NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Trafikkavvikling i flaskehalser

Når to kjørefelt flettes sammen til ett

Emilie Petronelle Nyvoll

Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: juni 2018
Hovedveileder: Arvid Aakre, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR BYGG- OG MILJØTEKNIKK

Oppgavens tittel: **Trafikkavvikling i flaskehalser** Når to kjørefelt flettes sammen til ett	Dato: 30.06.2018 Antall sider (inkl. bilag): 125			
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave	

Navn:
Emilie Petronelle Nyvoll

Faglærer/veileder:
Arvid Aakre

Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:

Ekstrakt:
Trafikkavviklingsproblemer er en stor utfordring i dagens bildrevne samfunn. Med stadig vekst i trafikken, kan allerede eksisterende utfordringer i vegnettet bli mer fremtredende enn tidligere. Det er især når antall kjørefelt på hovedveger reduseres, at avviklingsproblemer kan oppstå og skape store forsinkelser og trafikkfarlige situasjoner.

Problematikken rundt to kjørefelt som flettes sammen til ett, er en kjent situasjon for de fleste som ferdes i trafikken, og gjenstand for betydelig debatt i media. Når og hvordan man skal flette, er det mange ulike oppfatninger av. Forskning viser at glidelåskjøring er det mest effektive metoden. Dersom alle fletter slik, kan den totale kølengden, skapt av flaskehalsen, reduseres med inntil 50 %.

Denne studien vurderer hva som foregår før, i og etter en flaskehals i dag, samt hva som kan skape en mer effektiv trafikkflyt gjennom flaskehalser. Endringer av parametere som kjørefeltbruk, aggressivitet og samarbeid er tiltak som testes. Videre vurderes effektene av ulike parameterendringer ved hjelp av trafikksimuleringsverktøyet Aimsun 8.2.0.

Resultatene av denne studien viser at trafikksimuleringsverktøyet ikke ser ut til å kunne benyttes til simulering av glidelåskjøring da det knyttes stor usikkerhet til påliteligheten av verktøyets genererte resultater. Det presenteres derfor et forslag om at en flettemodell i Aimsun bør utarbeides da sammenfletting av kjørefelt er en veldig vanlig prosess i et vegnett. Det gis også forslag til hva en slik modell bør inneholde.

Videre viser studien antydninger til at trafikkbildet preges av tidlig fletting frem til sammenbrudd har inntruffet. Først når kø har oppstått, fordeles kjøretøyene i begge kjørefelt helt frem til innsnevringen av vegen, og fletter etter glidelåsprinsippet. Det diskuteres også muligheten for en mer effektiv trafikkflyt som følge av innføring av nye trafikkskilt og bedre utforming av flettepunkter.

Stikkord:

1. Sammenfletting
2. Aimsun
3. Glidelåskjøring
4. Kødannelse
5. Zipper Merge

Emilie Petronelle Nyvoll

(sign.)

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2018. Oppgaven er utført under veiledning av førsteamanuensis, og leder for Trafikkteknisk senter, Arvid Aakre.

Masteroppgaven utgjør 30 studiepoeng, og er det avsluttende arbeidet innenfor studieretningen Transport i den femårige sivilingeniørutdanningen ved studiet Bygg- og miljøteknikk.

En stor takk rettes veileder Arvid Aakre for god hjelp med definering av oppgave og faglige innspill underveis i semesteret. Det rettes også en takk til medstudent Sindre Lindheim-Minde for hjelp med programvare.

Trondheim, 30. juni 2018

Emilie Petronelle Nyvoll

Emilie Petronelle Nyvoll

Abstract

Problems with poor traffic flow are a major challenge in today's car-driven society. With steady growth in traffic, already existing road network challenges can be more prominent than before. It is especially when the number of lanes on main roads is reduced, that problems can occur and create major delays and hazardous situations.

The problem of two lanes merging into one, is a familiar situation for most people who travel in traffic, and subject to significant media debate. There are many different perceptions on when and how to merge. Research shows that zipper merging is the most effective method. If everyone merges like this, the overall length of traffic backup, created by the bottleneck, can be reduced by up to 50%.

This study assesses what takes place before, in and after a bottleneck today, as well as what can create a more efficient traffic flow through bottlenecks. Changes to parameters such as lane usage, aggressiveness and cooperation are measures being tested. Furthermore, the effects of various parameter changes are assessed using the Aimsun 8.2.0 traffic simulation tool.

The results of this study show that the traffic simulation tool does not seem to be useable for simulation of zipper merging as there is great uncertainty linked to the reliability of the tool's generated results. It is therefore proposed that a merging model in Aimsun should be developed as merging of lanes is a very common process in a road network. There are also given suggestions for what such a model should contain.

Furthermore, the study indicates that the traffic image is characterized by early merging until breakdown has occurred. Only when queues have occurred, the vehicles are distributed in both lanes all the way to the narrowing of the road and merges according to the zipper merge principle. It also discusses the possibility of a more efficient traffic flow as a result of an introduction of new traffic signs and better design of merge points.

Sammendrag

Trafikkavviklingsproblemer er en stor utfordring i dagens bildrevne samfunn. Med stadig vekst i trafikken, kan allerede eksisterende utfordringer i vegnettet bli mer fremtredende enn tidligere. Det er især når antall kjørefelt på hovedveger reduseres, at avviklingsproblemer kan oppstå og skape store forsinkelser og trafikkfarlige situasjoner.

Problematikken rundt to kjørefelt som flettes sammen til ett, er en kjent situasjon for de fleste som ferdes i trafikken, og gjenstand for betydelig debatt i media. Når og hvordan man skal flette, er det mange ulike oppfatninger av. Forskning viser at glidelåskjøring er det mest effektive metoden. Dersom alle fletter slik, kan den totale kølengden, skapt av flaskehalsen, reduseres med inntil 50 %.

Denne studien vurderer hva som foregår før, i og etter en flaskehals i dag, samt hva som kan skape en mer effektiv trafikkflyt gjennom flaskehalser. Endringer av parametere som kjørefeltbruk, aggressivitet og samarbeid er tiltak som testes. Videre vurderes effektene av ulike parameterendringer ved hjelp av trafikksimuleringsverktøyet Aimsun 8.2.0.

Resultatene av denne studien viser at trafikksimuleringsverktøyet ikke ser ut til å kunne benyttes til simulering av glidelåskjøring da det knyttes stor usikkerhet til påliteligheten av verktøyets genererte resultater. Det presenteres derfor et forslag om at en flettemodell i Aimsun bør utarbeides da sammenfletting av kjørefelt er en veldig vanlig prosess i et vegnett. Det gis også forslag til hva en slik modell bør inneholde.

Videre viser studien antydninger til at trafikkbildet preges av tidlig fletting frem til sammenbrudd har inntruffet. Først når kø har oppstått, fordeles kjøretøyene i begge kjørefelt helt frem til innsnevringen av vegen, og fletter etter glidelåsprinsippet. Det diskuteres også muligheten for en mer effektiv trafikkflyt som følge av innføring av nye trafikkskilt og bedre utforming av flettepunkter.

Innhold

Forord i
Abstract iii
Sammendrag v
Introduksjon 1
1.1 Bakgrunn 1
1.1.1 Når to kjørefelt går sammen til ett 1
1.1.2 Glidelåskjøring 3
1.2 Problem 4
1.3 Formål 4
1.4 Avgrensninger 5
1.5 Struktur 6
Teoretisk grunnlag 7
2.1 Definisjon av begreper 7
2.2 Trafikkavvikling 8
2.3 Trafikkstrømteori 9
2.4 Trafikkmodeller 9
2.4.1 Detaljeringsnivå 10
2.4.2 Analytisk eller simulert 10
2.4.3 Deterministisk eller stokastisk 10
2.5 Flaskehalser 11
2.5.1 Generelt 11
2.5.2 Kapasitetsfall 12
2.6 Sammenfletting og kjørefeltskifte 12
2.6.1 Trafikkskilt 13
2.6.2 Utforming og oppmerking 17
2.6.3 Økt forståelse for hva glidelåskjøring er 18
2.7 Trafikkadferd 20
2.8 Aimsun 21
2.8.1 Mikrosimulering 21
2.8.2 Gjennomføring av en simulering 22
2.8.3 Bilfølgemodell 22
2.8.4 Kjørefeltskiftemodell 24
2.8.5 Tidslukemodell 24

2.8.6 Samarbeidsmodell 25
2.8.7 Nettverkselementer 26
2.8.8 Resultater 28
Metode 29
3.1 Litteratursøk 29
3.2 Datainnsamling 30
3.2.1 Valg av studieområde 30
3.2.2 Videoregistrering 35
3.3 Analyse av innhentet data 41
3.3.1 Hente ut data fra videoregistreringene 41
3.3.2 Behandle data fra videoregistreringene 43
3.4 Bruk av Aimsun 46
3.4.1 Konstruksjon av modell 46
3.4.2 Kjøring av modell med data fra videoregistreringer 52
3.4.3 Konstruksjon av fiktiv modell med fiktive data 54
3.4.4 Vurdering av den fiktive modellens pålitelighet 57
3.4.5 Simuleringer med fiktiv modell 61
3.5 Flettemodell i Microsoft Excel 62
3.6 Utfordringer 66
Resultater 69
4.1 Videoregistreringer 69
4.2 Fiktiv modell i Aimsun 75
4.3 Flettemodell i Microsoft Excel 79
Diskusjon 83
5.1 Hva foregår før, i og etter en flaskehals i dag? 83
5.1.1 Før en flaskehals 83
5.1.2 I en flaskehals 85
5.1.3 Etter en flaskehals 86
5.2 Hvordan kan man skape en mer effektiv avvikling gjennom flaskehalser? 87
5.3 Kan trafikksimuleringsverktøyet Aimsun benyttes til å se på hva som påvirker effektiviteten av en fletteprosess? 90
5.3.1 Resultat fra simuleringer 90
5.3.2 Forslag til modell for fletting i Aimsun 93
5.4 Andre forhold 95
5.4.1 Innsamling og behandling av data 95
5.4.2 Flettemodell i Microsoft Excel 100
Konklusjon og videre arbeid 101
6.1 Konklusjon 101
6.2 Videre arbeid 102
6.2.1 Spørreundersøkelse 102
Referanser 103
Vedlegg 109

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av tidlig fletting («early merge») hvor de røde kjøretøyene representerer snikere. 2
Figur 2: Illustrasjon av glidelåsprinsippet hvor man fletter én til én fra hvert kjørefelt. 3
Figur 3: Skisse av en flaskehals hvor de ulike delene av avviklingsproblemet er inndelt i situasjonene før, i og etter flaskehalsen. 5
Figur 4: Sammenhengen mellom trafikkvolum, hastighet og tetthet med Greenshieldsmodellen. 9
Figur 5: Skisse over utforming av et forbikjøringsfelt på en tofelts veg uten midtrekkverk (Vegdirektoratet, 2014a, figur E.39). 16
Figur 6: Oppmerking og utforming av overgangen mellom firefelts og tofelts veger (Vegdirektoratet, 2015, figur 5.6). 17
Figur 7: Skilt som sier at man skal benytte begge kjørefelt helt frem til flettepunktet (Hentet fra: Colorado Department of Transportation). 18
Figur 8: Bilde som Missouri Department of Transportation (2016) la ut på Twitter. 19
Figur 9: Bilde fra TranBC (2013) som illustrerer glidelåsprinsippet. 19
Figur 10: Nødvendig tidsluke som en funksjon av ventetid (Transport Simulation Systems, 2018). 25
Figur 11: Utsnitt av et nettverk i Aimsun med elementene sentroide, node og lenke. 27
Figur 12: Aimsun kan lage grafer ut ifra resultatene som produseres. 28
Figur 13: To fletteprosesser illustrert med røde sirkler. Fletteprosess (1) lengst bak, og fletteprosess (2) lengst frem til venstre i bildet. 32
Figur 14: Kartutsnitt, studieområde markert i blått (Hentet fra: Gule Sider). 33
Figur 15: Zoomet kartutsnitt, studieområde markert i blått (Hentet fra: Gule Sider). 33
Figur 16: Oversikt over området som er tenkt modellert markert i rødt. 34
Figur 17: Kameraplassering på gangbro, retning Klett til venstre og Trondheim sentrum til høyre. 36
Figur 18: GoPro Hero 5 til venstre og Garmin VIRB XE til høyre (GoPro og Garmin). 37

Figur 19: Viser området hvor E6 krysser over Kv. 6549, samt av- og påkjøringsrampene til E6. 38
Figur 20: Illustrasjon av snarveg nedenom rundkjøring. Køen (røde kjøretøy) strekker seg forbi starten av broen, og snarvegen benyttes for å slippe unna deler av køen. Blå kjøretøy representerer snikere. 40
Figur 21: Viser vanskelige siktforhold for registrering av kjøretøy i flettesituasjonen ved gangbroen. 42
Figur 22: Illustrasjon av en variasjonskurve. 44
Figur 23: Utsnitt av ortofoto uten nettverk tegnet inn. 47
Figur 24: Utsnitt av ortofoto med nettverk tegnet inn. 47
Figur 25: Utsnitt av modell i Aimsun som viser begge fletteprosessene markert med røde piler. 48
Figur 26: Utsnitt av modell i Aimsun som blant annet viser av- og påkjøringsrampene hvor det er mulig å snike seg forbi køen på E6. 49
Figur 27: Skisse av modell i Aimsun med fire sentroider. 50
Figur 28: Skisse av forenklet modell i Aimsun med tre sentroider. 51
Figur 29: Variasjonskurver, laget for å ta høyde for forskjellen mellom avviklet trafikk og etterspørsel i Aimsun, sammenlignet med registrert trafikk. 52
Figur 30: Rampekontroll med periodevis rødt lys. 53
Figur 31: Skisse av den fiktive modellen med to separate trafikkstrømmer som går sammen til én felles trafikkstrøm. 54
Figur 32: Utsnitt av skissen av den fiktive modellen og dens flettestrekning (kryss). 54
Figur 33: Variasjonskurver for fire ulike trafikkmengder. 55
Figur 34: Gjennomsnittlig forsinkelse over tid for variasjon 1 (øverst til venstre), 2 (øverst til høyre), 3 (nederst til venstre) og 4 (nederst til høyre). 56
Figur 35: Gradvis økning av trafikkmengde for å se når sammenbrudd skjer. 59
Figur 36: Variasjonskurver for fem ulike trafikkmengder. 60
Figur 37: Illustrasjon av hvordan flettemodellen i Microsoft Excel ser ut. 62
Figur 38: Utgangspunkt for flettemodell i Microsoft Excel. 65
Figur 39: Forsinkelse beregnet som rektangler under kurve. 66
Figur 40: Fordeling av bruk av kjørefelt mellom høyre og venstre kjørefelt på E6. 70
Figur 41: Fordeling av bruk av kjørefelt mellom kjørefelt på E6 og påkjøringsrampe. 70
Figur 42: Andel førere (snikere) som kjører av E6, via rundkjøringen og på E6 igjen. 71
Figur 43: Hastighetsprofiler fra de tre kjøreturene gjennomført på registreringsdagen. 72

Figur 44: Utsnitt av hastighetsprofiler fra de tre kjøreturene gjennomført på registreringsdagen. 73
Figur 45: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende reaksjonstid. 75
Figur 46: Gjennomsnittlig forsinkelse med ulike skiltutforminger 76
Figur 47: Gjennomsnittlig forsinkelse med og uten samarbeidsmodell aktivert. 76
Figur 48: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende trafikkmengde og hastighet. 77
Figur 49: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende bremsing. 78
Figur 50: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende aggressivitet 78
Figur 51: Illustrasjon av hvordan kapasitetsnivået avhenger av total etterspørsel. 79
Figur 52: Illustrasjon av korrelasjonen mellom kø og forsinkelse. 79
Figur 53: Endring i total etterspørsel og kapasiteten som følge av en økning på ett kjøretøy i første tidsintervall. 81
Figur 54: Endring i total etterspørsel og kapasiteten som følge av en økning på ett kjøretøy i et senere tidsintervall. 81
Figur 55: Endring i kø og forsinkelse som følge av en økning på ett kjøretøy i første tidsintervall. 82
Figur 56: Endring i kø og forsinkelse som følge av en økning på ett kjøretøy i syvende tidsintervall. 82
Figur 57: Tidlig fletting med røde kjøretøy som representerer snikere. 83
Figur 58: Hvordan ikke plassere seg i forhold til de andre kjøretøyene. 84
Figur 59: Hvordan man skal plassere seg i forhold til de andre kjøretøyene. 85
Figur 60: Utklipp fra 3D-visning av modellen med fire sentroider. 86
Figur 61: Utformingen av en flettestrekning som man kanskje bør unngå. 88
Figur 62: Forslag til implementering av en bilfølgemodell i en flettemodell i Aimsun. 94
Figur 63: Mangel på fri flyt og en kø som strekker seg helt ned til Klett (Hentet fra: Google Maps). 95
Figur 64: Ukevariasjon for en veg i kategorien M2 (Vegdirektoratet 2014c). 96
Figur 65: Døgnvariasjon for en veg i kategorien M2 (Vegdirektoratet, 2014c). 97
Figur 66: Ukevariasjon for uke 5 i 2017 for tellepunkt 1602405 Kroppan bru. 98
Figur 67: Døgnvariasjon i uke 5 i 2017 for tellepunkt 1602405 Kroppan bru. 98

Tabelliste

Tabell 1: Trafikkskilt fra forskjellige land.....14
Tabell 2: Typiske søkeord som er benyttet til innsamling av litteratur.....30
Tabell 3: Endring i gjennomsnittlig forsinkelse, maks virtuell kø og reisetid som følge av varierende trafikkmengde. 55
Tabell 4: Resultat fra test med antall nødvendige replikasjoner.....59
Tabell 5: Parametere som ble variert og simulert, understreket variasjon er benyttet som standard utgangspunkt når ikke annet er spesifisert. 61
Tabell 6: Inngangsparametere i flettemodell. 63
Tabell 7: Innhold i flettemodell. 63
Tabell 8: Sammendrag av de tre kjøringen gjennomført i løpet av registreringsperioden.....74
Tabell 9: Varierende gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy ut ifra trafikkmengde og når sammenbrudd inntreffer.....80
Tabell 10: Utdrag fra videoregistreringene.....91

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Trafikkmengden på norske veger øker fra år til år (Statens vegvesen, 2017). Med stadig vekst i trafikken, kan allerede eksisterende utfordringer i vegnettet bli mer fremtredende enn tidligere. Problematikk knyttet til kødannelser, er en typisk utfordring i denne kategorien. Å sikre tilstrekkelig kapasitet på vegene ved bruk av god trafikkavvikling, er derfor viktig. For å kunne avvikle trafikken på en best mulig måte, må man kunne forstå og forutse hvordan og hvor køer dannes i vegnettet (Flügel, Voll og Bockemühl, 2014). For å lykkes med god trafikkavvikling, er blant annet analyser av eksisterende og fremtidige trafikksituasjoner nødvendig. Slike analyser kan være både dyre og utfordrende å gjennomføre, dersom de skal utføres med virkelig trafikk. Trafikkmodellering, ved hjelp av ulike programmer, er derfor et verdifullt verktøy for å analysere trafikkavvikling.

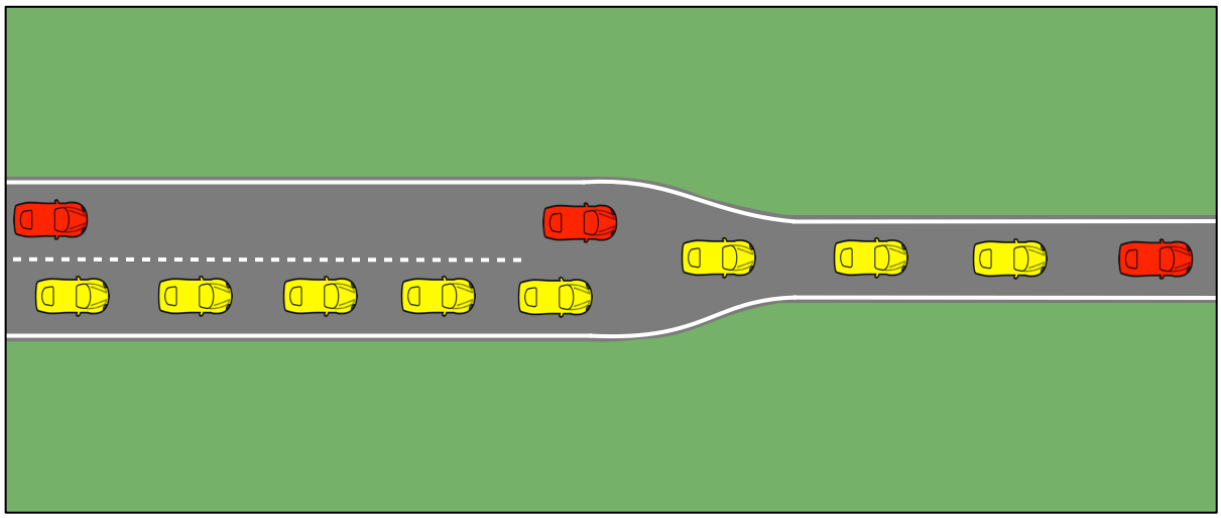
1.1.1 Når to kjørefelt går sammen til ett

I dagens bildrevne samfunn, er avviklingsproblemer en stor utfordring. Flaskehalser i trafikken er ofte selve roten til problemene. Det er især når antall kjørefelt på hovedveger reduseres, at avviklingsproblemer kan oppstå. Problemer med avvikling av trafikk, fører med seg store konsekvenser for trafikkflyten, som igjen kan skape uønskede forsinkelse og trafikkfarlige situasjoner.

Problematikken rundt to kjørefelt som går sammen til ett, er en kjent situasjon for de fleste som ferdes i trafikken, og gjenstand for betydelig debatt i media. Når og hvordan man skal flette i slike situasjoner, er det mange ulike oppfatninger av.

Ved en reduksjon av antall kjørefelt, har man valget mellom «early merge» og «late merge» – tidlig og sen fletting. Tidlig fletting er når man tidlig legger seg inn i høyre kjørefelt, gjerne lenge før punktet for sammenfletting. I slike tilfeller blir ofte venstre kjørefelt tilnærmet fritt for trafikk, mens det dannes det en saktegående kø i det høyre feltet. De som velger å ligge i venstre kjørefelt helt frem til innsnevringen, blir i slike situasjoner ofte sett på som snikere. En illustrasjon av tidlig fletting og snikere er vist i Figur 1.

Sen fletting er når man benytter begge kjørefelt helt frem til flettepunktet, også kalt glidelåsprinsippet. Mer om dette i underkapittel 1.1.2 Glidelåskjøring.



Figur 1: Illustrasjon av tidlig fletting («early merge») hvor de røde kjøretøyene representerer snikere.

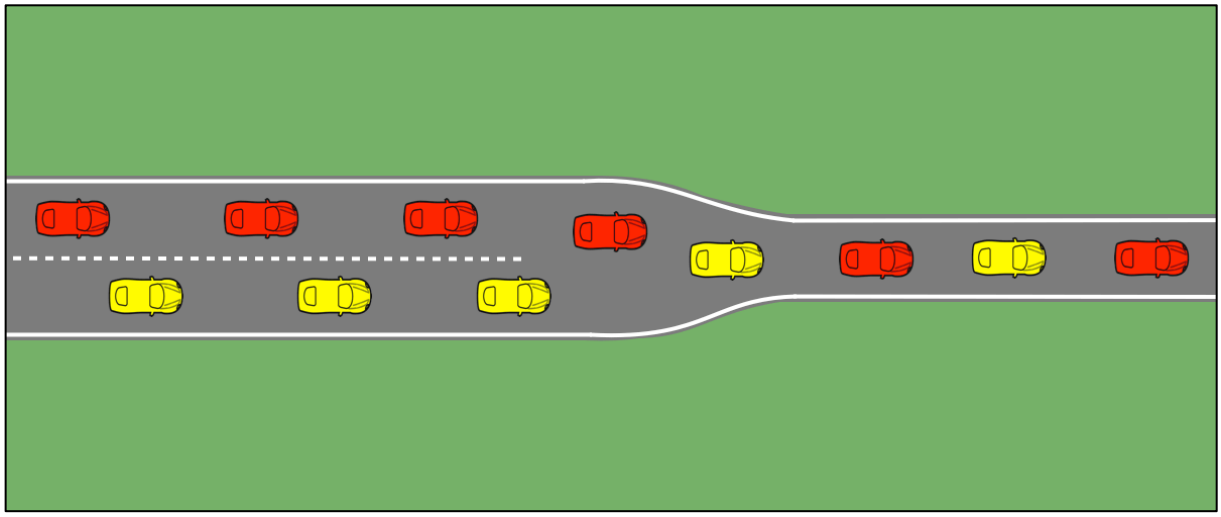
Mange førere mener de sitter med fasiten for når og hvordan man skal flette. Problemet er at ikke alle er enige. En fører som anser tidlig fletting som den riktige flettemetoden, kan ville hindre førere som vil flette sent i å komme frem ved å plassere seg midt i vegen. Å sperre to kjørefelt på denne måten, kan fort skape trafikkfarlige situasjoner som påkjøring bakfra. Dette kan skje ved at et kjøretøy som kommer i høy hastighet i det venstre kjørefeltet og tror det er klar bane, ikke rekker å stanse i tide for å unngå kollisjon med kjøretøyet som ligger midt i vegbanen i en lavere hastighet, tilsvarende hastigheten i det høyre kjørefeltet.

