kjøretøy			Tunge kjøretøy		
	Bomsnittsregistreringer	Video-registreringer	Differanse (B-V)	Bomsnittsregistreringer	Video-registreringer	Differanse (B-V)
06:30	164	172	-8	14	12	2
06:45	203	214	-11	11	10	1
07:00	210	202	8	17	25	-7
07:15	243	221	22	18	21	-3
07:30	304	301	3	20	21	0
07:45	323	331	-8	18	20	-2
08:00	278	300	-22	20	26	-6
08:15	237	247	-10	16	17	-1
08:30	209	188	21	18	22	-3
Total	2171	2175	-4	153	172	-19

Vedlegg 6:
Reisetid, forsinkelse og strekningshastighet

Gjennomsnittlig reisetid, forsinkelse og strekningshastighet mellom Tonstad og Sluppenrampen, basert på ni yrkesdager.

Starttidspunkt	Reell reisetid (t_r) [sek]	Forsinkelse (d) [sek]	Strekningshastighet (\bar{u}_s) [km/t]
06:00	133	0	88
06:05	134	0	87
06:10	137	0	85
06:15	137	0	85
06:20	138	0	84
06:25	141	0	83
06:30	143	0	82
06:35	145	0	80
06:40	162	15	72
06:45	165	19	71
06:50	171	25	68
06:55	163	17	71
07:00	154	8	76
07:05	155	9	75
07:10	168	22	69
07:15	176	29	66
07:20	183	36	64
07:25	182	35	64
07:30	192	46	61
07:35	227	80	51
07:40	247	101	47
07:45	300	154	39
07:50	309	162	38
07:55	309	163	38
08:00	254	108	46
08:05	205	58	57
08:10	179	33	65
08:15	168	22	69
08:20	155	9	75
08:25	153	7	76
08:30	150	3	78
08:35	149	2	79
08:40	148	2	79
08:45	143	0	81
08:50	142	0	82
08:55	139	0	84
09:00	141	0	83

Vedlegg 7: OD-matriser

OD-matriser benyttet som inngangsdata til simuleringsmodellen.

Starttidspunkt	Lette kjøretøy fra Tonstad til:			Total
	Osloveien	Sentrum	Avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen	
06:30	36	164	427	627
06:45	39	203	439	681
07:00	39	210	422	671
07:15	42	243	444	729
07:30	50	304	512	866
07:45	45	323	410	778
08:00	41	278	388	707
08:15	35	237	327	599
08:30	29	209	264	502
Total	356	2171	3633	6160

Starttidspunkt	Tunge kjøretøy fra Tonstad til:			Total
	Osloveien	Sentrum	Avkjøringsrampen til E6 Omkjøringsvegen	
06:30	3	14	28	45
06:45	3	11	39	53
07:00	4	17	43	64
07:15	4	18	43	65
07:30	4	20	38	62
07:45	3	18	35	56
08:00	4	20	45	69
08:15	4	16	46	66
08:30	4	18	42	64
Total	33	152	359	544

Starttidspunkt	Fra Sluppenvegen til E6 Omkjøringsvegen		Total
	Lette kjøretøy	Tunge kjøretøy	
06:30	69	2	71
06:45	107	3	110
07:00	68	3	71
07:15	112	4	116
07:30	131	4	135
07:45	138	3	141
08:00	127	3	130
08:15	99	3	102
08:30	66	1	67
Total	917	26	943