En annen trafikkfarlig situasjon som kan oppstå, er påkjøring bakfra som følge av en sjokkbølge skapt av nedbremsing. Dersom et kjøretøy fra venstre kjørefelt presser seg inn i høyre kjørefelt, kan dette gi en selvforsterkende effekt i det høyre kjørefeltet. Den allerede eksisterende køen i dette feltet, blir da enda lenger, og dens hastighet om mulig enda mer redusert. Dette skjer som

følge av at annen trafikk må bremse for at det nye kjøretøyet skal få plass i rekken av kø. En slik nedbremsing kan dermed skape en sjokkbølge bakover, som igjen kan føre til trafikkulykker.

1.1.2 Glidelåskjøring

Glidelåskjøring er når førere benytter begge kjørefelt helt frem til et definert flettepunkt hvor de så veksler på å kjøre videre inn på det sammenflettede kjørefeltet som en glidelås – først én fra det høyre kjørefeltet, så én fra det venstre kjørefeltet. En illustrasjon av glidelåsprinsippet er vist i Figur 2 hvor de røde og gule kjøretøyene fletter annenhver gang.



Figur 2: Illustrasjon av glidelåsprinsippet hvor man fletter én til én fra hvert kjørefelt.

Ifølge Minnesota Department of Transportation (2018) og tester gjennomført på bane (Aakre, 2017a), kan trafikkavviklingen gjennom en flaskehals, hvor to parallelle strømmer går sammen til én, bli opptil 40 % mer effektiv dersom alle fletter etter glidelåsprinsippet. Den totale lengden med kø som har hopet seg opp på grunn av en reduksjon i antall kjørefelt, kan med andre ord reduseres med opptil 40 %. Forskere ved North Carolina State University mener at glidelåskjøring har potensiale til å redusere køopphoping med så mye som 50 % (North Carolina Department of Transportation, 2016).

At glidelåsprinsippet er mer effektivt enn å flette sammen tidlig, er også illustrert av blant annet Kansas Department of Transportation (2016) og Alberta Motor Association (2017) i filmsnutter omhandlende glidelåskjøring.

1.2 Problem

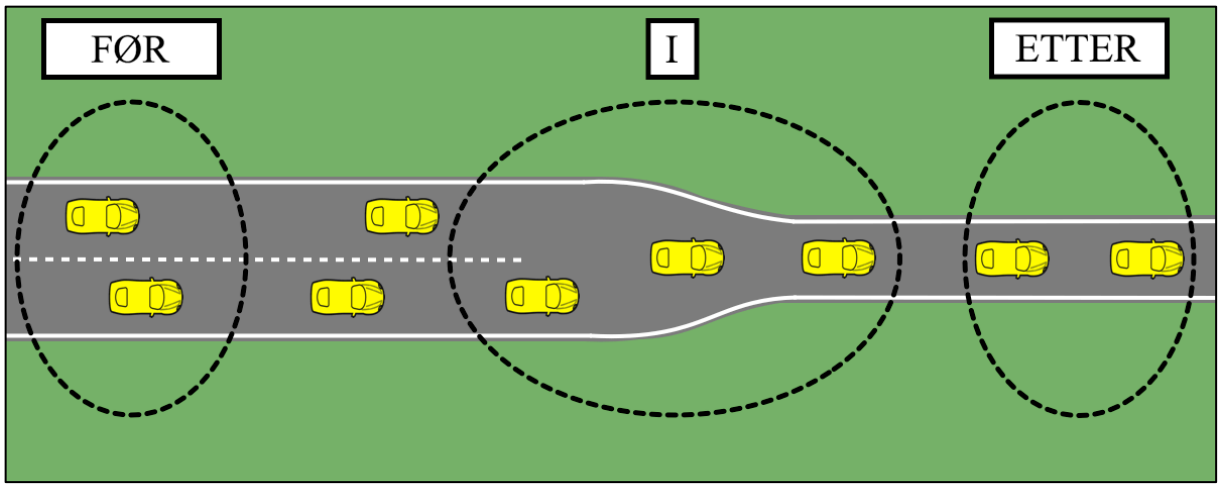
To trafikkstrømmer med noenlunde lik hastighet og trafikkmengde, skal i utgangspunktet kunne flettes fint sammen. Problemet i virkeligheten er at noen fletter tidlig, andre sent. Dette kan skape store hastighetsforskjeller mellom kjørefeltene, som igjen gjør fletteprosessen vanskelig å gjennomføre. Å se nærmere på hvordan trafikkavvikling i en flaskehals foregår, og finne løsninger på hvordan effektivisere fletteprosessen, er derfor av stor relevans for å sikre god trafikkflyt.

Med bedre trafikkavvikling vil man kunne benytte mindre tid på å stå i kø noe som er positivt for både førere og samfunnet. Færre folk i kø vil være fordelaktig for de samfunnsøkonomiske kostnadene, da tid er penger. Det vil også være gunstig for et ønske om bedre luftkvalitet. I Norge er det i hovedsak nitrogendioksid og svevestøv som forverrer den lokale luftkvaliteten, og hovedkilden til utslipp av dette er vegtrafikk (Miljødirektoratet, 2018). Utslipp av nitrogendioksider er høyere for saktegående trafikk og kø enn for trafikk i fri flyt (Miljødirektoratet, 2014). Ved å minke andelen trafikk i kø og øke gjennomsnittlig hastighet i avviklingsprosessen, vil dermed samfunnet dra nytte av effektivisering av fletteprosessen både økonomisk og miljømessig.

Hvis fletteprosessen kan bli opptil 50 % mer effektiv og være fordelaktig for både førere og samfunnet, kan man stille spørsmålstegn til hvorfor det ikke flettes effektivt i utgangspunktet. Uklare retningslinjer, utforming og oppmerking av veg, samt ulike syn på trafikkadferd kan være noen av årsakene.

1.3 Formål

Formålet med masteroppgaven er å kunne beskrive hva som skjer med trafikkavviklingen i området før, i og etter en flaskehals, se Figur 3. Det er også ønskelig å beskrive hvordan trafikkavviklingsproblemene knyttet til flaskehalser kan løses på en hensiktsmessig måte ved hjelp av kartlegging, modellering, retningslinjer og holdningsendringer. Dette innebærer blant annet å se på hvordan flettestrekninger skiltes og utformes i Norge i dag, og hva som eventuelt kan endres for å bedre avviklingen. Det blir også aktuelt å se på regelverk, samt hvordan fletting foregår i andre land.



Figur 3: Skisse av en flaskehals hvor de ulike delene av avviklingsproblemet er inndelt i situasjonene før, i og etter flaskehalsen.

Da trafikkmodellering er et verdifullt verktøy for å analysere trafikkavvikling, vil det være naturlig å ta i bruk et slikt program. Simuleringsprogrammet Aimsun vil derfor bli benyttet til å simulere trafikken gjennom flaskehalsen for å se hvordan endring av ulike parametere kan påvirke effektiviteten på trafikkavviklingen. Dette kan være alt fra trafikkmengdefordeling til førerens aggressivitet. En slik simulering vil forhåpentligvis være med på å gi et innblikk i hva som påvirker trafikkavviklingen i en flaskehals, og om det er teoretisk mulig å gjøre en flaskehals mer effektiv.

For å finne ut dette, har tre forskningsspørsmål blitt formulert:

1. Hva foregår før, i og etter en flaskehals i dag?
2. Hvordan kan man skape en mer effektiv avvikling gjennom flaskehalser?
3. Kan trafikksimuleringsverktøyet Aimsun benyttes til å se på hva som påvirker effektiviteten av en fletteprosess?

1.4 Avgrensninger

For å kunne gjennomføre en god masteroppgave, var avgrensing av tema svært viktig. Mye tid har gått med til å samle inn og behandle data, samt å lære seg programverktøyet som har blitt benyttet til modellering. Både med tanke på å få samlet inn tilstrekkelig og god nok data, og at flaskehalsen skulle modelleres, var det derfor nødvendig å begrense oppgaven. Oppgaven ble derfor begrenset til kun å gjelde flaskehalser hvor to kjørefelt går sammen til ett, helst uten

innvirkninger fra andre elementer langs vegen som av- og påkjøringsramper da dette kunne påvirke dataene. Teori om trafikkmodelleringsprogrammet Aimsun, er begrenset til teori som er benyttet i masteroppgaven.

1.5 Struktur

Denne masteroppgaven har en klassisk oppbygging med teori, metode, resultater, diskusjon og konklusjon. Kapittel 2, Teoretisk grunnlag, bygger på litteratursøket gjennomført som en del av metoden. Her presenteres teori som er relevant for oppgaven. I kapittel 3, Metode, blir de ulike metodene som er benyttet i studien beskrevet detaljert steg for steg. Dette gjelder alt fra hvordan videoregistreringene ble gjennomført, og hvilke utfordringer man har støtt på underveis, til hvorfor en flettemodell i Microsoft Excel ble utarbeidet. Videre presenteres resultatene fra studien i kapittel 4, Resultater, ved bruk av figurer og tabeller. Kapittel 6, Diskusjon, tar for seg diskusjonen rundt forskningsspørsmålene og resultatene. Her drøftes også muligheten for en mangel i trafikksimuleringsverktøyet Aimsun, og et forslag til hva en flettemodell i Aimsun bør innehold, presenteres. I kapittel 7, Konklusjon og videre arbeid, presenteres konklusjonen av studien, samt forslag til videre arbeid.

Følgende dokumenter er vedlagt elektronisk til oppgaven i en zip-fil:

- Python-skript benyttet til registreringene «telle.py»
- Data fra registreringene «Registreringer.xlsx»
- Flettemodell i Microsoft Excel «Flettemodell.xlsx»
- Data fra kjøreturene «GPS data.xlsx»
- Data fra fiktive matriser «Fiktive matriser.xlsx»
- Aimsun-modell med fire sentroider «Modell1.ang»
- Aimsun-modell med tre sentroider «Modell2.ang»
- Fiktiv modell med fiktive data i Aimsun «Modell3.amg»
- Aimsun-modell benyttet til test av nødvendig antall replikasjoner «Modell4.ang»
- Data fra test av endringer av parametere i Aimsun «Parametertest.xlsx»

Kapittel 2

Teoretisk grunnlag

2.1 Definisjon av begreper

Ulike begreper og sammenhenger blir ofte benyttet til å forklare trafikkbildet og alt som inngår i det. Det å ha klart definerte begreper er viktig både for å unngå misforståelser blant mennesker, og for at for eksempel en trafikkmodell skal få korrekt inndata slik at resultatene den gir ut, skal kunne tolkes riktig.

Definisjonene av begrepene i dette delkapittelet er i hovedsak hentet fra Trafikksikkerhets-håndboken (TØI, 1980). Begrepene som ikke står nevnt i denne håndboken, er definert ut ifra begreper beskrevet i «Basic traffic terms and relations» (Aakre, 2017b) og Traffic Flow Fundamentals (May, 1990).

Etterspørsel: Det antall kjøretøy som for øyeblikket ønsker å passere et punkt eller en kort strekning i en gitt tidsperiode. Måles vanligvis i kjøretøy per time (kjt/t).

Flettestrekning: Strekning hvor vegen innsnevres med ett kjørefelt. Over denne strekning må trafikken i de to felt som går over i ett felt tilpasses hverandre med fletting.

Fletting: Trafikk fra to kjørefelt føres sammen til ett i samsvar med trafikkreglenes bestemmelser. Annethvert kjøretøy fra hvert felt kjører først.[1]

Hastighet (u): Tilbakelagt avstand per tidsenhet. Måles vanligvis i kilometer per time (km/t).

[1] Da fletting ikke nødvendigvis trenger å bety at man fletter et kjøretøy fra hvert kjørefelt annenhver gang, er dette en definisjon som er med passende til glidelåskjøring enn fletting.

Kapasitet: Den største trafikkmengde, regnet i antall kjøretøy per tidsenhet, en veg kan avvikle. Det skilles mellom teoretisk kapasitet, som gjelder under ideelle forhold, og virkelig kapasitet, som gjelder under nærmere angitte begrensninger.

Sjokkbølge: En forstyrrelse i avvikling av trafikk ved at trafikken enten må stoppe eller redusere hastigheten.

Tetthet (k): Antall kjøretøy per lengdeenhet veg. Måles vanligvis i kjøretøy per kilometer (kjt/km).

Tidsluke: Tidsrommet mellom passeringstidspunktet over et bestemt snitt av vegen for fronten av ett kjøretøy til passeringstidspunktet for fronten av neste ankommende kjøretøy.

Trafikkvolum (q): Antall trafikkenheter som passerer et snitt eller punkt på en veg i en nærmere bestemt tidsperiode. Måles vanligvis i kjøretøy per time (kjt/t).

Trafikkregulering: Innordning av trafikk (vegtrafikk) etter bestemte lover ved hjelp av skilting, oppmerking og trafikksignaler.

Trafikkvariasjon: Trafikkmengden er ikke konstant, den varierer av tid på dagen, dag i uken og uke i året.

Årsdøgntrafikk: Det totale antall kjøretøy som passerer et snitt av en veg i løpet av ett år, dividert med 365.

2.2 Trafikkavvikling

Trafikkavvikling omhandler kjøretøys fordeling på vegnettet (Flügel, Voll og Bockemühl, 2014), og er et begrep som ofte blir benyttet i sammenheng med sikring av tilstrekkelig kapasitet på vegen, noe som er avgjørende for god trafikkflyt. En sikker og effektiv avvikling, samt god trafikkregulering, kan bidra til å sikre dette.

Servicenivå er et begrep som ofte brukes i forbindelse med beskrivelse av avviklingskvaliteten på en vegstrekning (Blakstad, 1993). Det finnes totalt seks slike servicenivåer, A til F, hvor A representerer lav trafikkmengde (fri flyt-situasjon), E representerer trafikkmengde nær kapasitetsgrensen, og F representerer en overmettet vegstrekning med lange køer og store forsinkelse (Aakre, 2017b).

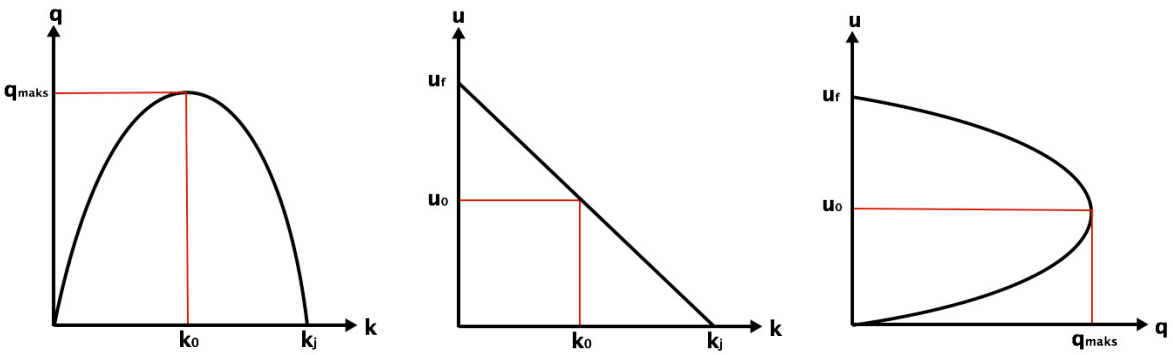
For å kunne avvikle trafikken på en best mulig måte, må man kunne forstå og forutse hvordan og hvor køer dannes i vegnettet (Flügel, Voll og Bockemühl, 2014). Å bidra til sikker og effektiv trafikkavvikling, er en vesentlig oppgave for en som jobber med trafikkteknikk (Sagen, 1993).

2.3 Trafikkstrømteori

Ifølge Sagen (1993) kan trafikkstrømteori defineres som «en beskrivelse av trafikkstrømmer ved hjelp av fysikkens og matematikkens lover, med hensyn tatt til menneskers adferd». Trafikkstrømmer varierer med tid og sted, og er dermed ikke uniforme. Trafikkteori bygger på den fundamentale sammenhengen mellom trafikkvolum (q), hastighet (u) og tetthet (k) vist i Formel [1].

$$q\ [kjt/t] = u\ [km/t] \cdot k\ [kjt/km] \qquad [1]$$

Greenshieldsmodellen er en simpel modell som viser denne sammenhengen basert på et lineært forhold mellom hastighet og tetthet. Dette er vist i Figur 4.



Figur 4: Sammenhengen mellom trafikkvolum, hastighet og tetthet med Greenshieldsmodellen.

2.4 Trafikkmodeller

Modellering av trafikkflyt er vanskelig da trafikkbildet bygger på et samspill mellom kjøretøy, veg og fører. Hvordan et kjøretøy er lagd, en veg er utformet og hvilke valg en fører tar i ulike situasjoner, er med på å danne dette trafikkbildet. Selv om to kjøretøy er likt utformet og kjøres på den samme vegstrekningen, vil mennesker fortsatt være individuelle skapninger som tar egne

valg. Like utgangspunkt, kan derfor føre til forskjellige hendelsesforløp da førere kan ta ulike valg i samme situasjon. Den menneskelige delen av samspillet er derfor hovedårsaken til at det er vanskelig å modellere trafikkflyt (Aakre, 2017b).

2.4.1 Detaljeringsnivå

Det finnes ulike typer trafikkmodeller som i hovedsak kan deles inn i tre detaljeringsnivåer: makroskopisk, mesoskopisk og mikroskopisk modellering. Makroskopiske modeller baseres på trafikkstrømmer og gjennomsnittlig adferd, mens mikroskopiske modeller er basert på individuelle kjøretøy, førere og adferd med detaljerte beskrivelser at samspillet mellom kjøretøyene. Mikroskopiske modeller er typisk benyttet til trafikksimulering da de har et høyt detaljeringsnivå. Mesoskopiske modeller er basert på grupper med kjøretøy, og er en mellomting mellom makro- og mikromodeller. (Aakre, 2017c).

2.4.2 Analytisk eller simulert

Trafikkmodeller kan enten baseres på simuleringer eller være analytiske. Forskjellen mellom disse typene, er at simuleringsmodeller anvender ulike regler, da for det meste matematiske ligninger, for kjøretøys bevegelser i et system, mens analytiske modeller anvender direkte matematiske beregninger for å bestemme systemtilstander (Akcelik, 2007).

2.4.3 Deterministisk eller stokastisk

I tillegg til å ha ulike detaljeringsnivå, kan trafikkmodeller som er basert på simuleringer, klassifiseres som enten deterministiske eller stokastiske. Til forskjell fra deterministiske modeller, som baseres på at det ikke er avhengighet mellom de enkelte kjøretøyene i et system, baseres stokastiske modeller på variasjoner i parametere og avhengighet mellom kjøretøyene (Sagen, 1993). Avhengigheten fører blant annet til at reaksjoner, som nedbremsing, kan forplante seg fra kjøretøy til kjøretøy. Ved stokastiske modeller er det derfor nødvendig med flere replikasjoner av samme scenario for å få statistisk gyldige resultater, da hver replikasjon som kjøres vil gi ulikt utfall (Bang, 2016).

2.5 Flaskehalser

Når etterspørselen på en vegstrekning overskrider strekningens kapasitet over en viss tidsperiode, dannes kø (May, 1990). Det finnes mange eksempler på situasjoner som kan skape kø. Det kan være alt fra kryssløsninger til bomstasjoner, ulykker og saktegående kjøretøy. Her sees det nærmere på kø som følge av flaskehalser.

2.5.1 Generelt

En flaskehals kan defineres som en lokal reduksjon av kapasiteten på en veg (Treiber og Kesting, 2013). Det er et punkt på vegnettet hvor man som regel har kø oppstrøms og trafikk som flyter fritt (fri flyt-situasjon) nedstrøms (Bertini og Leal, 2004). Kapasitet defineres i Highway Capacity Manual som «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 prevailing roadway, environmental, traffic, and control conditions» (Transportation Research Board, 2016). Å forstå hvordan en flaskehals fungerer og påvirker trafikkbildet, er nødvendig for å kunne vurdere hvordan avviklingen gjennom flaskehalser kan bli mer effektiv, og hvordan problemer knyttet til flaskehalser kan løses.

Det finnes mange ulike typer flaskehalser. De kan enten være permanente, som av- og påkjøringsramper, eller midlertidige, som flaskehalser skapt av vegarbeid eller ulykker. Andre typiske flaskehalser er reduksjon av antall kjørefelt, kryssløsninger og stigninger. Selv om enkelte flaskehalser er lette å identifisere, kan å løse dem være utfordrende da alle flaskehalser er unike, og trenger å bli løst individuelt.

Det finnes både aktive og skjulte flaskehalser. De aktive flaskehalsene er ofte enkle å identifisere da de gjerne har store kødannelser oppstrøms. De skjulte flaskehalsene er derimot vanskeligere å utpeke da de som oftest har mangel på kø fremfor kødannelser. Skjulte flaskehalser oppstår vanligvis i samspill med de aktive, og utgjør ikke nødvendigvis et stort problem i seg selv, men kan fort skape kødannelser dersom en aktiv flaskehals blir fjernet. Dette betyr at dersom det er én eller flere skjulte flaskehalser nedstrøms en flaskehals som har blitt utbedret, kan forbedringene resultere i overbelastning som flyttes nedstrøms. For å fjerne kødannelser, må man derfor ha kunnskap om og ta hensyn til både aktive og skjulte flaskehalser. (Transportation Research Board, 2016).

2.5.2 Kapasitetsfall

Inntil etterspørselen overskrider kapasiteten i en flaskehals, vil flaskehalsens innvirkning på resten av trafikkbildet være begrenset. En flaskehals sies å være aktivert når den har forårsaket et sammenbrudd i trafikken (Treiber og Kesting, 2013). Konsekvensen av dette, er en reduksjon av maksimalt gjennomstrømningsvolum etter sammenbruddet. Kapasitetsfall, som følge av en aktiv flaskehals, kan dermed beskrives som en redusering i maksimalt gjennomstrømningsvolum når kø dannes (Jin et al., 2015). Det vil si at kapasiteten som en vegstrekning har etter kødannelse, vil være lavere enn kapasiteten den samme strekningen hadde før kø oppsto. En slik reduksjon kan eksempelvis komme av at reaksjons- og akselleraasjonstiden kan øke når man går fra en lav hastighet (står i kø) til en høyere (kø oppløses), sammenlignet med å kjøre i en jevn hastighet hele tiden (fri flyt).

Størrelsen på et kapasitetsfall varierer, men en reduksjon på rundt 10 %, er mange enige om at er et godt utgangspunkt (Cassidy og Bertini, 1999; Jin et al., 2015; Bertini og Leal, 2005 og Cassidy og Rudjanakanoknad, 2002). Det finnes derimot også forskere som mener at kapasitetsfallet kan være på opptil 20 til 30 % (Chen et al., 2014 og Chen og Ahn, 2018).

I modeller avhenger relativt kapasitetsfall av styrken på flaskehalsen og diverse andre egenskaper som blant annet lengden på sammenslåingsområdet i tilfeller med påkjøringsramper (Treiber og Kesting, 2013).

2.6 Sammenfletting og kjørefeltskifte

En redusering av kjørefelt på fri strekning forekommer eksempelvis når to felt, i samme kjøreretning, reduseres til ett. Reduseringen kan enten være permanent, eller skje i forbindelse med ulykker eller vegarbeid (Vejdirektoratet, 2015).

Når antall kjørefelt reduseres, må de kjørende foreta feltskifter for å kunne fortsette videre på strekningen. Disse feltskiftene foregår som regel som fletteprosesser da enten (1) trafikken i det feltet som fjernes, må flette seg inn i trafikken i feltet som fortsetter videre, eller (2) trafikken i begge kjørefeltene må samarbeide om å flettes sammen til et nytt kjørefelt.

I fletteprosess (1) vil det være de kjørende i feltet som avsluttes, som i hovedsak må vike for de kjørende i feltet som fortsetter. I fletteprosess (2) vil trafikken i begge feltene måtte ta like stor del i fletteprosessen, og strekningen kan enten være utformet som at et kjørefelt slutter, eller at begge kjørefelt endres. Fletteprosess (2) kalles sammenfletting.

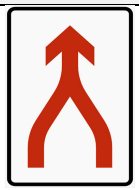
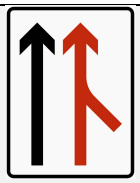
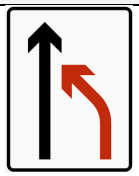
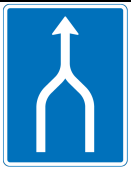
2.6.1 Trafikkskilt

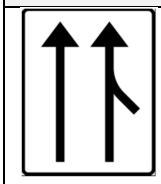
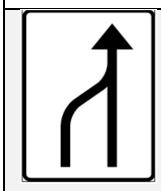
Skilt 530 og 532 (Vegdirektoratet, 2014b) i Tabell 1 illustrerer forskjellen mellom henholdsvis sammenfletting og fletteprosess (1). Skilt 530 viser gjensidig tilpassing med to røde piler som representere vikende trafikk, hvorimot skilt 532 viser at kun kjørende i avsluttende kjørefelt har vikeplikt (Skiltforskriften, 2005). Skilt 531 er også et skilt som benyttes i sammenheng med sammenfletting, men da når en påkjøringsrampe kobles på vegen.

I tillegg til å reguleres av skilt 530 vist i Tabell 1, reguleres også sammenfletting av trafikkreglenes bestemmelser (Trafikkregler, 1986). I trafikkreglene §8 første ledd, som omhandler kjørefeltskifte, står det at «farten skal gjensidig tilpasses slik at de kjørende vekselvis kan fortsette uten unødig hindre eller forstyrrelse» når antallet vanlige kjørefelt i samme retning reduseres. Dette omtales ofte som «fletteregelen» eller «glidelåsprinsippet». Som §8 første ledd tilsier, innebærer denne regelen at ingen av de kjørende har fortrinnsrett, men at begge parter skal vike for og tilpasse seg hverandre. Kjøretøyene har gjensidig vikeplikt.

For sammenfletting med fartsøkningsfelt og skilt 531, står det i §8 andre ledd: «Kjørende i felt for fartsøkning skal tilpasse farten til trafikken i det kjørefeltet det skal kjøres inn i. Kjørende i dette feltet skal lette utkjøringen fra feltet for fartsøkning.» (Trafikkregler, 1986). Det betyr at også i slike situasjoner skal man ha gjensidig vikeplikt og tilpasse seg til hverandre. For skilt 532 gjelder §8 første ledd hvor det står: «Kjørende som vil skifte kjørefelt, har vikeplikt for kjørende som befinner ser i det felt det skal kjøres inn i eller som først må krysses.». De som ligger i det avsluttende kjørefeltet har altså vikeplikt.

Tabell 1: Trafikkskilt fra forskjellige land.

Skilt	Nr.	Navn	Kommentar
Norge (Vegdirektoratet, 2014b)			
	530 *(530.01)*	Sammenfletting	Anvendes for å varsle at to vanlige kjørefelt føres sammen til ett, og at det skal flettes etter trafikkreglenes bestemmelser – §8 første ledd.
	531 *(531.102)*	Felt for fartsøkning	Anvendes der en veg føres inn på annen veg via fartsøkningsfelt, slik at bestemmelsene i trafikkreglene §8 andre ledd gjelder.
	532 *(532.H01)*	Kjørefelt slutter	Anvendes for å varsle om at kjørefelt slutter ved kjørefeltsavslutninger hvor trafikkreglenes bestemmelser om fletting ikke skal gjelde. Skiltet pålegger de kjørende i feltet som slutter å foreta feltskifte med vikeplikt i samsvar med trafikkreglene §8 første ledd.
Danmark (Vejdirektoratet, 2018)			
	DK.1*	Vognbaneforløb med sammenfletning	Benyttes ved symmetrisk utformede sammenflettinger.**
	DK.2*	Vognbaneforløb med sammenfletning fra hørje	Benyttes ved reduksjon av kjørefelt der de kjørende skal vise gjensidig hensyn.**
	DK.3*	Vognbaneforløb med vognbaneskift fra hørje	Benyttes ved reduksjon av kjørefelt der den som skifter kjørefelt skal sikre seg at dette kan gjøres uten fare eller ulempe for andre.**

	DK.4*	Sammenfletning	Benyttes ved sammenflettinger der de kjørende skal vise gjensidig hensyn. Skiltet benyttes især ved sammenfletting av kjørefelt på motorveger og ved påkjøringsramper.
Sverige (Svensk författningssamling, 2017)			
	S.1*	Sammanvävning	Skiltet opplyser om at to kjørefelt sammenflettes, og at de kjørende skal tilpasse seg de nye forholdene på stedet i samsvar med bestemmelsene i kap. 3 §44 trafikförordningen som går ut på at det skal gjøres i gjensidig vurdering.
	S.2*	Väganslutning med accelerationsfält	***
	S.3*	Minskning av antal körfält	Skiltet angir at antall kjørefelt reduseres.
USA (U.S. Department of Transportation, 2009)			
	W4-1	Merge	Skiltet kan brukes til å varsle trafikanter på hovedvegen om at flettebevegelser kan oppstå i forkant av et punkt hvor to separate veger går sammen til et enkelt kjørefelt.
	W4-2	Right lane ends or road narrows from the right	Skiltet bør brukes til å varsle om reduksjon av antall kjørefelt i kjøreretningen på en veg med flere kjørefelt.
Storbritannia (Department for Transport,2018)			
	GB.1*	Traffic merging from left ahead	***

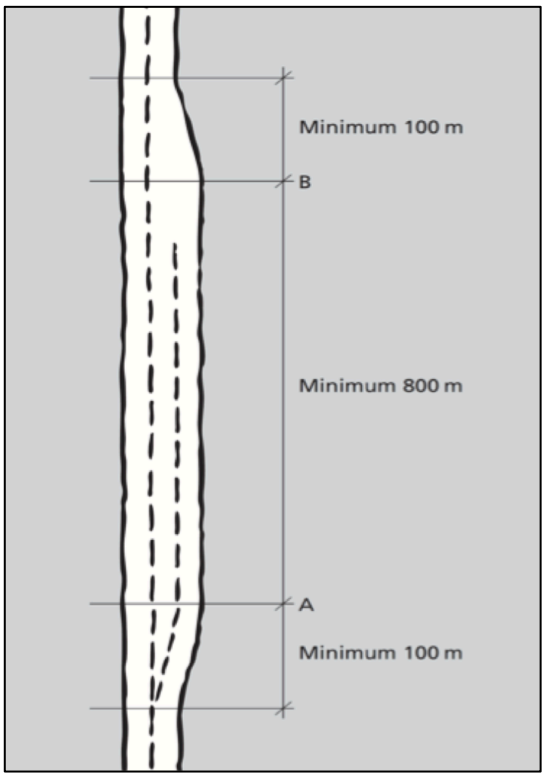
* Ikke de originale numrene, kun et nummer som er bestemt for enkelhetsskyld.

** Ser ut til å kun benyttes på mindre veger, men dette er ikke kvalitetssikret.

*** Mangler beskrivelse av skilt.

Tilnærmet de samme reglene for sammenfletting og gjensidig vikeplikt, finner man både i det danske og det svenske lovverket. I Danmark gjelder «Færdselslovens regler» §18 stk. 2-4 (Færdselsloven, 1976) som omhandler vending, bakning og vognbaneskift. I Sverige er det §44 i kapittel 3 i Trafikförordningen (Trafikförordning, 1998) som gjelder, også dette en paragraf som omhandler vändning, backning og körfältsbyte – snuoperasjon, rygging og kjørefeltskifte.

Tabell 1 viser trafikkskilt fra Norge, Danmark, Sverige, USA og Storbritannia som benyttes i forbindelse med flettesituasjoner. Litteraturen er ikke helt klar på i hvilke tilfeller hvilke skilt blir benyttet. Selv om det i Danmark finnes flere skilt for fletting, ser det ut til at det kun er DK.4 i Tabell 1 som benyttes på motorveg både for reduksjon av antall kjørefelt og fartsøkningsfelt, mens de resterende skiltene benyttes på mindre veger. I Sverige har de skiltet for sammenfletting, S.1, og ser ut til å benytte det i tilfeller hvor antallet kjørefelt reduseres. Det ser derimot ikke ut til at det benyttes noe skilt når en påkjøringsrampe kobles på en motorveg.

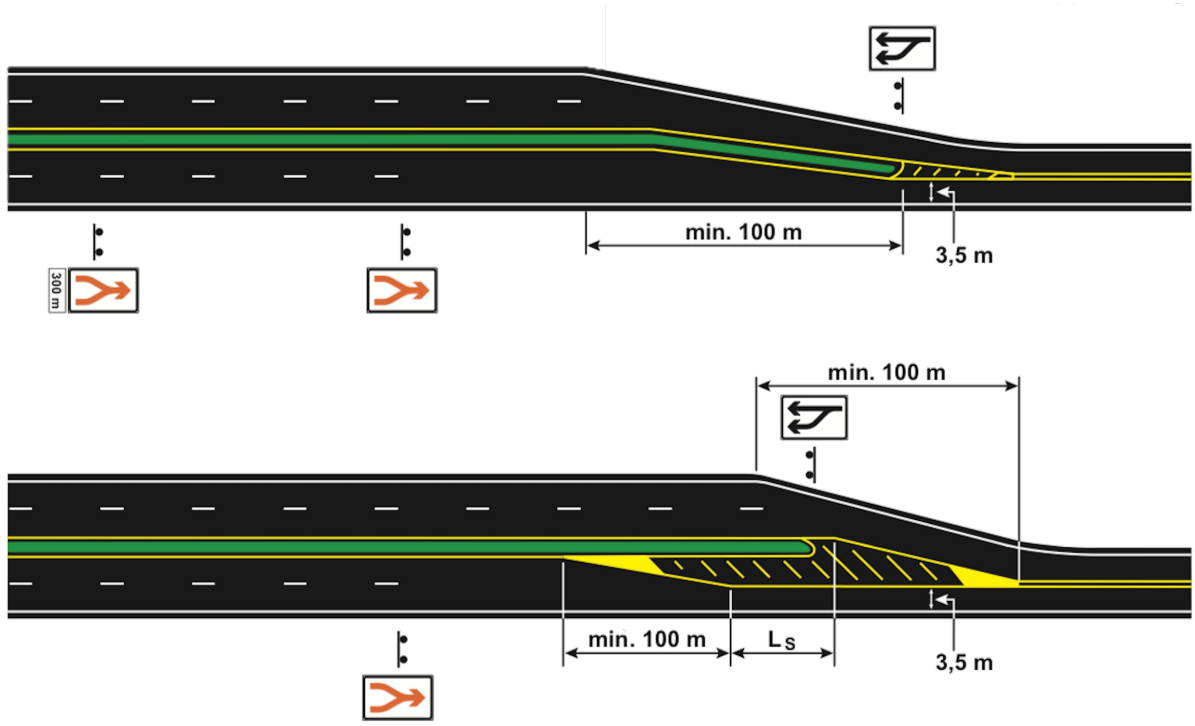


Figur 5: Skisse over utforming av et forbikjøringsfelt på en tofelts veg uten midtrekkverk (Vegdirektoratet, 2014a, figur E.39).

2.6.2 Utforming og oppmerking

Utformingen og oppmerkingen av en veg vil i stor grad være med på å regulere hvordan en fletteprosess utarter seg, da det er dette som er med på å avgjøre om en reduksjonsprosess vil foregå ved sammenfletting eller kjørefeltskifte.

I Statens vegvesen sine håndbøker står det lite om utforming og oppmerking av flettestrekninger. Håndbok N100 Veg- og gateutforming skildrer utformingen av et forbikjøringsfelt med skissen vist i Figur 5 (Vegdirektoratet, 2014a), men dette blir ikke helt det tilfellet som en reduksjon fra to til ett kjørefelt er. I Håndbok N302 Vegoppmerking (Vegdirektoratet, 2015), er det derimot skisser som illustrerer situasjonen noe bedre ved å beskrive utformingen av overgangen mellom firefelts- og tofeltsveger. Dette er vist i Figur 6. At det ikke står beskrevet noe om noen konkrete mål på selve flettepunktet, punktet fra midtoppmerking slutter til antall kjørefelt har blitt redusert, gjør det vanskelig å finne en generell regel for hvordan utformingen og oppmerkingen skal gjennomføres i praksis.



Figur 6: Oppmerking og utforming av overgangen mellom firefelts og tofelts veger (Vegdirektoratet, 2015, figur 5.6).

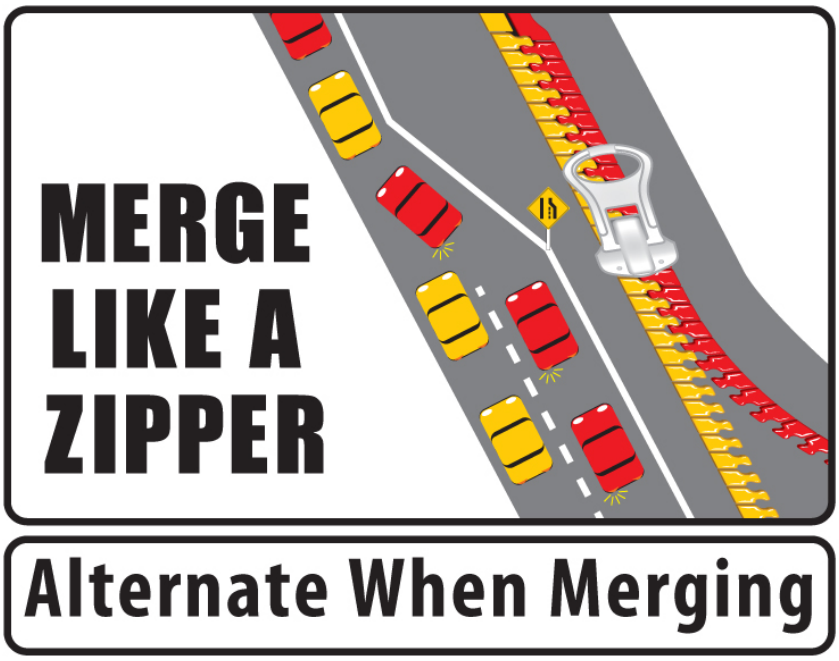
2.6.3 Økt forståelse for hva glidelåskjøring er

I tillegg til de vanlige fletteskiltene, ha de i USA tatt i bruk forklarende skilt og kampanjer for å øke forståelsen for hva glidelåskjøring er og hvordan det skal flettes. Skiltet i Figur 7 som sier at man skal benytte begge kjørefelt helt frem til flettepunktet, er et eksempel på dette.

Figur 7: Skilt som sier at man skal benytte begge kjørefelt helt frem til flettepunktet (Hentet fra: Colorado Department of Transportation).

Missouri Department of Transportation (2016) la ut bildet i Figur 8 på Twitter med beskjeden å flette som en glidelås, og om at hvis du ligger i midten av kjørebanen og holder tilbake trafikk, så sinker du trafikken. Figur 9 er et annet eksempel på en kampanje som opplyser om hvordan man skal flette.

Figur 8: Bilde som Missouri Department of Transportation (2016) la ut på Twitter.



Figur 9: Bilde fra TranBC (2013) som illustrerer glidelåsprinsippet.

2.7 Trafikkadferd

En flaskehals er en viktig komponent i et vegnett da køen, som bygges opp som en følge av flaskehalsen, kan ha stor innvirkning på resten av nettverket. Køen kan strekke seg flere kilometer og potensielt blokkere avkjøringsramper og andre fasiliteter langs vegen. Et innblikk i forståelsen av trafikkadferden ved flaskehalser, er derfor viktig da det kan gi et fundament for å bedre forstå hvordan et vegnettverk fungerer (Bertini og Leal, 2005).

Samspillet mellom kjøretøy, fører og veg gir både muligheter og begrensninger. En fører kan manøvrere kjøretøy sitt som selv ønsket, men førerens ferdigheter, kjøretøyets egenskaper og vegens standard og utforming, begrenser handlingsfriheten. En førers evne til å motta og vurdere informasjon fra trafikkbildet, samt omsette dette til handling, legger grunnlaget for hvordan føreren oppfører seg i trafikken – førerens trafikkadferd. Dette kan varierer på bakgrunn av ulike faktorer som enten kan være permanente eller mer eller mindre temporære. (Blakstad, 1993).

Ifølge Blakstad (1993) kan disse faktorene deles inn i tre kategorier:

1. Fysiologiske faktorer
    - Sanseevne (syn og hørsel)
    - Alder
    - Kroppslige handikap
    - Sykdom
2. Psykiske faktorer
    - Kjøreferdigheter (innarbeidede kjørevaner, motivasjoner, mm.)
    - Personlighet (holdninger, sosial status, intelligens, osv.)
    - Depresjoner og andre psykiske lidelser
3. Kombinerte faktorer
    - Reaksjonsevne
    - Tretthet
    - Alkohol, samt virkning av narkotika og medisiner

2.8 Aimsun

I dette delkapittelet er det lagt vekt på å presentere de delene av Aimsun som er relevant for den definerte oppgaven.

Aimsun er et trafikkmodelleringsverktøy utviklet av Transport Simulation Systems, TSS. Det kan benyttes til modellering av alt fra et enkelt vegkryss til mer omfattende nettverk som hele regioner. Aimsun ble i utgangspunktet utviklet som en mikrosimulator, men er i dag en fullt integrert trafikkmodelleringsplatform. Aimsun støtter alle detaljeringsnivåene til trafikkmodeller, både mikroskopiske, mesoskopiske og makroskopiske modeller. Dette gir brukeren stor grad av fleksibilitet til å lage realistiske trafikkmodeller som gjenskaper virkelige trafikkforhold. (Aimsun, 2017).

Å bruke et modelleringsprogram til simulering, kan være både positivt og negativt. Dersom man skal gjennomføre et fullskalaforsøk i virkeligheten kan dette være veldig dyrt, og til og med umulig. Med simulering, blir forsøket gjennomført i et kontrollert miljø, uten å forstyrre det virkelige trafikkbildet. Resultater kan også fremstilles relativt hurtig, og man har også mulighet for å simulere fremtidige trafikksystemer. Ulemper med simuleringsverktøy er at en realistisk simulering ofte krever kostbar og detaljert inndata. Det tar tid å innhente og utvikle, og kan lett gi uriktige resultater dersom kalibrering og validering ikke er gjort grundig nok, eller at personen som har utført simuleringen ikke har tilstrekkelig kunnskap rundt emnet. (Aakre, 2017d).

2.8.1 Mikrosimulering

I en mikrosimuleringsmodell, modelleres kjøretøyene individuelt med individuell og detaljert adferd som avhenger av fører og kjøretøyets egenskaper. Adferden avhenger også av øvrig trafikk og infrastruktur. I hovedsak blir adferden modellert ved å benytte ulike delmodeller som Car-Following (bilfølge), Lane-Changing (kjørefeltskifte) og Gap-Acceptance (tidsluke). Bilfølgemodellen beskriver hvordan man forholder seg til kjøretøyet foran, mens kjørefeltskiftemodellen blant annet tar utgangspunkt i når det er behov eller ønskelig med et feltskifte, samt ledige tidsluker (Bang, 2016).

Mikrosimulering i Aimsun er et stokastisk program. Det vil, som nevnt tidligere, si at hver replikasjon som gjøres, vil gi ulike resultater, og at det må gjøres gjentatte simuleringer for å få statistisk gyldige resultater (Bang, 2016).

2.8.2 Gjennomføring av en simulering

For å gjennomføre en simulering i Aimsun, må det først opprettes et scenario. I scenarioet angis parametere som legger grunnlaget for simuleringen. Dette gjelder eksempelvis OD-matriser og faseplaner for signalanlegg. Videre opprettes et eksperiment innunder scenarioet. Dette er et objekt som tilpasser og kjører simuleringsscenarioet (Transport Simulation Systems, 2018). I eksperimentet bestemmes blant annet type simulering som skal kjøres og parametere som reaksjonstid og adferd. Et scenario kan bestå av flere ulike eksperimenter.

Etter at både scenario og eksperiment(er) er definert, bestemmes antall replikasjoner (gjennomkjøringer av simuleringen). Til forskjell fra scenarioer og eksperimenter som angir betingelser for simuleringene, beskriver en replikasjon egenskapene for den enkelte simulering. Aimsun genererer ulike nummer til ulike replikasjoner. Dette gjør at egenskapene endres fra replikasjon til replikasjon, og man får en stokastisk modell som krever et visst antall replikasjoner for å kunne gi statistisk gyldige resultater.

2.8.3 Bilfølgemodell

Intensjonen med en bilfølgemodell er å matematisk uttrykke reaksjonsmønsteret til et kjøretøy som følge av det den forankjørende foretar seg (Sagen, 1993). Bilfølgemodellen er en adferdsmodell som styrer et kjøretøys bevegelse med tanke på blant annet hastighet, akselerasjon, bremsing og avstand til kjøretøyet foran (Vejdirektoratet, 2010). Eksempelvis kan hvert enkelt kjøretøy bestemme sin hastighet basert på forankjørende, såfremt det ikke fører til at kjøretøyet må overstige ønsket hastighetsbegrensning.

Bilfølgemodellen i Aimsun baseres på Gipps (1981) Car-Following model (Transport Simulation Systems, 2018). Den består av to komponenter; akselerasjon og retardasjon, hvorav akselerasjon representerer et kjøretøys intensjon om å oppnå en ønsket hastighet, mens retardasjon representerer begrensningene om å oppnå ønsket hastighet skapt av foranliggende kjøretøy.

Den maksimale hastigheten kjøretøy (n) kan akselerere til i løpet av tidsperioden (t, t + T) er gitt av Formel [2].

$$V_a(n, t+T) = V(n,t) + 2{,}5\, a(n)\, T \left(1 - \frac{V(n,t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0{,}025 + \frac{V(n,t)}{V^*(n)}} \qquad [2]$$

Hvor:

- V(n, t) er hastigheten til kjøretøy n ved tiden t
- $V^*(n)$ er den ønskede hastigheten til kjøretøy n på den nåværende lenken
- a(n) er den maksimale akselerasjonen til kjøretøy n
- T er reaksjonstiden

Samtidig kan kjøretøy n påvirkes av foranliggende kjøretøy n-1, og den maksimale hastigheten blir da gitt av Formel [3].

$$V_b(n, t+T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2T^2 - d(n)[2(x(n-1,t) - s(n-1) - x(n,t)T) - V(n,t)T - \frac{V(n-1,1)^2}{d'(n-1)}]} \qquad [3]$$

Hvor:

- d(n) (< 0) er maksimal ønsket retardasjon for kjøretøy n
- x(n, t) er posisjonen til kjøretøy n ved tiden t
- x(n – 1, t) er posisjonen til foranliggende kjøretøy (n-1) ved tiden t
- s(n – 1) er den effektive lengden av kjøretøy (n-1)
- d'(n – 1) er et estimat av ønsket retardasjon for kjøretøy (n-1)

Videre er hastigheten til kjøretøy n i løpet av intervall (t, t + 1) den laveste hastigheten av Formel [2] og Formel [3] vist i Formel [4].

$$V(n, t+T) = \min\{V_a(n, t+T), V_b(n, t+T)\} \qquad [4]$$

$$x(n, t+T) = x(n,t) + V(n, t+T)T \qquad [5]$$

$$x(n, t+T) = x(n,t) + 0{,}5\left(V(n,t) + V(n, t+T)\right) \times T \qquad [6]$$

Etter at gjeldende hastighet er beregnet ut ifra Formel [4], oppdateres posisjonen til kjøretøy n ved Formel [5] eller Formel [6] avhengig av om kjøretøyet til henholdsvis akselererer eller bremser.

2.8.4 Kjørefeltskiftemodell

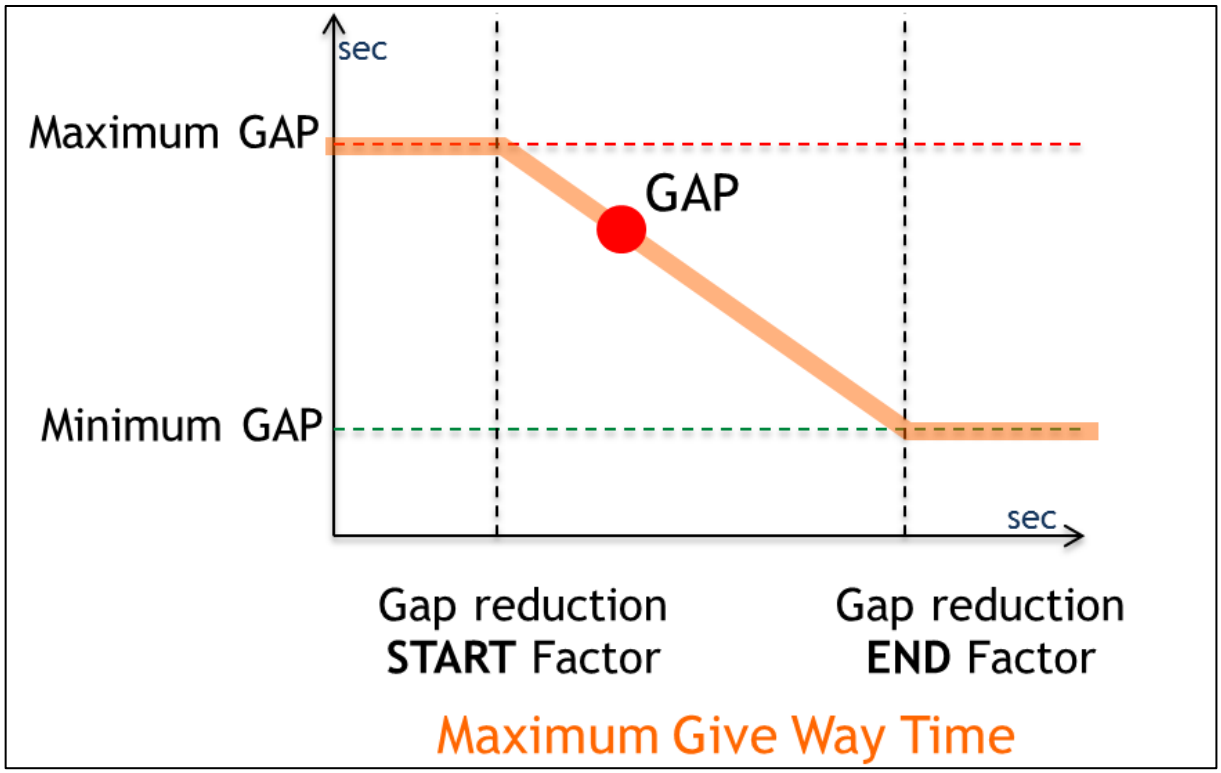
I brukermanualen til Aimsun (Transport Simulation Systems, 2018) er modellen for kjørefeltskifte beskrevet som en beslutningsmodell som tilnærmer en førers oppførsel som følge av ulike beslutninger. Den analyserer (1) nødvendigheten av et feltskifte, (2) ønsket om å skifte kjørefelt og (3) om det er gjennomførbart å skifte kjørefelt. Nødvendigheten av et kjørefeltskifte avhenger av mulige svingebevegelser fra gjeldende kjørefelt, avstanden til neste sving og trafikkforholdene i det gjeldene kjørefeltet beskrevet av hastighet og kølengder. Om det er ønskelig å skifte kjørefelt avgjøres på bakgrunn av om det vil oppstå forbedringer i trafikkforholdene til føreren dersom kjørefeltskiftet gjennomføres. Dersom hastigheten i det gjeldene kjørefeltet er lavere enn i det andre, eller hvis køen i det andre kjørefeltet er betydelig mindre enn i det gjeldene, anser modellen det som ønskelig å bytte felt. Gjennomførbarheten reguleres av kjøretøyets posisjon i vegnettet med hensyn til vegens utforming og andre kjøretøy i nærheten.

Modellen tar også hensyn til førerens adferd ved å se på tre ulike motivasjoner for å gjennomføre et feltskifte: (1) trafikkforholdene gjør det ønskelig, (2) man er plassert i feil kjørefelt, og vil derfor tilpasse hastigheten sin for å finne en ledig luke ved siden av seg eller nedstrøms, og (3) man er nødt til å skifte kjørefelt, og vil derfor redusere hastigheten ned til full stopp om nødvendig mens man ser etter ledige luker oppstrøms (Transport Simulation Systems, 2018).

2.8.5 Tidslukemodell

Tidslukemodellen er en adferdsmodell som beskriver vikepliktsadferd i kryss. Den brukes til å avgjøre om et kjøretøy som nærmer seg et vegkryss kan krysse eller ei, avhengig av nærliggende kjøretøy med høyere prioritet i krysset. Modellen tar hensyn til avstanden mellom kjøretøyene og det hypotetiske kollisjonspunktet, samt deres hastigheter og akselerasjonsrater. Videre avgjør den, på bakgrunn av dette og risikonivået for hver fører, tiden kjøretøyene trenger for å komme seg gjennom krysset. (Transport Simulation Systems, 2018).

Tiden kjøretøyene trenger og tiden som faktisk kreves trenger ikke å være det samme. Tiden som kreves for å utføre manøveren, bestemmes av tiden føreren har benyttet på å vente på en ledig luke (Transport Simulation Systems, 2018). Dette går ut på at en person ofte vil godta en kortere tidsluke for å komme seg gjennom krysset etter å ha ventet en stund, enn personen ville gjort rett etter ankomst til krysset. Mange blir utålmodige av å vente. Nødvendig tidsluke minkes derfor ofte med økende ventetid som en følge av at flere tar mer risikofylte sjanser når de blir lei av å vente. Så lenge den nødvendige tidsluken er større enn førerens eget minimumskrav, kan luken benyttes. Figur 10 viser hvordan nødvendig tidsluke kan variere fra en førers maksimumskrav ved start på ventetiden til en førers minimumskrav etterhvert som ventetiden øker.



Figur 10: Nødvendig tidsluke som en funksjon av ventetid (Transport Simulation Systems, 2018).

2.8.6 Samarbeidsmodell

Når trafikkavvikling i ikke-signalregulerte kryss skal modelleres, benyttes vanligvis tidslukemodeller som modellen beskrevet i underkapittel 2.8.5 Tidslukemodell. En tidslukemodell tar utgangspunkt i at trafikantene følger vikepliktsreglene. Samarbeidsmodellen i Aimsun (Turn Cooperation Model Activation), gir Aimsun mulighet til å modellere samarbeid i ikke-signalregulerte kryss (Aakre, 2015). Det vil si at trafikk, som ifølge vikepliktsreglene har

forkjørsrett, i visse tilfeller kan vike for trafikk med vikeplikt ved å slippe dem frem når modellen er aktivert.

Samarbeidsmodellen kan aktiveres på ulike svingebevegelse og type kjøretøy. Eksempelvis kan trafikk med forkjørsrett tvinges til å vike for tungtransport, men ikke for vanlige kjøretøy. Graden av samarbeid varierer fra 0 % samarbeid, som er normale vikepliktsregler, til 100 % samarbeid, som er glidelåskjøring (én til én fletting) i overbelastede situasjoner (Transport Simulation Systems, 2018). Samarbeidsmodellen er i utgangspunktet laget for rundkjøringer, T- og X-kryss (Aakre, 2015).

2.8.7 Nettverkselementer

Et nettverk som er bygget opp av ulike elementer, er nødvendig for å kunne gjennomføre mikrosimuleringer i Aimsun. Slike elementer kan være lenker, noder og sentroider, alt ettersom hva som er nødvendig for i enhver situasjon å modellere det som skal modelleres. Videre forklares flere slike elementer nærmere, og Figur 11 viser eksempel på hvordan det ser ut i Aimsun. Brukermanualen til Aimsun (Transport Simulation Systems, 2018) er benyttet som kilde for alt i dette delkapittelet dersom ikke annet er spesifisert.

Lenke

En lenke er en samling av ett eller flere tilstøtende kjørefelt hvor kjøretøy beveger seg i samme retning. Vegnettet består av mange lenker, og oppdelingen av lenkene kommer som regel av de fysiske utformingene og egenskapene til vegstrekningene. Eksempelvis vil en lenkes utstrekning vanligvis være avstanden mellom to kryss i urbane strøk.

Node

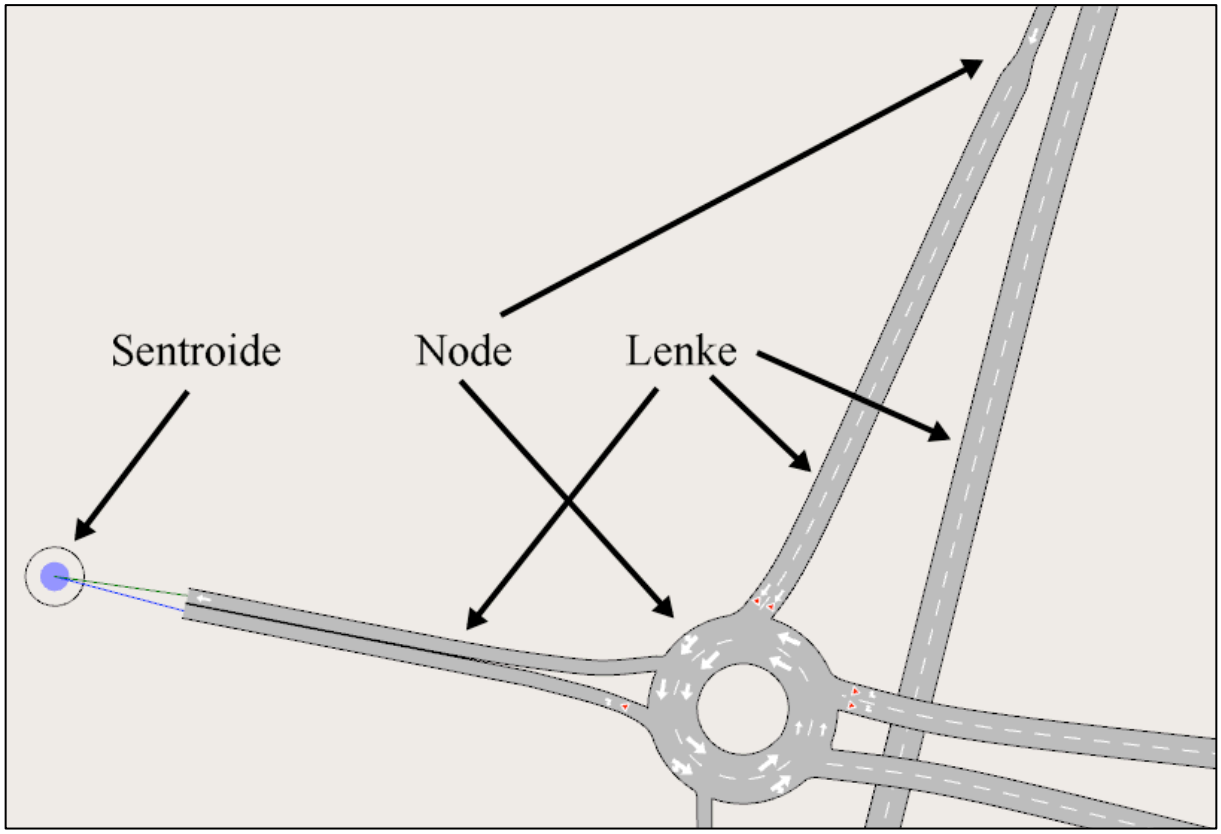
En node er et punkt eller et område i nettverket der lenker kobles sammen, og kjøretøy beveger seg over til neste lenke. En node kan ha en eller flere opprinnelseslenker, en eller flere destinasjonslenker, og et sett med svingebevegelser som knytter innganger og utganger av krysset.

OD-matrise

En OD-matrise, eller Origin-Destination matrise, beskriver kjøretøyenes bevegelse i et nettverk. I et scenario som benytter et trafikkbehov basert på OD-matriser, defineres trafikken som skal simuleres av en eller flere OD-matriser. Hver matrise gir antall turer mellom opprinnelses- og destinasjonssentroider.

Sentroide

En sentroide er en sone utenfor nettverket som kjøretøy genereres til og fra. Det er i disse sonene som turer starter og/eller ender i nettverket.



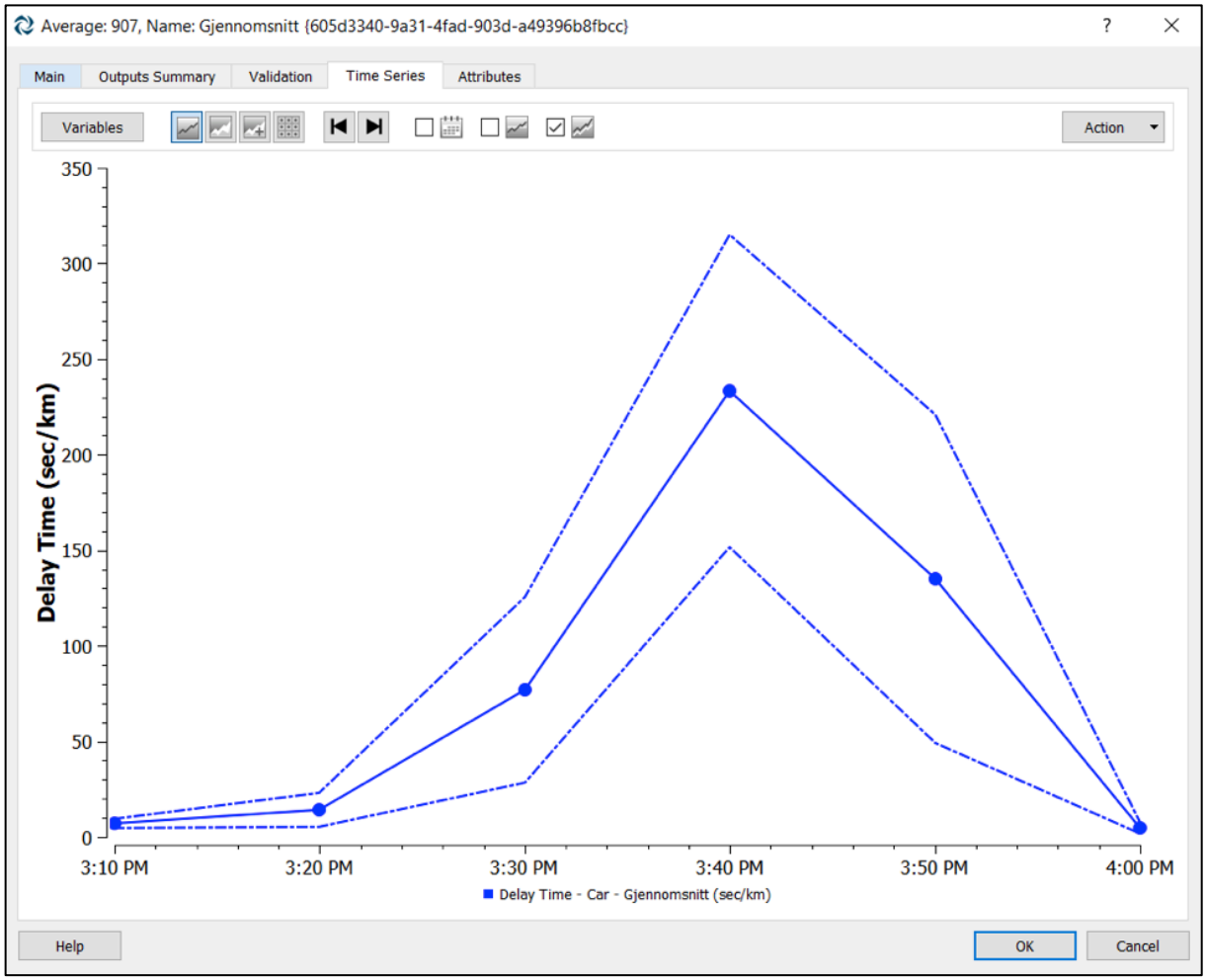
Figur 11: Utsnitt av et nettverk i Aimsun med elementene sentroide, node og lenke.

Rampekontroll

En rampekontroll er et instrument for å regulere flyt av kjøretøy. En rampekontroll benyttes ofte på påkjøringsramper til en motorveg for å begrense flyten av kjøretøy inn på motorvegen. På den måten kan rampekontrollen sikre en ikke-overbelastet strøm på selve motorvegen.

2.8.8 Resultater

Aimsun kan produsere mange ulike resultater basert på utførte simuleringer. Før en simulering kjøres, kan man velge hvilke typer resultater simuleringsverktøyet skal produseres. Dette gjelder blant annet resultater som hastighet, forsinkelse, antall stopp og kølengder. Ulike nettverkselementer kan gi forskjellige typer resultater. Eksempelvis kan en lenke gi resultater som hastighet, reisetid og forsinkelse, mens en detektor kan gi tidsluker. Etter at en simulering er kjørt, får man et sammendrag som gir gjennomsnittlige resultater for systemet med tilhørende standardavvik. Ved flere replikasjoner for samme scenario, kan dette sammendrag beregnes som et gjennomsnitt av alle replikasjonene. Mange av resultatene er det også mulig å få fremstilt med grafer slik som vist i Figur 12 hvor variasjon i forsinkelse med tilhørende standardavvik er vist som funksjon av tid.



Figur 12: Aimsun kan lage grafer ut ifra resultatene som produseres.

Kapittel 3

Metode

For å kunne svare på forskningsspørsmålene, har det vært nødvendig å ta i bruk både kvalitative og kvantitative metoder. Deler av litteratursøket, samt formulering og innsnevring av tema, ble i hovedsak gjennomført i en forstudie til masteroppgaven høsten 2017. I masteroppgaven har det blitt lagt mer vekt på «revealed preferences» (målinger og observasjoner) og modellering, men det har også vært nødvendig med påfyll av relevant litteratur.

3.1 Litteratursøk

Litteratursøket er gjennomført ved bruk av Oria, en søkemotor for NTNU-bibliotekets trykte og elektroniske samlinger. Denne databasen søker også i andre databaser som Science Direct (Elsevier), Compendex og Scopus. Databasene Google Scholar og TRID har også blitt benyttet. Noen typiske søkeord som har blitt brukt i litteratursøket er presentert i Tabell 2.

Relevant litteratur er også funnet ved å gå gjennom referanselistene til litteraturen som virket interessant. På den måten ble flere primærkilder funnet, som blir riktigere å referere til. Ved å se på referanselistene til relevant litteratur, ble det også oppdaget at flere forskere refererer til hverandre. Dette kan være negativt i form av at det blir et noe snevert omfang av synspunkter, men det kan også tyde på at det er de forskerne som er de beste på emnet. Dette var spesielt synlig i litteraturen om kapasitetsfall.

Det er fortrinnsvis forsøkt å finne fagfellevurderte kilder. Av litteratur som ikke er fagfellevurdert, finner man blant annet håndbøker og lover fra både Norge og andre land. Dette er likevel godt gjennomarbeidede kilder som ansees som pålitelige da de er godkjente av overordnede myndigheter eller av vegdirektorater. Informasjon hentet fra ulike nettsider er også

kilder som ikke er fagfellevurderte. Disse er nøye vurdert ut fra utgiver og innhold. I hovedsak gjelder dette informasjon hentet fra nettsider til departementer og direktorater, som også bør ansees som troverdige.

Tabell 2: Typiske søkeord som er benyttet til innsamling av litteratur.

Norske ord	**Engelske ord**
Flaskehals	Bottleneck
Glidelåskjøring	Zipper Merge
Trafikkavvikling	Traffic Flow
Kapasitetsfall	Capacity Drop
Feltskifte	Lane Change

3.2 Datainnsamling

3.2.1 Valg av studieområde

I forstudiet til masteroppgaven ble det sett på potensielle flaskehalser som kunne benyttes som utgangspunkt for innsamling av data til en modell. Det var ønskelig å finne en eller flere flaskehalser som i liten grad ble påvirket av forstyrrende elementer i vegnettet som av- og påkjøringsramper og kryssløsninger. Tanken bak dette, var å minimere feilkilder, samt gjøre det enklere å gjenskape situasjonen i modelleringsprogrammet. Å ta utgangspunkt i en flaskehals bestående av kun to kjørefelt som går sammen til ett, ville begrense omfanget av både innsamlingen av data og modelleringen av flaskehalsen.

Det var også fordelaktig om flaskehalsen(e) lå i Trondheimsområdet for å ikke gjøre innsamlingen av data mer tungvint og dyrere enn nødvendig. For at en flaskehals skulle kunne brukes til datainnsamling, ble det bestemt at den burde ha regelmessige avviklingsproblemer av en viss størrelse. Dette kom av nødvendigheten med en lenger periode med kø, for å kunne se på hva som kunne påvirke effektiviteten av avviklingen.

E6 øst for Trondheim i retning Stjørdal har delstrekninger utformet som 2+1 veger. Det vil si at kjøreretningene bytter på å ha to kjørefelt. Der en kjøreretning har to kjørefelt, benyttes ofte venstre kjørefelt som et forbikjøringsfelt. Avslutningen på et slikt forbikjøringsfelt reguleres på samme måte som to trafikkstrømmer som flettes sammen med skilt 530 for sammenfletting.

Når et felt ansees som et forbikjøringsfelt, vil ofte hastigheten i dette feltet være høyere og trafikkmengden lavere enn i det høyre kjørefeltet. Selv om skilt 530 tilsier at trafikken i begge kjørefeltene skal tilpasse seg hverandre og ha gjensidig vikeplikt, kan det tenkes at det i praksis ikke fungerer slik, og at trafikken i forbikjøringsfeltet er den som må ta størst ansvar for å flettes tilbake inn i trafikken i det høyre kjørefeltet. Da det var ønskelig å se på en flaskehals hvor to trafikkstrømmer med noenlunde lik hastighet og trafikkmengde flettes sammen, og situasjonen med et forbikjøringsfelt ikke ansees å samsvare med dette, ble det dermed valgt å se bort fra slike flaskehalser.

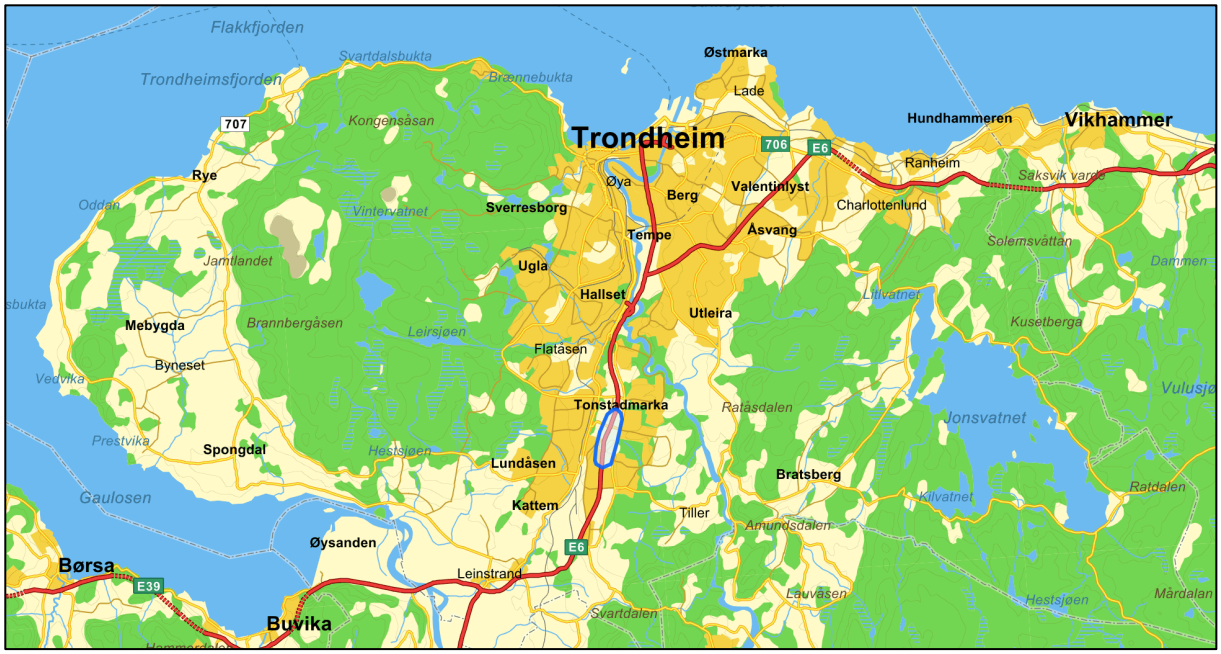
Langs E6 sør for Trondheim sentrum, ble det derimot observert en flaskehals, rett sør for kjøpesenteret City Syd på Tiller, som kunne passe godt som et utgangspunkt for innsamling av data. Flaskehalsen så ut til å være plassert langt nok unna en påkjøringsrampe til at den ikke burde ha så stor innvirkning, og ikke i nærheten av andre potensielle forstyrrelser. Fletteprosessen ble regulert av skilt 530, og utformingen av flettepunktet ga uttrykk for at trafikkstrømmene hadde gjensidig vikeplikt og måtte ta like stor del i fletteprosessen.

Delstrekningen av E6 som innehar flaskehalsen, er en del av prosjektet «E6 Trondheim – Melhus» som omfatter ombygging av E6 til firefelts veg med ferdigstillelse i 2019. I dag er denne vegstrekningen svært overbelastet, og hensikten med ombyggingen av vegen, er å eliminere en stor flaskehals og forbedre forholdene for kollektivtrafikk, samt gang- og sykkeltrafikk (Statens vegvesen, 2016). Det er denne store flaskehalsen som til slutt ble valgt ut som utgangspunktet for innsamlingen av data i masteroppgaven.

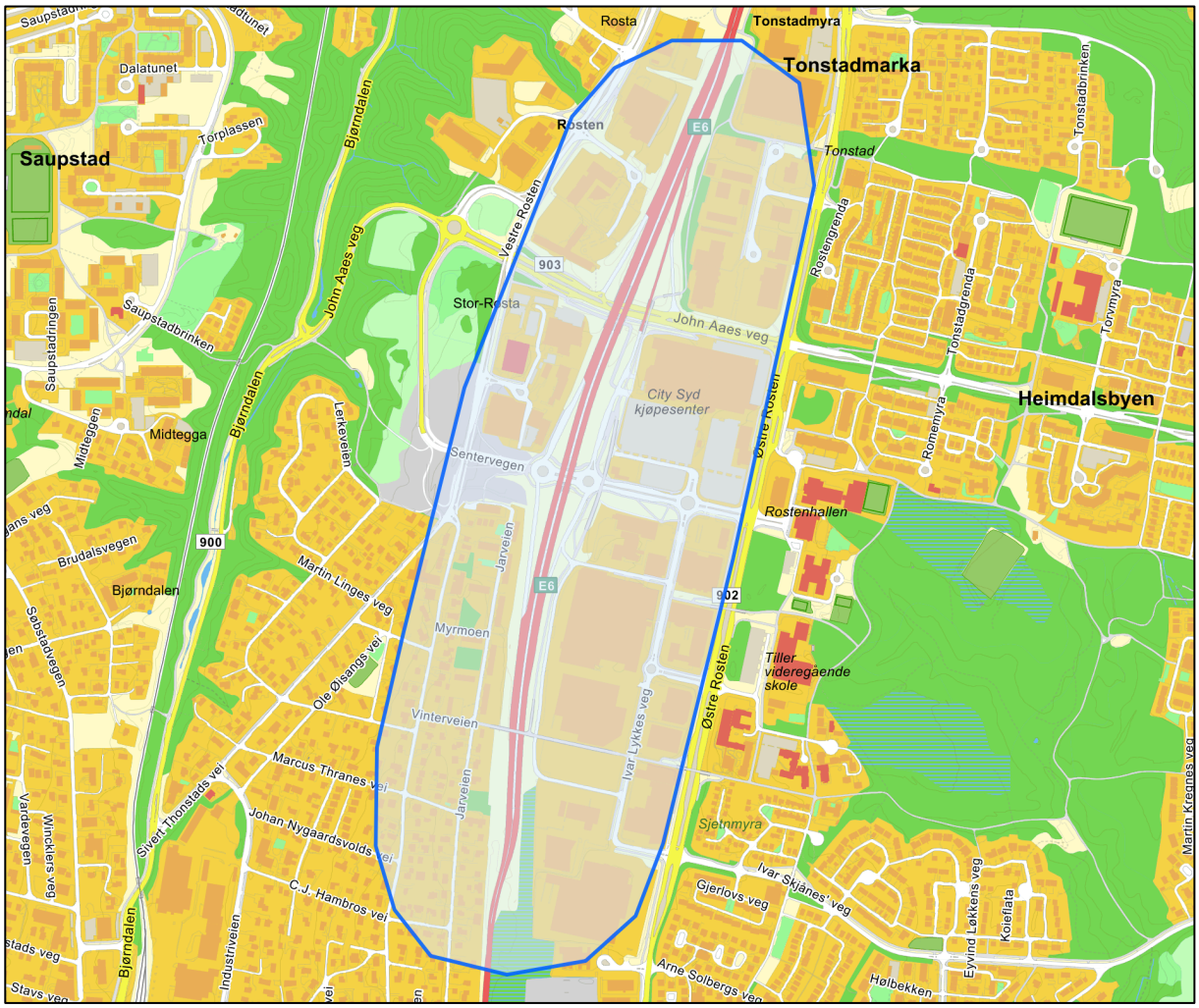
Valget om flaskehalsen på Tiller som studieområde, viste seg etterhvert å skape utfordringer. Strekningens utforming var hele tiden i endring grunnet ombyggingen, og plasseringen av flaskehalsen varierte derfor deretter. Av den grunn, var det nødvendig med noe slingringsmonn på når videoregistreringene kunne gjennomføres slik at de ikke ble planlagt midt i en omleggingsfase av vegen.

Figur 13: To fletteprosesser illustrert med røde sirkler. Fletteprosess (1) lengst bak, og fletteprosess (2) lengst frem til venstre i bildet.

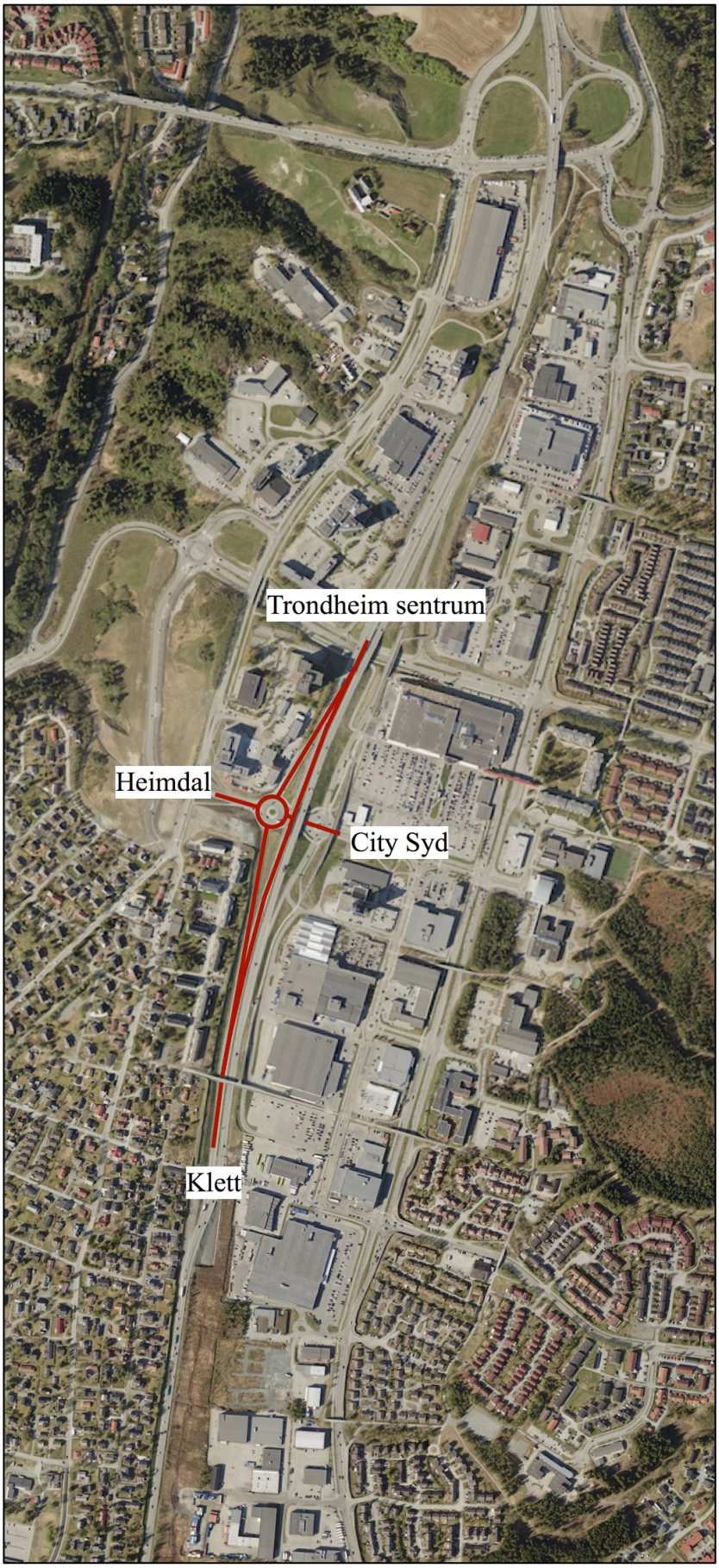
Da det var tid for å gjennomføre videoregistreringer, hadde flaskehalsen forskjøvet seg 300-400 meter i retning Trondheim sentrum. Dette førte til at flaskehalsen, som i utgangspunktet ikke lå i nærheten av andre hindringer i vegnettet da den ble valgt ut, på registreringstidspunktet hadde en påkjøringsrampe rett etter fletteprosessen. Videre førte dette til at området nå bestod av to fletteprosesser: (1) fletteprosessen mellom høyre og venstre kjørefelt på E6 og (2) fletteprosessen mellom trafikk på E6 og trafikk fra påkjøringsrampen til E6. Disse prosessene er vist i Figur 13. To prosesser ville mest sannsynlig påvirke registreringene, men det ble bestemt at registreringene likevel skulle gjennomføres der. Et kartutsnitt av områdets plassering er vist i Figur 14, og et nærmere utsnitt er vist i Figur 15. I Figur 16 er området som videre er tenkt modellert markert i rødt. Navnene i figuren benyttes videre i oppgaven, og er kun ment som retningsindikasjoner.



Figur 14: Kartutsnitt, studieområde markert i blått (Hentet fra: Gule Sider).



Figur 15: Zoomet kartutsnitt, studieområde markert i blått (Hentet fra: Gule Sider).



Figur 16: Oversikt over området som er tenkt modellert markert i rødt.

3.2.2 Videoregistrering

For å innhente nødvendig data for å kunne vurdere og modellere en flaskehals, ble det benyttet videoregistreringer. Ved hjelp av videoopptak av strekningen i området rundt flaskehalsen, kunne diverse målinger og observasjoner gjennomføres, blant annet det å finne årsdøgntrafikk og fordeling av trafikkmengde i de ulike kjørefeltene. Disse målingene og observasjonene har videre blitt benyttet til analyser og modellering i trafikkmodelleringsvektøyet Aimsun.

Valg av tidspunkt for videoregistrering

Da det er ettermiddagsrushet ut av Trondheim sentrum i retning Klett som er det store problemet, var det naturlig å gjennomføre videoregistreringene på ettermiddagen. Hvilket tidsrom som kunne være aktuelt, ble vurdert ut ifra når det så ut til at køproblematikken vanligvis startet og sluttet.

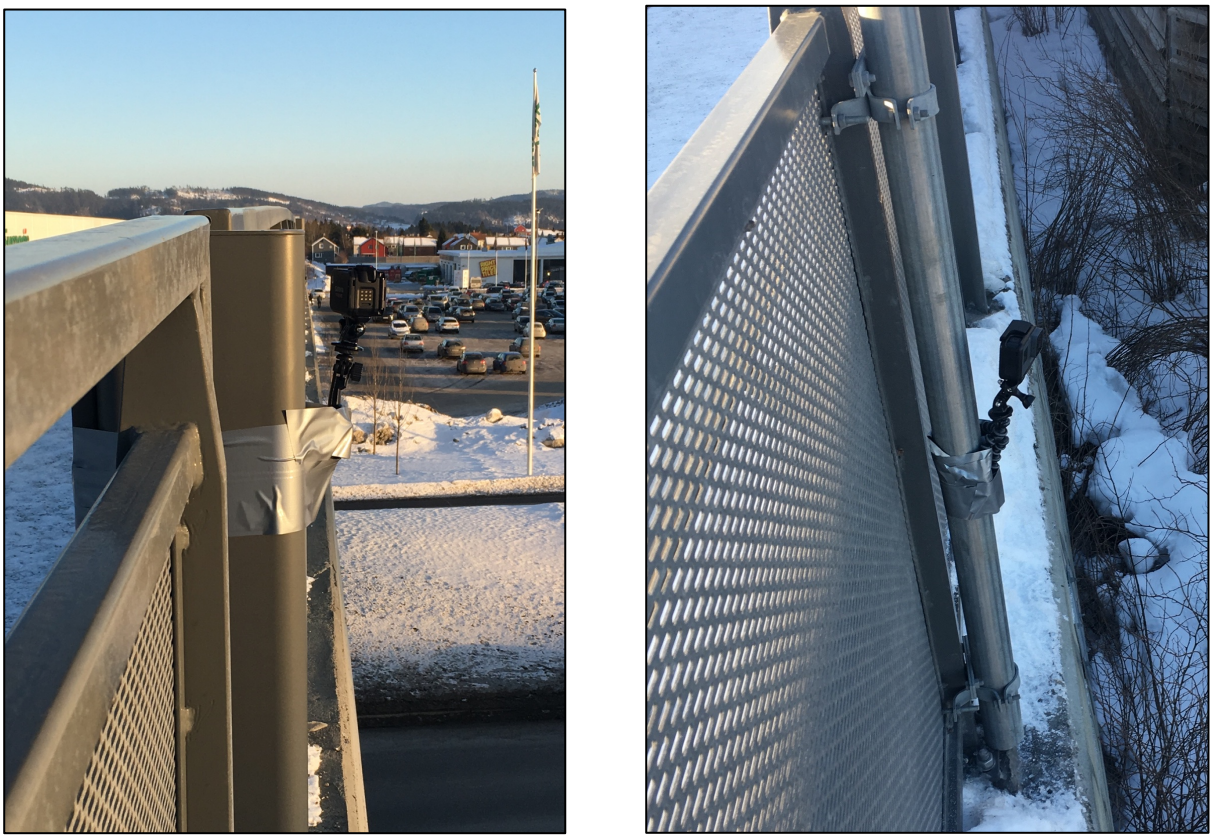
Når det kom til valg av uke og dag, var det visse kriterier som spilte inn. Det var viktig at værforholdene var slik at de ikke ville ha innvirkning på verken kjøring eller filming. Snøbyger og glatte kjøreforhold var derfor ikke ønskelig. Det var derimot fordelaktig om det var en fredag, da ettermiddagsrushet gjerne starter tidligere denne ukedagen enn de resterende dagene i uken. At det kan være mer trafikk på fredager grunnet starten på helgen, var heller ikke å forakte. Tidlig start på ettermiddagsrushet var gunstig med tanke på at filmkvaliteten ville bli bedre med dagslys enn skumring. På vinterstid går solen tidlig ned i Trondheim, og det kunne fort blitt vanskelig å se godt hvis det hadde blitt filmet når det er mørkt.

Valg av kameraplassering

For å finne ut hvor kameraer kunne plasseres, og hvor mange kameraer som var nødvendig å sette opp for å få god nok oversikt over flaskehalsen, ble det gjennomført befaringer til fots i området rundt E6 og flaskehalsen. Et støygjerde langs strekningen og en gangbro som går over vegen, ble vurdert til å være anvendelige festepunkter for kameraene. Med ett kamera i retning Trondheim sentrum, og ett kamra i retning Klett på begge festepunktene (fire kameraer totalt), ville man forhåpentligvis få en god oversikt over både fletteprosessen hvor antall kjørefelt reduseres på E6, og fletteprosessen mellom trafikken på E6 og trafikken fra påkjøringsrampen til E6. Figur 17 viser hvordan kameraene på gangbroen ble festet.

Type kameraer

Videoregistreringene ble gjennomført med kameraer fra leverandørene GoPro og Garmin. Modellene som ble benyttet, var henholdsvis GoPro Hero 5 og Garmin VIRB XE vist i Figur 18. Dette er små, vanntette actionkameraer som egner seg godt for registrering av trafikk. De kan festes med ulike festeanordninger som klyper, reimer, sugekopper og limputer. Dette gjorde det mulig å være kreativ med hvordan best mulig få de nødvendige videoopptakene. Begge kameratypene kan styres ved hjelp sine tilhørende apper; GoPro og Garmin VIRB, som kan lastes ned gratis fra både App Store og Google Play. Mer om funksjoner og spesifikasjoner kan leses om i kameraenes brukermanualer (GoPro, Garmin).



Figur 17: Kameraplassering på gangbro, retning Klett til venstre og Trondheim sentrum til høyre.

Antall registrering

For å kunne gjøre en god vurdering av flaskehalsen, hadde det vært ønskelig med mange registreringer fordelt på flere dager, og gjerne også ulike flaskehalser. Grunnet begrenset med tid i masteroppgaven, ble det bestemt at man i første omgang kun skulle se på én flaskehals, men være åpen for flere dersom gode eksempler på områder hvor to felt går sammen til ett dukket opp. Det ble derimot ikke lagt inn stor innsats for å finne slike da det fort ville tatt mye tid.

Da det viste seg at flaskehalsen, som først ble valgt ut, ikke egentlig fungerte optimalt (nærmere forklart i Observasjoner underveis), ble det avgjort at flere registreringer av denne flaskehalsen ikke var nødvendig, da de også ville gitt samme feilkilder som den første registreringen.

Figur 18: GoPro Hero 5 til venstre og Garmin VIRB XE til høyre (GoPro og Garmin).

Utførelse

Videoregistreringene ble gjennomført fredag 2. februar 2018. Med god hjelp fra veileder, ble fire kameraer festet på de forhåndsbestemte plassene i tidsrommet 13:00-13:30. Henholdsvis to kameraer på støygjerdet langs vegen, og to på gangbroen over vegen. Det var strålende sol og veldig kaldt. Temperaturen varierte mellom -10 og -15 grader Celsius i løpet av registreringsperioden. Kameraene ble festet med ulike festemekanismer og Gaffateip for å få dem til å sitte godt, noe som var utfordrende med tanke på frost og snø på støygjerdet og rekkverket til gangbroen.

Både GoPro- og Garmin-kameraene har en batteritid som varierer med oppløsningen man velger på videoopptakene. Batteritiden avtar med økende oppløsning, og omvendt. Av den grunn, ble kameraene koblet til kraftige powerbanker som gjorde det mulig å filme over en lenger periode enn hva kameraene hadde klart uten eksterne energikilder. For å kunne koble kameraene til powerbanker, var det nødvendig med en ladningskabel. Instituttet som lånte ut kameraene, hadde bare tre slike, to til Garmin og én til GoPro. Følgelig var det ett av GoPro-kameraene som ikke nødvendigvis klarte å filme hele registreringsperioden. Dette kameraet ble derfor plassert på gangbroen da støygjerde ble ansett som plasseringen som ville gi den viktigste informasjonen.

I tillegg til et GoPro-kamera uten ledning, var det også et Garmin-kamera som ikke ville slå seg på med det første da det skulle plasseres på gangbroen. Dette, sammen med mangel på ledning, resulterte i dårlig sammenhengende registeringer fra gangbroen.

På støygjerdet filmet kameraene sammenhengende i perioden fra kl. 13:30 til kl. 17:00. Det samme skulle i utgangspunktet også kameraene på gangbroen gjort, men dette ble, som nevnt tidligere, noe avkortet. Kl. 17:00 var det fortsatt kø på vegen, noe som opprinnelig ikke var ønskelig. Trafikken skulle helst gått fra fri flyt til sammenbrudd til fri flyt igjen. På grunn av kulden, og at kameraene måtte overvåkes da de sto synlig til for forbipasserende, ble det likevel bestemt at det holdt med å filme frem til kl. 17:00. Å få med hva som skjer før sammenbruddet og selve sammenbruddet, ble ansett som det viktigste.

Samtidig som de fire kameraene filmet fra sine plasseringer, ble strekningen fra Tonstadkrysset til rundkjøringen på Klett kjørt med bil tre ganger i løpet av registreringsperioden. I bilen var det plassert et kamera på dashbordet, samt en GPS som blant annet kunne gi riktig fartsprofil langs strekningen.

Det var i utgangspunktet ønskelig å bruke en drone til å ta et par oversiktsbilder da de man får fra Norge i Bilder og Google Maps ikke stemmer overens med dagens situasjon grunnet ombyggingen av vegen. Da dronen helst ikke skal kjøres under null grader Celsius, ble dette derimot ikke gjennomført på grunn av den lave temperaturen.

Figur 19: Viser området hvor E6 krysser over Kv. 6549, samt av- og påkjøringsrampene til E6.

Observasjoner underveis

Underveis i registreringene, ble det oppdaget at det ikke nødvendigvis var fletteprosessene alene som skapte den dårlige avviklingen på strekningen. Det så ut til at også avviklingen av trafikk videre mot Klett var med på å skape problemer. På grunn av ombyggingen, var dette på registreringstidspunktet en svingete strekning med flere rundkjøringer laget for kryssende anleggstrafikk. Kø på denne strekningen så ut til å skape tilbakeblokkering ved flaskehalsene, noe som kanskje ville påvirke registreringene negativt.

På registreringsdagen ble det også observert at en del velger å kjøre av E6 ved avkjøring nr. 33 til Tillerbyen, for så å kjøre på igjen etter rundkjøringen ved City Syd. Denne muligheten er vist i Figur 19 hvor man ser av- og påkjøringsrampene til E6, rundkjøringen ved City Syd og broen hvor E6 krysser over Kv. 6549. En illustrasjon av snarvegen med kø som strekker seg forbi starten av broen er også vist i Figur 20. Det så ut til at denne muligheten i hovedsak ble benyttet når køen på E6 strakk seg forbi starten på broen, og folk så køen før de måtte ta valget mellom å kjøre av E6 eller kjøre videre over broen. Denne «snarvegen» ble testet på siste kjøretur fra Tonstadkrysset til Klett.

For å finne ut i hvor stor grad disse «snikerne» påvirket registreringene, ble det besluttet at disse skulle registreres ved en senere anledning. Et par uker senere ble det derfor gjennomført en manuell telling. Da ble det registrert hvor mange, av de som kjørte på påkjøringsrampen til E6, som kom fra avkjøringsrampen, og hvor mange som kom fra Heimdal og City Syd. Kjøretøyene som kom fra avkjøringsrampen ble betegnet som snikere. Busser i rute, ble derimot ikke betegnet som snikere da disse må kjøre slik for å betjene holdeplassen på avkjøringsrampen.

Den manuelle tellingen varte én time da det kun var ønskelig med en viss pekepinn på hvor stor andelen av trafikken fra påkjøringsrampen som kunne ansees som snikere. I løpet av hele registreringstimen strakk køen seg forbi starten på broen over Kv. 6549.

Figur 20: Illustrasjon av snarveg nedenom rundkjøring. Køen (røde kjøretøy) strekker seg forbi starten av broen, og snarvegen benyttes for å slippe unna deler av køen. Blå kjøretøy representerer snikere.

3.3 Analyse av innhentet data

3.3.1 Hente ut data fra videoregistreringene

Manuelle registreringer

Fra videoregistreringene var det ønskelig å hente ut data som videre kunne bli benyttet som inngangsdata i modellen i simuleringsprogrammet Aimsun. Dette gikk blant annet ut på å registrere fordeling av bruk av kjørefelt og antall kjøretøy, samt deres tid ved passering ved et visst punkt for å kunne gi en variasjon i trafikkmengde over tid.

I uvitenheten om at registreringene kunne gjøres på en enklere måte, ble filmene fra kameraet plassert på støygjerde i retning Trondheim først registrert med penn og papir. Det ble satt én strek for hvert kjøretøy, lette og tunge kjøretøy hver for seg, og summert opp etter hvert femte minutt. Dette viste seg å ta veldig lang tid da filmen til stadighet måtte settes på pause for å sørge for at alle kjøretøyene ble telt, og det var flere timer med videoopptak. I samtale med veileder kom det frem at en annen masterstudent hadde laget et skript som kunne gjøre denne jobben enklere og mindre manuell. Det ble også konkludert med at det var ønskelig å registrere kjøretøy på enkeltnivå, og ikke bare i femminuttersintervaller.

Python

Skriptet som kunne benyttes til å gjennomføre registreringene på en enklere måte, hadde Sindre Lindheim-Minde utviklet som en del av sin masteroppgave. Ved hjelp av dette, kunne man lett registrere enkeltkjøretøy. Tiden i timer, minutter og sekunder, samt type kjøretøy og dets plassering i vegbanen kunne bli registrert. Videre ga skriptet ut en text-fil med denne informasjonen som kunne overføres til Microsoft Excel for videre behandling.

I samarbeid med Lindheim-Minde, ble skriptet tilpasset flettesituasjonen ved City Syd med de parameterne som var nødvendig å ha med i denne situasjonen. Lindheim-Minde var også behjelpelig med forklaring og demonstrasjon av hvordan skriptet fungerte, og med nedlastning og opplæring av nødvendig programvare. For å kunne kjøre skriptet, var det nødvendig å bruke programmeringsspråket Python. Skriptet som ble benyttet ligger vedlagt som elektronisk vedlegg i zip-fil.

Utførelse

Å se på fordeling av bruk av kjørefelt og hvordan selve fletteprosessen foregår, var ønskelig. Kjøretøyene ble derfor registrert idet de flettet sammen. Den første fletteprosessen, den som foregår på E6 rett etter broen over Kv. 6549, kom greit frem på videoregistreringene, og det er tenkelig at det her er lite feilregistreringer. Den andre fletteprosessen kom derimot dårlig frem på filmene, og denne var derfor vanskelig å registrere riktig. Her er det naturlig å anta at det er en del feil da det nesten var umulig å vite hvor mange kjøretøy som passerte da kjøretøyene til tider fløt helt i hverandre, se Figur 21. For å minimere denne feilen, ble derfor kjøretøyene i denne fletteprosessen registrert to separate ganger, én gang i selve fletteprosessen, og én gang før fletteprosessen startet. I området før fletteprosessen startet var det mye bedre oversikt og lettere å registrere Sammenligningen mellom disse to registreringene viste at det var noen kjøretøy som ble tapt i den første registreringen. Da riktig antall kjøretøy ble ansett som viktigere enn eksakt tidspunkt for fletting, ble derfor registrering nummer to benyttet videre i oppgaven.

Figur 21: Viser vanskelige siktforhold for registrering av kjøretøy i flettesituasjonen ved gangbroen.

3.3.2 Behandle data fra videoregistreringene

Microsoft Excel

Microsoft Excel ble benyttet til å behandle registreringene av kjøretøy. I dette programmet ble text-filene, produsert av skriptet i Python, lagt inn slik at blant annet trafikkmengdefordelinger kunne produseres, og dermed også OD-matriser som er nødvendig for å kunne lage en modell i Aimsun mest mulig realistisk. Prosentvis fordeling av type kjøretøy og bruk av kjørefelt, ble også generert for å kunne se på hvordan dette eventuelt kunne påvirke flettesituasjonen.

Registreringene ligger vedlagt som elektronisk vedlegg i zip-fil.

OD-matriser

Da det var ønskelig å modellere trafikken i femminuttersintervaller, viste det seg fort at dette krevde veldig mange matriser. På tre og en halv time med trafikkregistreringer, ble det 42 totalmatriser, og enda 2x42 matriser til om disse igjen skulle deles opp i prosentvis fordeling av lette og tunge kjøretøy.

Ved benyttelse av OD-matriser, er det viktig at størrelsen og innholdet matrisene, stemmer overens med modellen matrisene skal inn i. Modellen i Aimsun ble først laget til å inneholde fire sentroider: Trondheim, Heimdal, City Syd og Klett. Dette ville gitt en 3x3-matrise som tilsier at det er mange tall som skal skrives inn manuelt dersom det er ønskelig med alle matrisene nevnt over.

Ved hjelp av funksjonene Visual Basic og registering av makroer i Microsoft Excel, kan man lage og kjøre skript. Ved å ta utgangspunkt i disse funksjonene med noe prøving og feiling, ble totalmatrisene generert i Microsoft Excel og gjort om til en text-fil som skulle kunne importeres i Aimsun. Matrisene ble i tillegg delt inn i matriser for tunge og lette kjøretøy slik at alle de nødvendige matrisene ble laget uten at det var behov for å plotte inn tallene manuelt i Aimsun.

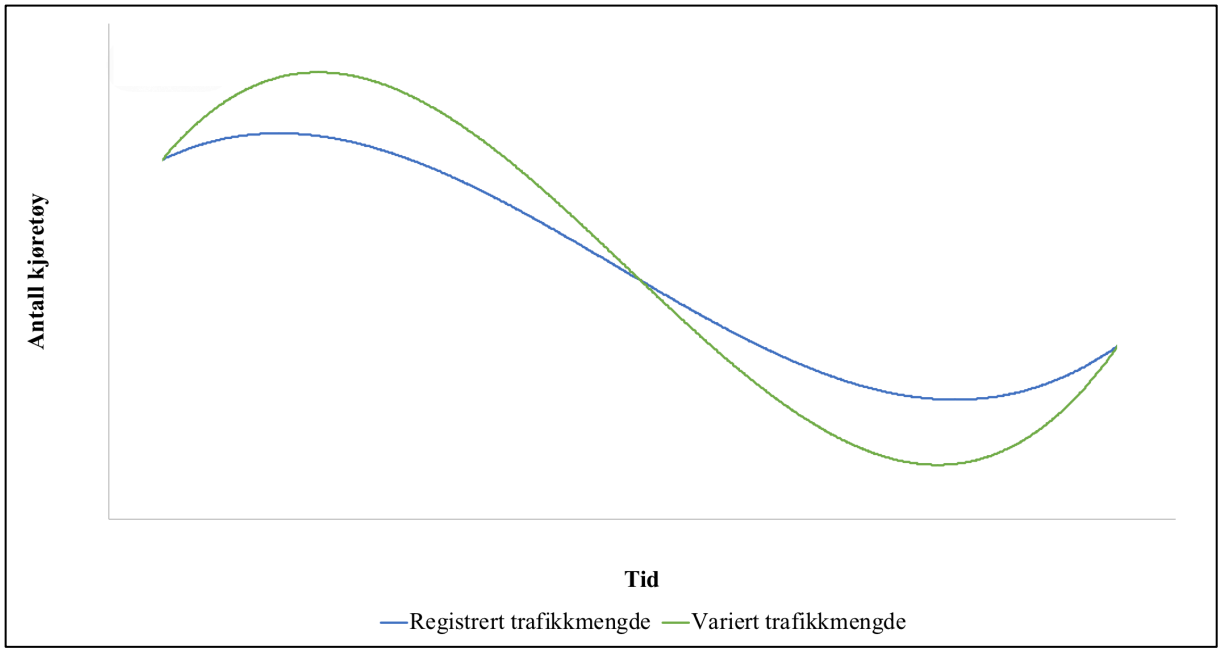
I samtale med veileder, ble det senere bestemt at modellen skulle forenkles til kun å inneholde tre sentroider: Trondheim, Rundkjøring og Klett. Mer om grunnen til dette i delkapittel 3.4 Bruk av Aimsun. Dette gjorde slik at det nå kun var to tall som skulle skrives inn i hver matrise. Da det viste seg å være utfordrende å finne ut hvordan man skulle importere text-filen generert

fra Microsoft Excel til Aimsun, var dette positivt da den manuelle jobben med å lage matrisene direkte i programmet ble mindre omfattende.

Variasjonskurver

Kjøretøyene ble registrert idet de flettet sammen. Det vil si at det var avviklet trafikk som ble registrert, og ikke etterspørsel. I Aimsun er det etterspørsel som legges inn i OD-matrisene. Dette førte til at en direkte overføring av registrert trafikkmengde, ville blitt feil. Dersom etterspørsel og avviklet trafikk hadde vært det samme, ville det i teorien ikke oppstått kø, noe det i registreringsperioden var mye av. OD-matrisene måtte derfor få en variasjon som kunne skape kø i Aimsun tilnærmet den observerte.

Når trafikken flyter fint, vil registrert trafikkmengde være lik variert trafikkmengde da etterspørsel er lik avviklet trafikk. Etterspørselen vil etter hvert overskride avviklet trafikk, og kø bygger seg opp. For at køen skal oppløses, må etterspørsel minke slik at den ligger under avviklet trafikk. Når køen er oppløst, vil etterspørsel igjen være lik avviklet trafikk. Dette er illustrert i Figur 22.



Figur 22: Illustrasjon av en variasjonskurve.

For å gjenskape den nødvendige variasjonen i OD-matrisene så realistisk som mulig, skulle ideelt sett kølengder blitt registrert samtidig som videoregistreringene ble gjennomført. Dette ble ikke gjort. På registreringsdagen var køen heller ikke helt oppløst da videoopptakene ble avsluttet, noe den med fordel skulle vært. Å finne en realistisk variasjonskurve uten nødvendig data, viste seg derfor å bli utfordrende. Ved hjelp av data fra de tre kjøringene som ble utført i løpet av registreringsperioden, kunne man derimot se at køen aldri gikk helt tilbake til Tonstadkrysset, men stoppet ved avkjøring nr. 33A til Heimdal. Ved å beregne maksimal kølengde ut ifra dette, var det mulig å i hvert fall få en viss pekepinn på om variasjonskurven var helt feil ved å sammenligne beregnet kølengde med maksimal kølengde i Aimsun. Beregnet kølengde ble estimert ved å ta lengden på strekningen hvor kø kunne bygge seg opp, gange med to for å representere begge kjørefeltene, og dele på et gjettet gjennomsnitt på åtte meter per kjøretøy.

3.4 Bruk av Aimsun

Modelleringsprogrammet Aimsun, utviklet av Transport Simulation System, ble benyttet til trafikksimuleringer av flaskehalsen. For å få et realistisk bilde av virkeligheten i den modellerte versjonen av flaskehalsen, ble Aimsuns mikrosimuleringsverktøy benyttet.

3.4.1 Konstruksjon av modell

For å konstruere en realistisk modell, ble et høyoppløselig ortofoto med bakkeoppløsning 0,1 meter benyttet. Dette ble lastet ned fra Norge i Bilder, og er vist som bakgrunn i Figur 16. Et ortofoto med veldig god oppløsning, gjorde det mulig å tegne vegene inn forholdsvis nøyaktig med både riktig bredde og generell utforming, som blant annet oppmerking ved å følge linjene på ortofotoet. Dette er vist i Figur 23 og Figur 24.

Senere viste det seg at å tegne så nøyaktig som mulig, kunne skape utfordringer med selve kjøringen av modellen. Et eksempel på dette, er flettestrekningen der E6 og påkjøringsrampen fletter sammen. Å tegne denne flettestrekningen etter ortofotoet ga et langt kryss som kunne skape forvirring om hvordan kjøretøyene skulle forholde seg til hverandre. Dette ble derfor endret til et mindre kryss som da ikke står helt i samsvar med den virkelige utformingen.

Videre ble det vurdert hvor stort område som skulle modelleres. Dette ble automatisk noe begrenset av hva videoregistreringene kunne gi av informasjon da data fra disse skulle benyttes som inngangsdata i modellen i Aimsun. Registreringene ga kun informasjon om kjøretøy i sørgående retning på E6 og kjøretøy fra påkjøringsrampen. Det ble derfor bestemt at modellen i utgangspunktet kun skulle bestå av denne trafikken som da ville dekke begge fletteprosessene vist i Figur 25.

Grunnet at det var ønskelig å få frem snarvegen nedenom rundkjøringen i modellen, vist i Figur 26, ble det bestemt at også avkjøringsrampen og rundkjøringen skulle inn i modellen. Dette ga en modell bestående av fire sentroider: Trondheim, Klett, City Syd og Heimdal. Dette er vist i Figur 27.

Figur 23: Utsnitt av ortofoto uten nettverk tegnet inn.

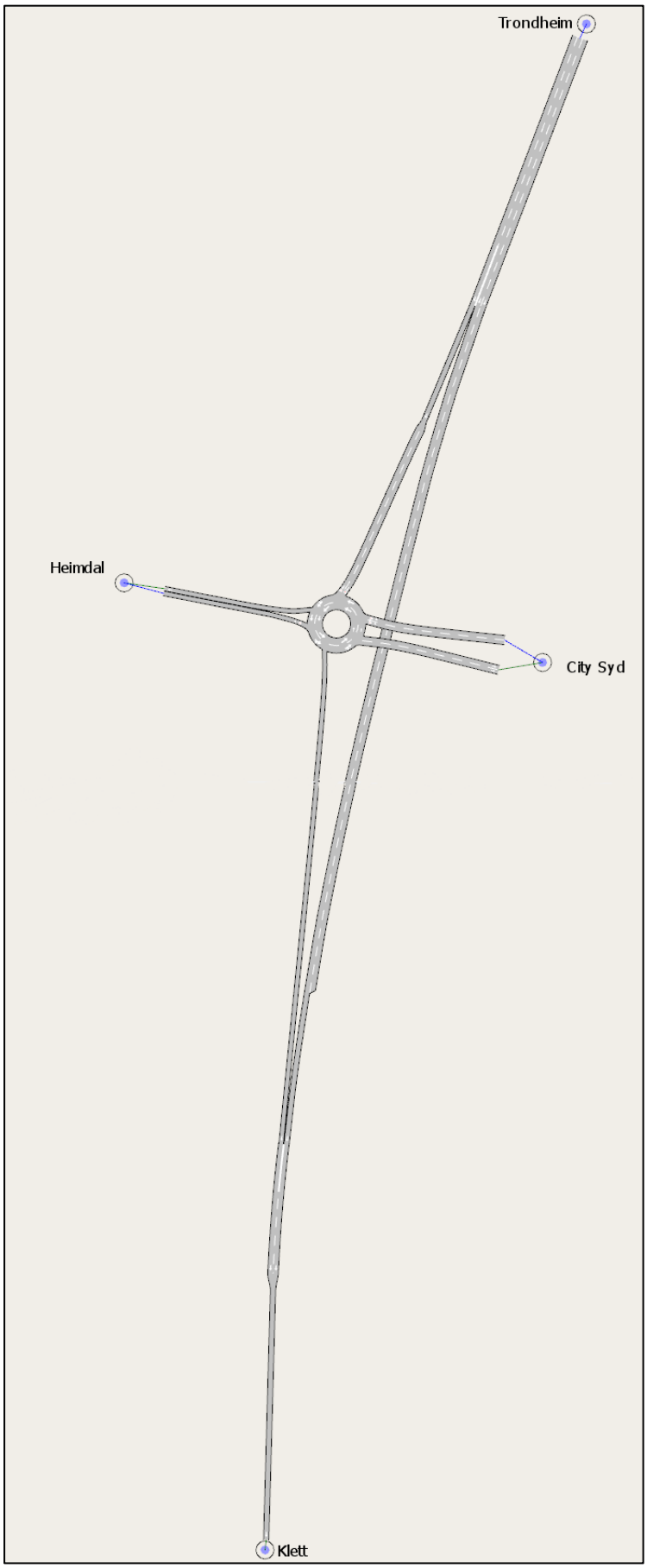
Figur 24: Utsnitt av ortofoto med nettverk tegnet inn.

Figur 25: Utsnitt av modell i Aimsun som viser begge fletteprosessene markert med røde piler.

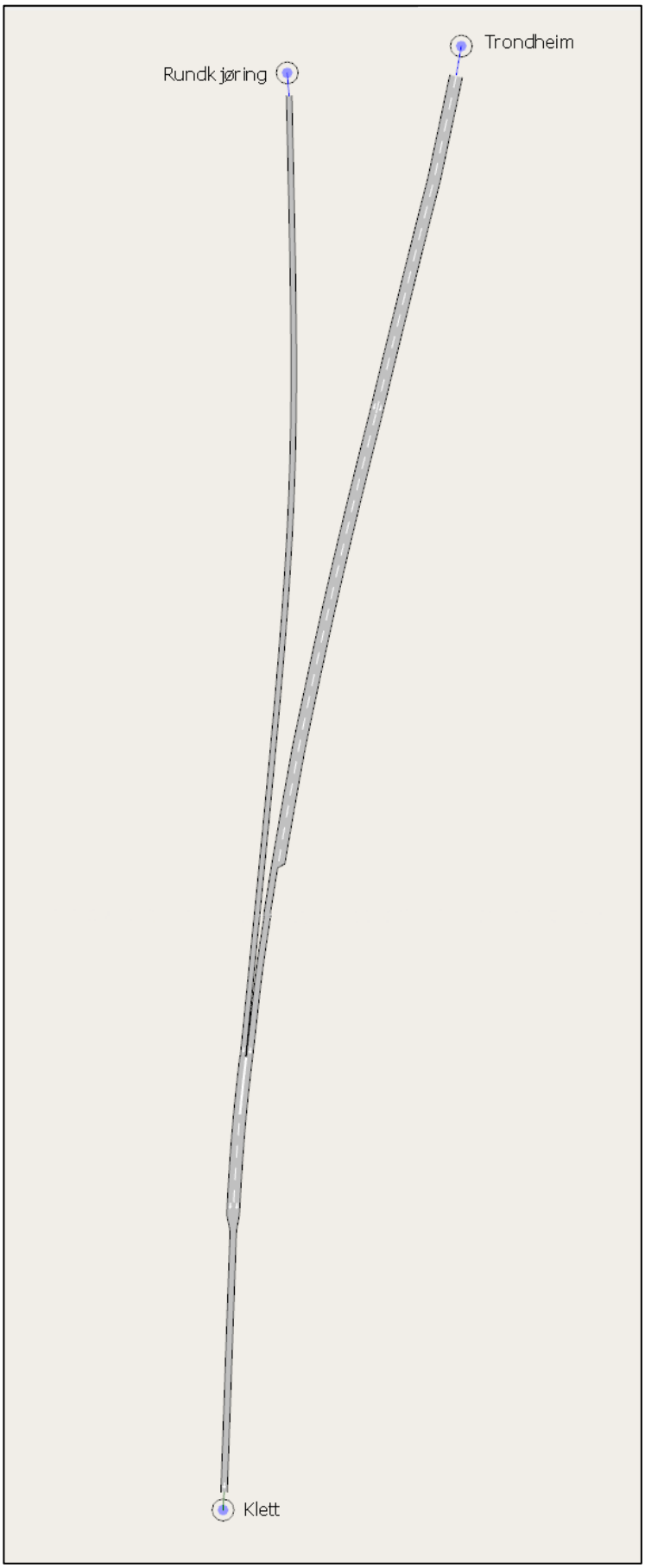
Figur 26: Utsnitt av modell i Aimsun som blant annet viser av- og påkjøringsrampene hvor det er mulig å snike seg forbi køen på E6.

Med avkjøringsrampen og vegarmene mot Heimdal og City Syd med i modellen, ble det nå flere ukjente trafikkmengdevariabler som ikke videoregistreringene ga data på. Avkjøringsrampen ble løst ved å sette trafikkmengde på denne rampen lik registrert trafikkmengde på påkjøringsrampen da det er slik det er registrert i Vegkart (Statens vegvesen). Trafikken til og fra Heimdal og City Syd ble antatt å ha liten påvirkning for avviklingen i systemet. I OD-matrisene ble disse dermed kun satt til symbolske verdier.

Etter at OD-matrisene hadde blitt generert for modellen med fire sentroider, ble det, som nevnt tidligere, bestemt at modellen skulle forenkles til å kun inneholde tre sentroider. Dette ble gjort for å minske sannsynligheten for store feilkilder. Med kun de tre sentroidene: Trondheim, Rundkjøring og Klett, vist i Figur 28, var alle trafikkmengdene kjente. Vegarmene i modellen ble strukket ut for at ikke kø skulle hope seg opp utenfor nettverket.



Figur 27: Skisse av modell i Aimsun med fire sentroider.



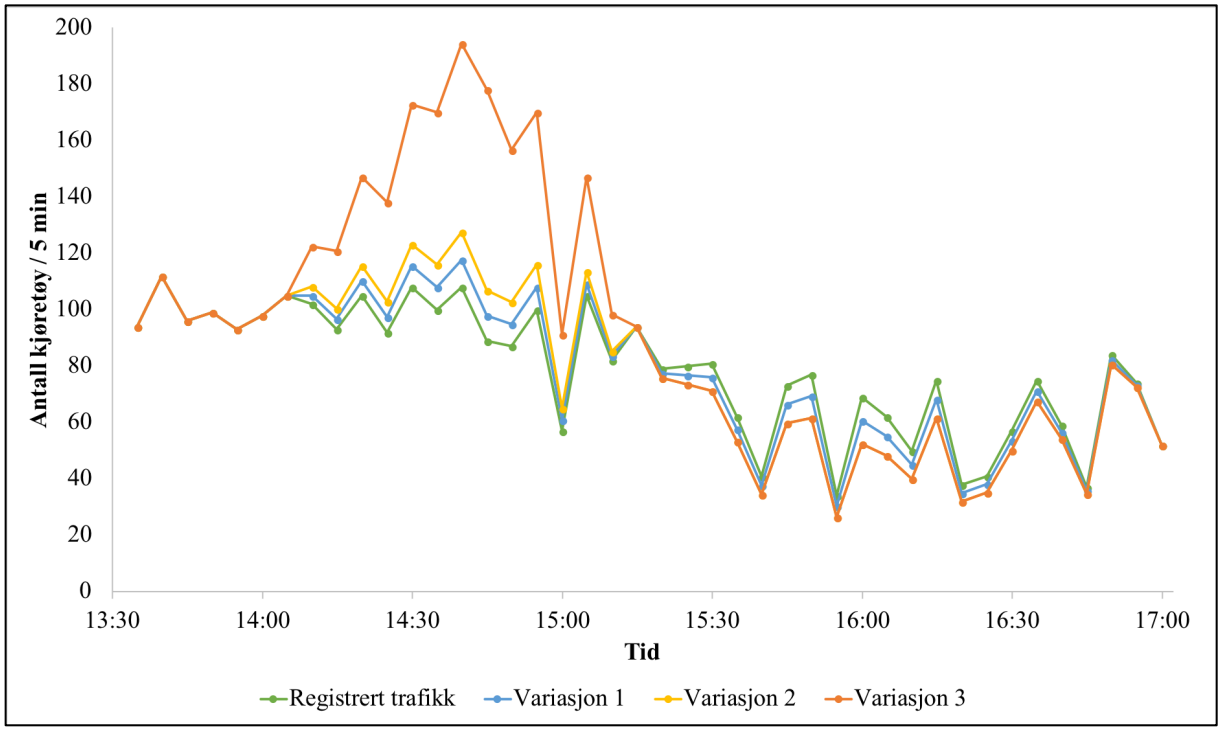
Figur 28: Skisse av forenklet modell i Aimsun med tre sentroider.

3.4.2 Kjøring av modell med data fra videoregistreringer

Variasjonskurver

Videre ble nye OD-matriser laget, denne gangen kun for trafikk fra Trondheim og Rundkjøring mot Klett. Matrisene ble også denne gangen laget med femminutters intervaller. For å ta høyde for forskjellen mellom avviklet trafikk og etterspørsel som er nevnt i underkapittel 3.3.2 Behandle data fra videoregistreringene, ble ulike variasjonskurver testet ut. Sammenligningen mellom variasjonskurvene og registrert trafikk er vist i Figur 29.

Det ble først testet ut to forskjellige variasjonskurver som kun hadde en liten endring i trafikkmengde fra registrert trafikk (variasjon 1 og 2). Da det viste seg at ingen av disse variasjonskurvene genererte kø, ble det testet ut en tredje variasjonskurve med mer ekstreme endringer i trafikkmengde enn de to foregåendene (variasjon 3). Selv ikke denne variasjonen i trafikkmengde genererte kø. Å få modellen til å fungere realistisk sammenlignet med de virkelige trafikkregistreringene viste seg derfor å bli utfordrende.



Figur 29: Variasjonskurver, laget for å ta høyde for forskjellen mellom avviklet trafikk og etterspørsel i Aimsun, sammenlignet med registrert trafikk.

Rampekontroll

Siden det i løpet av registreringsperioden så ut til at mangel på fri flyt etter flaskehalsene kanskje var med på å skape avviklingsproblemer i området, ble det naturlig å forsøke og legge inn denne forsinkelsen i modellen også. Dette ble gjort ved å sette inn en rampekontroll etter siste flettestrekning. Denne rampekontrollen ble satt inn som en signalregulering som kun slipper gjennom ett kjøretøy per et bestem antall sekunder. Dette er vist i Figur 30.

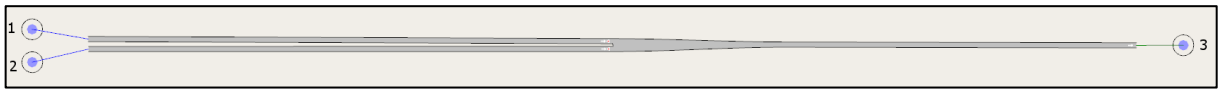
Rampekontrollen ble først satt til seks sekunder. Dette førte til kø med en gang, men altfor mye kø sammenlignet med beregnet maksimal kølengde fra de tre kjøreturene gjennomført i løpet av registreringsperioden. Rampekontrollen ble derfor stegvis redusert til den til slutt sto på 0,1 sekunder. Dette ga litt mer realistiske resultater, men fortsatt for mye kø. Å ikke starte den før en halvtime ut i simuleringen ble også uttestet uten større hell. Uansett hvordan rampekontrollen ble satt opp, så ble det enten for mye, for lite eller for lenge kø. Køen ble også til tider avviklet for tidlig.

Figur 30: Rampekontroll med periodevis rødt lys.

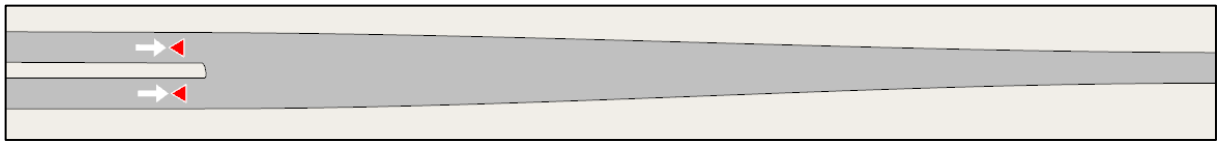
3.4.3 Konstruksjon av fiktiv modell med fiktive data

Siden modellene med data fra videoregistreringene ikke så ut til å gi noen realistiske resultater, og det er begrenset med tid til å utføre masteroppgaven, ble det valgt å gå bort fra registreringene og Aimsun-modellene knyttet til disse. Det ble i stedet bestemt at det skulle lages en fiktiv modell med fiktive data i håp om å få generert noen resultater fra denne.

Den fiktive modellen ble gjort så enkel som mulig med to separate trafikkstrømmer som møtes og går sammen til én felles trafikkstrøm. Dette er vist i Figur 31, hvor trafikkstrøm 1 og 2 møtes og går sammen til å bli trafikkstrøm 3. Figur 32 viser et utsnitt av modellen hvor flettestrekningen (krysset) kommer tydeligere frem.



Figur 31: Skisse av den fiktive modellen med to separate trafikkstrømmer som går sammen til én felles trafikkstrøm.



Figur 32: Utsnitt av skissen av den fiktive modellen og dens flettestrekning (kryss).

Med den fiktive modellen ble det valgt å kun fokusere på hvilke parametere i Aimsun som kunne påvirke fletteprosessen. Dette gjaldt parametere som:

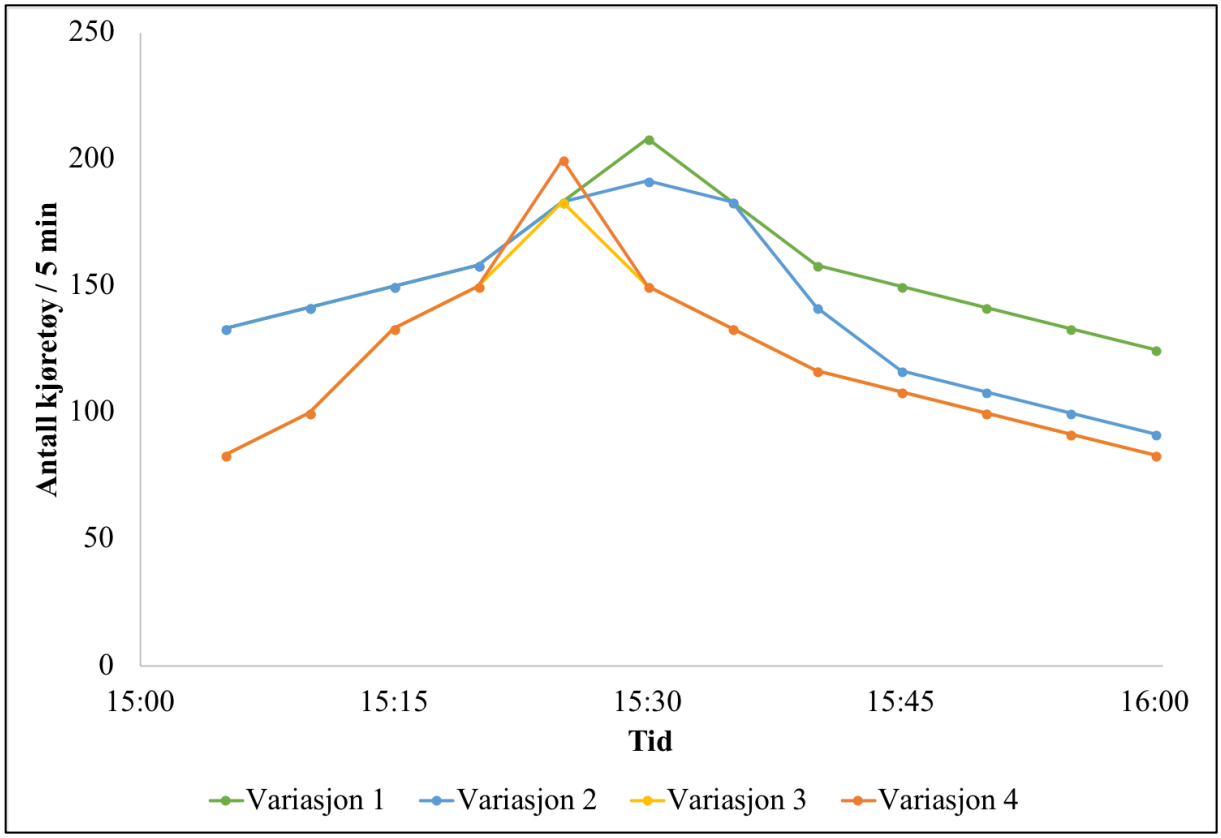
- Reaksjonstid
- Utforming
- Hastighet
- Trafikkmengde
- Aggressivitet
- Bremsing

Det ble også bestemt at kun personbiler skulle modelleres da tunge kjøretøy ville påvirket én til én flettingen grunnet sin lengde.

Videre var det, også her, ønskelig at trafikkmengden varierte over en viss tid for å få frem situasjonen med fri flyt – kø – fri flyt. Simuleringstiden ble derfor satt til å være én time med tolv intervaller à fem minutter med varierende trafikkmengde. For å velge realistiske verdier til disse intervallene, ble fire ulike variasjonskurver testet ut med varierende totalt trafikkvolum [kjt/t] og fordeling av trafikk over modelleringstimen. Dette er vist i henholdsvis Tabell 3 og Figur 33. Verdiene i Tabell 3 er beregnet som et gjennomsnitt av 30 replikasjoner for hver variasjon.

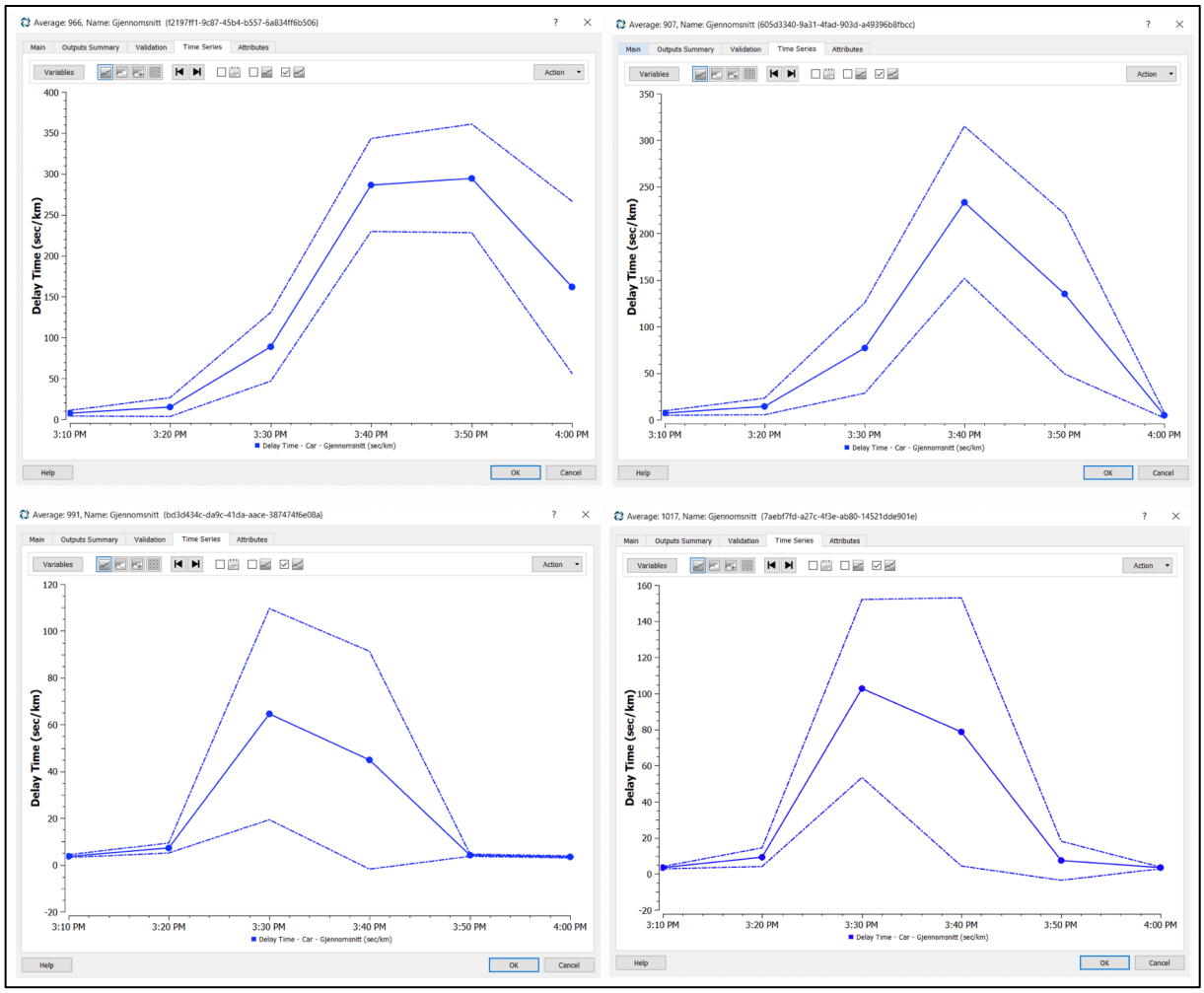
Tabell 3: Endring i gjennomsnittlig forsinkelse, maks virtuell kø og reisetid som følge av varierende trafikkmengde.

	Var. 1	**Var. 2**	**Var. 3**	**Var. 4**
Totalt trafikkvolum [kjt/t]	1854	1678	1450	1442
Gjennomsnittlig forsinkelse [sek/km]	135,72	69,48	24,76	34,86
Maks virtuell kø [kjt]	19,3	9,5	4,9	5,7
Reisetid [sek/km]	201,44	135,31	90,58	100,72



Figur 33: Variasjonskurver for fire ulike trafikkmengder.

For å velge hvilken av de fire variasjonene som skulle benyttes til videre testing, ble parameterne i Tabell 3 vurdert sammen med grafene for gjennomsnittlig forsinkelse i Figur 34. Idéen om en situasjon med fri flyt både før og etter kødannelse, utelukket variasjon 1 da man kan se av Figur 34 at det ikke er fri flyt ved slutten av simuleringstiden da forsinkelsen fortsatt er stor på dette tidspunktet. For å kunne simulere kø, var det nødvendig at variasjonen som skulle velges, faktisk genererte kø. Variasjon 3 med minst virtuell kø, var et ønskelig valg med tanke på intensjonen om å unngå kø utenfor systemet, men med en gjennomsnittlig forsinkelse på rundt 25 sek/km, ville kødannelsen sannsynligvis blitt for liten. Det samme hadde antagelig gjeldt variasjon 4 også, med en gjennomsnittlig forsinkelse på 35 sek/km. Valget falt derfor på variasjon 2 med en gjennomsnittlig forsinkelse på 70 sek/km og en maks virtuell kø på 9,5 kjt.



Figur 34: Gjennomsnittlig forsinkelse over tid for variasjon 1 (øverst til venstre), 2 (øverst til høyre), 3 (nederst til venstre) og 4 (nederst til høyre).

3.4.4 Vurdering av den fiktive modellens pålitelighet

Beregning av antall nødvendige replikasjoner

Før simuleringer av modellen kunne kjøres for å generere endelige resultater, ble det testet ut hvor mange replikasjoner som var nødvendig per scenario for å kunne vurdere signifikansen til resultatene. Dette ble først beregnet ved å bruke metoden til Buisson et al. (2014) som tar utgangspunkt i formelen:

$$R_i = \left(\frac{S_{R_0}(Y_i)t_{\alpha/2}}{d_i}\right)^2 \qquad [7]$$

Hvor R_i er det minimale antall replikasjoner som kreves for å anslå gjennomsnittet av Y_i med toleranse d_i. S_{R_0} er prøvestandardavviket for Y_i basert på R_0 replikasjoner, og $t_{\alpha/2}$ er den kritiske verdien av t-fordelingen ved signifikansnivå α.

Da det ikke er noe fasit for hva akseptert standardavvik, d_i, maks bør være, ble det videre bestemt at dette i første omgang ikke skulle overskride 5 sek/km. Et ønske om et signifikansnivå på 95 %, og $R_0 = 10$ replikasjoner (frihetsgrader), ga en kritisk t-verdi på $t_{0,025} = 1,812$ (Blakstad, 1995).

$$R_i = \left(\frac{39,59\ sek/km * 1,812}{5\ sek/km}\right)^2 = 205,8 \approx 206\ replikasjoner \qquad [8]$$

Med et prøvestandardavvik på 39,59 sek/km, ble det beregnet at 206 replikasjoner var nødvendig, vist i Formel [8]. Dette ble ansett som altfor mange replikasjoner å kjøre, og akseptert standardavvik ble derfor økt for å se hvordan det ville påvirke antallet nødvendige replikasjoner. Det nye forslaget til akseptert standardavvik ble satt til å være 15 sek/km. Dette ga at det var nødvendig med 23 replikasjoner, vist i Formel [9], som er et mer overkommelig resultat.

$$R_i = \left(\frac{39,59\ sek/km * 1,812}{15\ sek/km}\right)^2 = 22,9 \approx 23\ replikasjoner \qquad [9]$$

Formel [7] forutsetter at estimatet av standardavviket for Y_i ikke endres vesentlig etterhvert som antallet replikasjoner øker (Buisson et al., 2014). Dette viste det seg å gjøre, og beregningene av antall nødvendige replikasjoner stemte derfor ikke med det faktiske antallet nødvendige replikasjoner. Da det ble testet en simulering med 23 replikasjoner i Aimsun, ble standardavviket langt over 15 sek/km. Varierende standardavvik med økende antall replikasjoner kan man se i Tabell 4 hvor standardavviket varierer fra 33 sek/km til 47 sek/km, og ingen i nærheten av 15 sek/km som var ønskelig.

Test for å finne antall nødvendige replikasjoner

Da beregning ikke så ut til å fungere, ble antall nødvendige replikasjoner testet ut manuelt ved å kjøre tester i Aimsun. Det samme scenarioet ble testet med 10, 15, 20, 30 og 50 replikasjoner, tre ganger for hvert replikasjonssteg. Resultater fra denne testen er vist i Tabell 4.

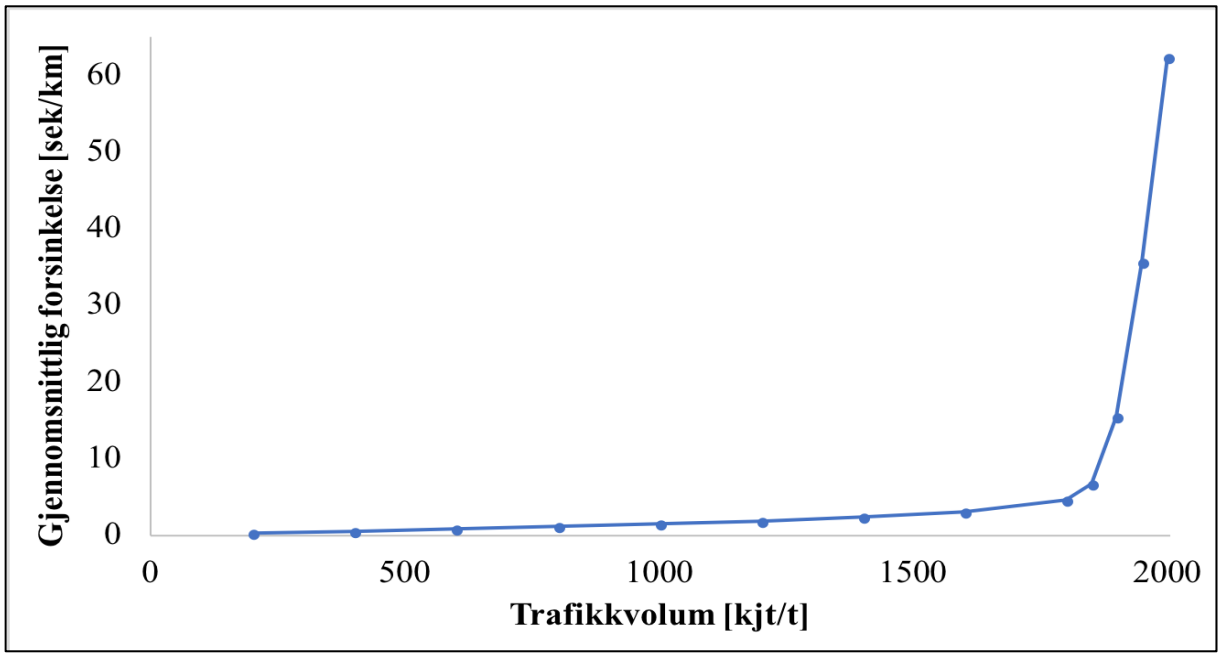
Dersom man hadde sett av denne testen at for eksempel standardavviket for 15 replikasjoner hadde vært tilnærmet likt (like lavt som) standardavviket for 50 replikasjoner, kunne man konkludert med at det holder med 15 replikasjoner, da 35 replikasjoner mer, ikke ville gitt et så mye bedre estimat.

Ved å se på standardavviket til det ulike antallet replikasjoner i Tabell 4, skulle man med fordel sett at det minket med økt antall replikasjoner. Gjennomsnittlig forsinkelse skulle også vært forholdsvis likt for alle replikasjonsstegene, da alle replikasjonene er gjennomført med det samme scenarioet. Verken minking i standardavvik eller tilnærmet stabil gjennomsnittlig forsinkelse er oppnådd i resultatene i Tabell 4. Store variasjoner i gjennomsnittlig forsinkelse for samme antall replikasjoner kan tyde på at modellen som simuleres ikke klarer å beskrive situasjonen den er satt til å beskrive godt nok. Dersom det er tilfellet, hadde det nok ikke hjulpet samme hvor mange replikasjoner man kjørte da det ikke er der den største usikkerheten ligger.

For målingene med 50 replikasjoner, varierte gjennomsnittlig forsinkelse fra 39 sek/km til 77 sek/km, en tilnærmet dobling. Dette kunne tyde på at det var altfor store variasjoner fra replikasjon til replikasjon. En nærmere sjekk på dette i replikasjonssteget med 10 replikasjoner, viste at det kun var rundt halvparten av replikasjonene som genererte kø, og dermed forsinkelse. Den resterende halvparten ga bortimot ingen forsinkelse.

Tabell 4: Resultat fra test med antall nødvendige replikasjoner.

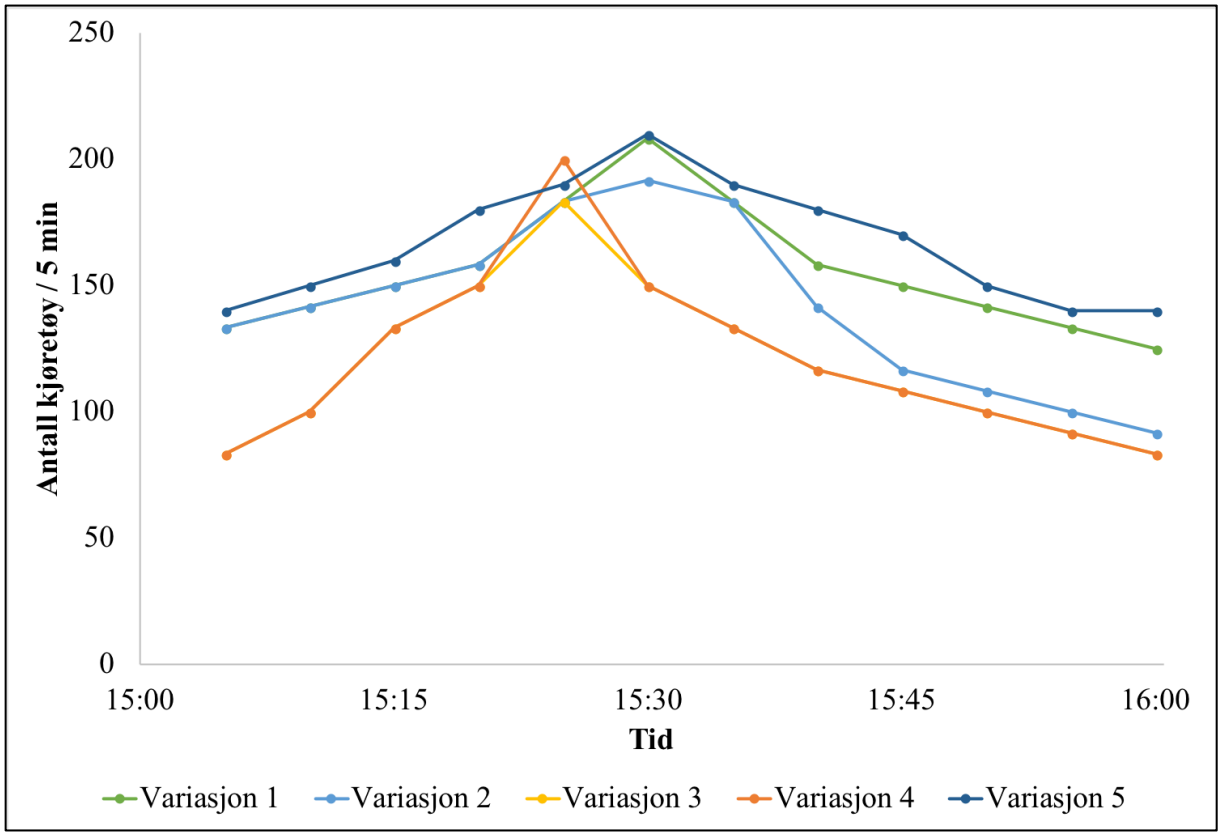
Ant. rep.	Måling	Gjennomsnittlig forsinkelse [sek/km]	Standard-avvik [sek/km]	Gjennomsnittlig forsinkelse à tre målinger [sek/km]	Gjennomsnittlig standardavvik à tre målinger [sek/km]
10	1	51,87	39,59	53,16	43,57
	2	53,12	43,88		
	3	54,48	47,24		
15	1	38,73	34,01	40,84	35,25
	2	49,34	38,80		
	3	34,46	32,94		
20	1	65,65	41,07	55,28	36,70
	2	48,22	36,05		
	3	51,96	32,98		
30	1	50,17	36,92	47,21	36,53
	2	41,65	33,95		
	3	49,81	38,72		
50	1	76,89	33,35	60,36	35,63
	2	38,59	36,20		
	3	65,61	37,33		



Figur 35: Gradvis økning av trafikkmengde for å se når sammenbrudd skjer.

Når inntreffer sammenbrudd?

For å løse problemet med store variasjoner fra replikasjon til replikasjon, ble det valgt å prøve ut om en økning i trafikkmengde kanskje ville sikre mer jevne resultater da det i teorien skal generere mer kø. Resultatet av gradvis økning i trafikkmengde fra 200 kjt/t til 2000 kjt/t er vist i Figur 35, hvor man kan se at gjennomsnittlig forsinkelse øker eksponentielt fra 1800 kjt/t til 2000 kjt/t. Ved 2000 kjt/t ble gjennomsnittlig forsinkelse cirka 60 sek/km sammenlignet med rundt 5 sek/km for 1800 kjt/t. Denne testen ble gjennomført med stegvis lik trafikkmengde og en simuleringstid på én time for hvert steg.



Figur 36: Variasjonskurver for fem ulike trafikkmengder.

Økning i trafikkmengde til 2000 kjt/t

Ettersom gjennomsnittlig forsinkelse økte betraktelig ved 2000 kjt/t, ble det laget en ny variasjonskurve med 2000 kjt/t som utgangspunkt for total trafikkmengde. Denne, sammenlignet med variasjonskurvene som er testet tidligere, er vist i Figur 36. En økning i trafikkmengde så ut til å minke standardavvikene noe, og variasjon 5 med 2000 kjt/t ble derfor benyttet til videre simulering i Aimsun.

3.4.5 Simuleringer med fiktiv modell

Med en variasjonskurve for trafikkmengde å ta utgangspunkt i, ble det gjennomført ulike simuleringer av scenarioer med den fiktive modellen. Da antall nødvendige replikasjoner ikke så ut til å kunne bli bestemt ut ifra tester, ble det valgt å gjennomføre 50 replikasjoner per variasjon for å sikre en viss statistisk gyldighet i resultatene.

Det var ønskelig å teste ut hvordan en endring av forskjellige parametere påvirket fletteprosessen. Dette ble, for enkelhetsskyld, vurdert ut ifra gjennomsnittlig forsinkelse gjennom nettverket, samt hvordan kjøretøyene bevegde seg i forhold til hverandre – i hvilken grad det ble flettet én til én. Kjøretøyenes bevegelse ble kun vurdert ut ifra stikkprøver, og ikke ved å se på alle replikasjonene i hvert scenario. Parameterne som ble variert og simulert står beskrevet i Tabell 5. Enkelte variasjoner er understreket. Disse er benyttet som standardverdier når ikke annet er spesifisert, og danner scenarioet som heretter blir kalt standardscenarioet.

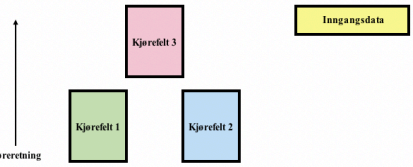
Tabell 5: Parametere som ble variert og simulert, understreket variasjon er benyttet som standard utgangspunkt når ikke annet er spesifisert.

Parameter	**Variasjon**
Reaksjonstid	0,8 sek 1,2 sek
Skiltutforming	Vikepliktskilt på begge trafikkstrømmer Ikke vikepliktskilt på noen trafikkstrømmer Vikepliktskilt på kun én trafikkstrøm
Samarbeid	Uten samarbeidsmodell aktivert Med samarbeidsmodell aktivert
Trafikkmengde og hastighet	Lik trafikkmengde og hastighet (1000 kjt/t per kjørefelt og 80 km/t) Ulik trafikkmengde (500 kjt/t og 1500 kjt/t) Ulik hastighet (80 km/t og 50 km/t) Ulik trafikkmengde og hastighet (500 kjt/t, 80 km/t og 1500 kjt/t, 50 km/t)
Bremsing	Normal Høy Ekstrem
Aggressivitet	0 % 50 % 100 %

3.5 Flettemodell i Microsoft Excel

Selv med den fiktive modellen, så det ikke ut til at Aimsun fungerte optimalt. Mer om dette i kapittel 5 Diskusjon. Av den grunn ble det laget en flettemodell i Microsoft Excel for å forhåpentligvis få et bedre grunnlag for å kunne besvare forskningsspørsmålene. Ønsket med flettemodellen var å kunne gi et innblikk i hvordan kapasitet, sammenbrudd, kø og forsinkelse henger sammen og påvirker hverandre. Modellen ble utarbeidet i samarbeid med veileder. En illustrasjon av hvordan flettemodellen ser ut er vist i Figur 37. Det som står i de grå rutene er i gjentatt i Tabell 6 som viser inngangsparameterne og Tabell 7 som viser hvilke parametere som er med i flettemodellen, samt hvordan verdiene deres blir beregnet.

	Kapasitet før sammenbrudd	C	gitt	kjt/t	1500	kjt / 10 min	250									
	Kapasitetsfall		gitt	%	10	%	10									
	Kapasitet etter sammenbrudd	C'		kjt/t	1350	kjt / 10 min	225									
	Gjennomsnittlig tidsluke før sammenbrudd	h	3600/C	sek	2,40											
	Gjennomsnittlig tidsluke etter sammenbrudd	h'	3600/C'	sek	2,67											
	Hastighet før sammenbrudd	u	gitt	km/t	60											
	Hastighet etter sammenbrudd	u'	gitt	km/t	40											
	Startkø	Q	gitt	kjt	0											
	Starttidspunkt		gitt	tt:mm	14:50	kjt (10 min)										
	Periodelengde	T	gitt	minutter	10	kjt / 10 min										
	Periode				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Periodestart				14:50	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	16:10	16:20	16:30	16:40	16:50
	Periodeslutt				15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	16:10	16:20	16:30	16:40	16:50	17:00
	Sammenbrudd?				Nei	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei
	Total etterspørsel			kjt / 10 min	166,7	200,0	262,5	304,2	362,5	412,5	429,2	420,8	387,5	329,2	254,2	162,5	133,3
	Kapasitet			kjt / 10 min	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0
Sammenflettet kjørefelt Kjørefelt 3	Avviklet trafikk			kjt / 10 min	166,7	195,8	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	162,5	133,3
	Volum	q3	q*60/T	kjt / t	1000	1175	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	975	800
	Hastighet	u3	gitt	km / t	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Tetthet	k3	q/u	kjt / km	25,0	29,4	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	24,4	20,0
	Gjennomsnittlig tidsluke	h3	3600/q	sek	3,60	3,06	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	3,69	4,50
	Gjennomsnittlig avstandsluke	s3	1000/k	m	40,0	34,0	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	41,0	50,0
	Total forsinkelse			kjt - sek	685000	kjt - min	11417	kjt - timer	190,3								
	Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy			sek	255	min	4,25	timer	0,07								
Venstre kjørefelt Kjørefelt 1	Volum	q1	gitt	kjt / t	600	700	750	750	800	850	750	700	600	500	450	400	400
	Etterspørsel		q/60*T	kjt / 10 min	100,0	116,7	125,0	125,0	133,3	141,7	125,0	116,7	100,0	83,3	75,0	66,7	66,7
	Justert etterspørsel			kjt / 10 min	100,0	116,7	129,2	141,7	162,5	191,7	204,2	208,3	195,8	166,7	129,2	83,3	66,7
	Faktisk avviklet trafikk			kjt / 10 min	100,0	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	83,3	66,7
	Faktisk volum	q1'		kjt / t	600	675	675	675	675	675	675	675	675	675	675	500	400
	Hastighet	u1	gitt	km / t	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Tetthet	k1	q'/u	kjt / km	15,0	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	12,5	10,0
	Gjennomsnittlig tidsluke	h1	3600/q'	sek	6,00	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	7,20	9,00
	Gjennomsnittlig avstandsluke	s1	1000/k	m	66,7	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	80,0	100,0
	Start kø	Q1		kjt (10 min)	0,0	0,0	4,2	16,7	29,2	50,0	79,2	91,7	95,8	83,3	54,2	16,7	0,0
	Endring i kø	ΔQ1		kjt (10 min)	0,0	4,2	12,5	12,5	20,8	29,2	12,5	4,2	-12,5	-29,2	-37,5	-16,7	0,0
	Slutt kø	Q1'		kjt (10 min)	0,0	4,2	16,7	29,2	50,0	79,2	91,7	95,8	83,3	54,2	16,7	0,0	0,0
	Forsinkelse			kjt - sek		1250	6250	13750	23750	38750	51250	56250	53750	41250	21250	5000	0
	Forsinkelse pr kjøretøy			sek		12	56	122	211	344	456	500	478	367	189	51	0
	Total forsinkelse			kjt - sek	312500	kjt - min	5208	kjt - timer	86,8								
	Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy			sek	227	min	3,79	timer	0,06								
Høyre kjørefelt Kjørefelt 2	Volum	q2	gitt	kjt / t	400	500	800	850	900	800	700	600	550	500	450	400	400
	Etterspørsel		q/60*T	kjt / 10 min	66,7	83,3	133,3	141,7	150,0	133,3	116,7	100,0	91,7	83,3	75,0	66,7	66,7
	Justert etterspørsel			kjt / 10 min	66,7	83,3	133,3	162,5	200,0	220,8	225,0	212,5	191,7	162,5	125,0	79,2	66,7
	Faktisk avviklet trafikk			kjt / 10 min	66,7	83,3	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	79,2	66,7
	Fakttisk volum	q2'		kjt / t	400	500	675	675	675	675	675	675	675	675	675	475	400
	Hastighet	u2	gitt	km / t	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Tetthet	k2	q'/u	kjt / km	10,0	12,5	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	11,9	10,0
	Gjennomsnittlig tidsluke	h2	3600/q'	sek	9,0	7,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	7,6	9,0
	Gjennomsnittlig avstandsluke	s2	1000/k	m	100,0	80,0	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	84,2	100,0
	Start kø	Q2		kjt (10 min)	0,0	0,0	0,0	20,8	50,0	87,5	108,3	112,5	100,0	79,2	50,0	12,5	0,0
	Endring i kø	ΔQ2		kjt (10 min)	0,0	0,0	20,8	29,2	37,5	20,8	4,2	-12,5	-20,8	-29,2	-37,5	-12,5	0,0
	Slutt kø	Q2'		kjt (10 min)	0,0	0,0	20,8	50,0	87,5	108,3	112,5	100,0	79,2	50,0	12,5	0,0	0,0
	Forsinkelse			kjt - sek		0	6250	21250	41250	58750	66250	63750	53750	38750	18750	3750	0
	Forsinkelse pr kjøretøy			sek		0	64	189	367	522	589	567	478	344	167	39	0
	Total forsinkelse			kjt - sek	372500	kjt - min	6208	kjt - timer	103,5								
	Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy			sek	285	min	4,75	timer	0,08								



Figur 37: Illustrasjon av hvordan flettemodellen i Microsoft Excel ser ut.

Tabell 6: Inngangsparametere i flettemodell.

Parameter	**Navn**
Kapasitet før sammenbrudd	C
Kapasitetsfall	ΔC
Kapasitet etter sammenbrudd (C * (100 - ΔC)/100)	C’
Hastighet før sammenbrudd	u
Hastighet etter sammenbrudd	u’
Startkø	Q
Starttidspunkt	t_{start}
Periodelengde	T

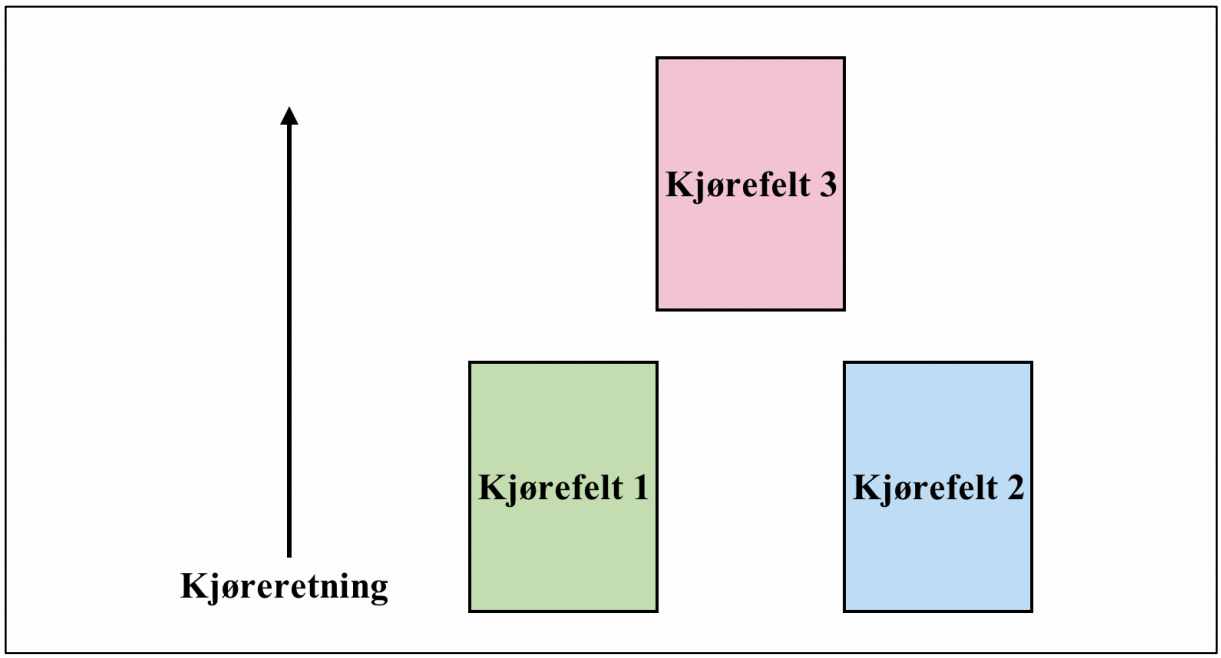
Tabell 7: Innhold i flettemodell.

Parameter	**Navn**	**Formel**
Kjørefelt 1 og 2		
Volum	q(i)	Gitt
Etterspørsel	q(i, T)	q(i)/60*T
Justert etterspørsel	q_{jus}(i)	q(i, T) + Q(i)
Faktisk avviklet trafikk	q_{avv}(i)	Før sammenbrudd: min(q_{jus}(i); C/2) Ved sammenbrudd: min(q_{jus}(i); C’/2)
Faktisk volum	q’(i, T)	q_{avv}(i)*60/T
Hastighet	u(i)	Før sammenbrudd: u Ved sammenbrudd: u’
Tetthet	k(i)	q’(i, T)/u(i)
Gjennomsnittlig tidsluke	h(i)	3600/q’(i, T)
Gjennomsnittlig avstandsluke	s(i)	1000/k(i)
Start kø	Q(i)	Q’(i – 1)
Endring i kø	ΔQ(i)	q(i, T) – q_{avv}(i)
Slutt kø	Q’(i)	størst(0; Q(i) + ΔQ(i)
Forsinkelse	D(i, T)	(Q’(i – 1) + Q’(i))/2*T*60
Forsinkelse per kjøretøy	d(i)	D(i, T)/((q_{avv}(i – 1) + q_{avv}(i))/2)

Total forsinkelse	D_{tot}	summer(D(i, T) fra i = 1 til i = n – 1
Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy	$\bar{d}$	D_{tot}/summer(q_{avv}(i)) fra i = 1 til i = n
Kjørefelt 3		
Avviklet trafikk	$q_{avv,3}(i)$	$q_{avv,1} + q_{avv,2}$
Volum	$q_3(i, T)$	$q_{avv,3}(i)*60/T$
Hastighet	$u_3(i)$	Før sammenbrudd: u Ved sammenbrudd: u'
Tetthet	$k_3(i)$	$q_3(i, T)/u_3(i)$
Gjennomsnittlig tidsluke	$h_3(i)$	$3600/q_3(i, T)$
Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy	$s_3(i)$	$1000/k_3(i)$
Total forsinkelse	$D_{tot,3}$	$D_{tot,1} + D_{tot,2}$
Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy	$\bar{d}_3$	$D_{tot,3}$/summer($q_{avv,3}$(i)) fra i = 1 til i = n

Flettemodellen baseres på det samme som den fiktive modellen i Aimsun; to trafikkstrømmer som går sammen til én sammenflettet trafikkstrøm. Dette er vist i Figur 38 hvor kjørefelt 1 og 2 flettes sammen til kjørefelt 3.

I modellen kan man legge inn trafikkmengde for kjørefelt 1 og 2 for hvert intervall, kapasitet før sammenbrudd og kapasitetsfall, samt starttidspunkt og periodelengde. Det er også mulig å legge inn hastighet før og etter sammenbrudd.



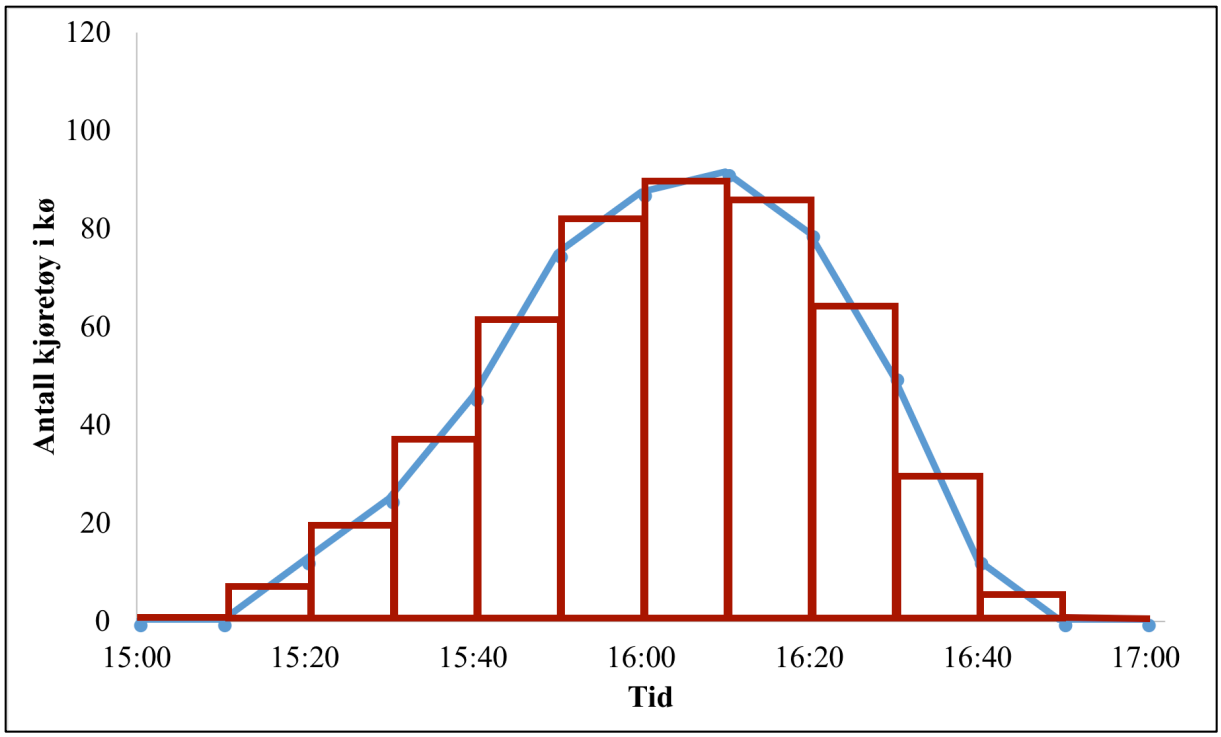
Figur 38: Utgangspunkt for flettemodell i Microsoft Excel.

Videre beregnes blant annet justert etterspørsel, faktisk avviklet trafikk og endring i kø. Justert etterspørsel er etterspørselen til intervallet pluss kjøretøy i kø som er igjen fra forrige intervall. Faktisk avviklet trafikk er den laveste verdien av justert etterspørsel og kapasitet delt på to (to kjørefelt), mens endring i kø er etterspørsel minus faktisk avviklet trafikk.

Forsinkelse kan beregnes som arealet under kurven av kjøretøy i kø. Da Microsoft Excel ikke har en funksjon for beregning av areal på denne måten, beregnes forsinkelse som arealet av rektangler ved å ta gjennomsnittet av antall kjøretøy i kø i to intervaller og gange med lengden av intervallet. Dette er illustrert i Figur 39. Dette gir ikke helt riktig forsinkelse, men er et godt estimat. Gjennomsnittlig forsinkelse beregnes ved å dele total forsinkelse på summen av faktisk avviklet trafikk.

I flettemodellen er det lagt inn et kapasitetsfall. Det vil si at når etterspørsel overskrider kapasiteten til vegstrekningen, så vil kapasitetsnivået falle. I modellen er det lagt inn at intervallet må starte med null kjøretøy i kø for at kapasitetsnivået skal gå opp igjen etter et fall. Det er dermed tatt høyde for at selv om et intervall slutter med null kjøretøy i kø, så tar det litt tid før kapasiteten er tilbake på topp.

Flettemodellen ligger vedlagt som elektronisk vedlegg i zip-fil.



Figur 39: Forsinkelse beregnet som rektangler under kurve.

3.6 Utfordringer

Kameraplassering

Da filmene fra støygjerde mot Klett ble gjennomgått, ble det fort oppdaget at man hadde for dårlig sikt til selve fletteprosessen, og det ble vanskelig å registrere riktig antall kjøretøy da alt ble en uklar masse av kjøretøy. Dette gjorde at registreringene i denne retningen måtte gjennomføres to ganger for å minke feilmarginen, noe som førte til dobbelt så mye arbeid. I ettertid har man innsett at dette kameraet burde blitt plassert nærmere selve fletteprosessen for å få bedre oversikt.

Kameraplasseringene skapte også problemer med inndataene til modellen i Aimsun. Kameraene sto plassert slik at det var avviklet trafikk som ble registrert, mens inndata i Aimsun er etterspurt trafikkmengde, ikke avviklet. For å få så realistiske data som mulig, burde derfor kameraene stått et stykke før flaskehalsen, ikke i området hvor den var.

Datainnhenting/benyttelse av innhentet data

Å hente ut nødvendig informasjon fra videoregistreringene tok lang tid da mye først ble gjort manuelt med penn og papir. Dette førte til at videoene stadig måtte settes på pause for å sørge

for at alle kjøretøyene ble registrert. Selv med hjelpende teknologi som Python, var dette svært tidkrevende selv om registreringsperioden kun var på tre og en halv time.

Det at kjøretøyene ble filmet der de ble avviklet, og ikke der de ble matet inn i systemet, gjorde det også utfordrende og tidkrevende å lage realistiske OD-matriser som kunne skape den køen man var ute etter i Aimsun. Det at det på grunn av dette måtte lages variasjonskurver til OD-matrisene, gjorde at mye tid gikk med til prøving og feiling for å finne de riktige variasjonene i forhold til maksimal kølengde som var eneste delvis kjente parameter å gå ut ifra. Å legge inn og endre et stort antall matriser i Aimsun tok også tid.

Teknologi

I starten av masterperioden viste det seg at det å få lisens til Windows, som var nødvendig for å laste ned Aimsun, var vanskelig. Det var ønskelig med Aimsun på egen PC da det ofte kan være mange folk på datasal. Etter mye om og men, endte det opp med en låne-PC fra instituttet. Nedlastning av Python skapte også problemer som gjorde at det tok tid før programmet fungerte som det skulle, og kunne brukes til videoregistreringene.

Mye tid har også gått med til å lære seg programmer, da spesielt Aimsun, men også Python og Microsoft Excel bedre. Mot slutten av vårsemesteret krasjet PCen og måtte på reparasjon. Heldigvis ble ingenting mistet, men det førte til forsinkelser grunnet mangel på PC.

Aimsun

At Aimsun ikke så ut til å fungere optimalt, førte til at mye tid gikk med til uttesting av modeller, laging av nye modeller og vurderinger av hvorfor ting ikke fungerte. At innsamlingen og behandlingen av data endte opp med å ikke bli benyttet da en måtte gå over til en fiktiv modell med fiktive data, var frustrerende da mye arbeid virket bortkastet og usynlig.

Microsoft Excel

Mangel på resultater fra modellene i Aimsun, var et uforutsett problem som skapte noen utfordringer da det er ønskelig å ha noen resultater i en masteroppgave, og ikke bare en diskusjon rundt mangel på resultater. For å forhåpentligvis generere noen resultater, ble det derfor brukt tid på å utarbeide en flettemodell i Microsoft Excel. Dette var ikke en del av masteroppgavens utgangspunkt, noe som har ført til enda mer arbeid.

Kapittel 4

Resultater

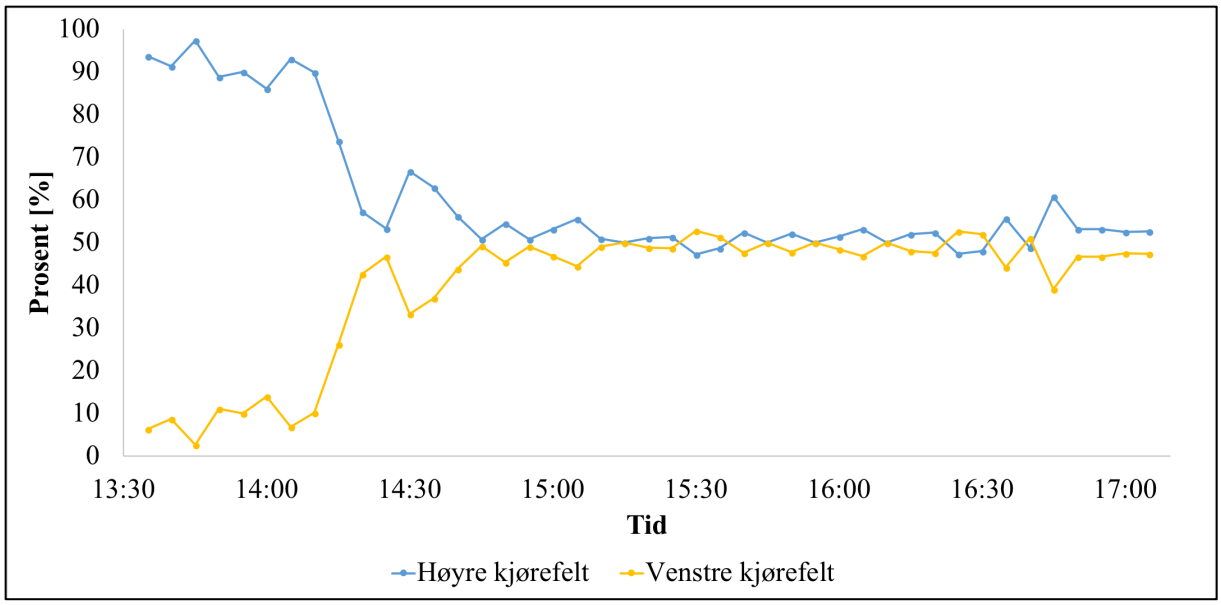
Dette kapittelet omfatter resultatene fra data hentet fra videoregistreringene, simuleringene utført med den fiktive modellen og tester gjort med flettemodellen i Microsoft Excel. Aimsun-modellene laget ut ifra data fra videoregistreringene ga ingen resultater, og er derfor ikke presentert i dette kapittelet.

Alle registreringer fra videoopptakene og data fra kjøringene gjennomført i løpet av registreringsperioden ligger vedlagt som elektronisk vedlegg i zip-fil.

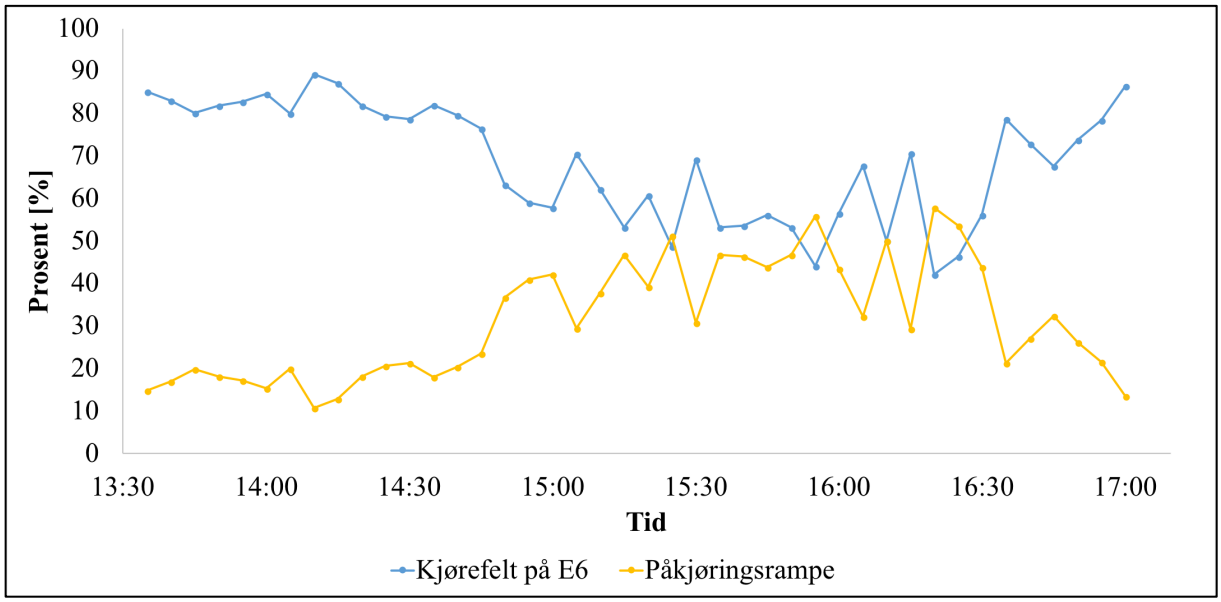
4.1 Videoregistreringer

Figur 40 og Figur 41 viser hvordan bruken av kjørefelt varierer i løpet av registreringsperioden. Dette er registreringer fra der hvor de ulike kjørefeltene fletter sammen. I starten kan man i Figur 40 se at nesten alle benytter det høyre kjørefeltet. Etterhvert som klokken nærmer seg halv tre, er det flere og flere som benytter venstrefeltet også. Fra rundt kvart på tre og utover er fordelingen mellom høyre og venstre kjørefelt noenlunde lik.

Litt av den samme tendensen kan man se i Figur 41 hvor man ser at største andelen av trafikk i starten kjører på E6, mens det etterhvert er flere og flere som flettes inn fra påkjøringsrampen. Fra rundt klokken tre til nærmere halv fem, kan man også her se at fordelingen av bruk av kjørefelt samler seg rundt 50 %, men med noe større avvik. Mot slutten av registreringsperioden kan man se at andelen trafikk på E6 øker, mens andelen fra påkjøringsrampen minker igjen.

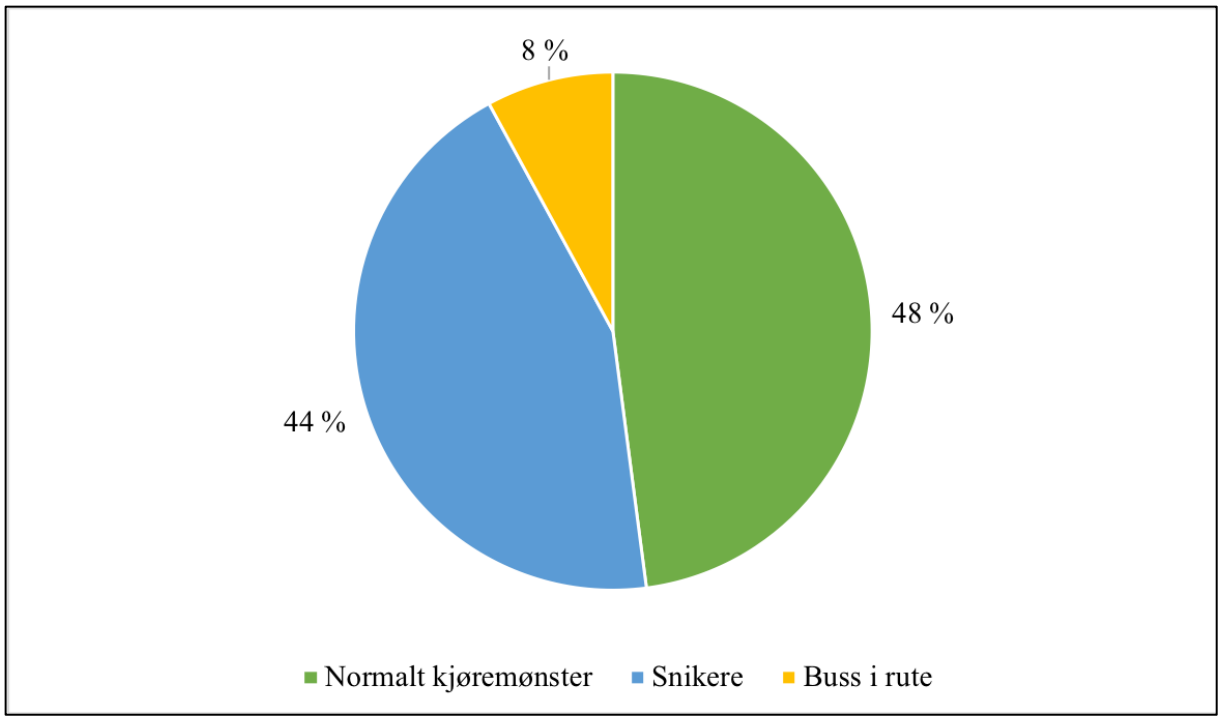


Figur 40: Fordeling av bruk av kjørefelt mellom høyre og venstre kjørefelt på E6.



Figur 41: Fordeling av bruk av kjørefelt mellom kjørefelt på E6 og påkjøringsrampe.

Figur 42 viser resultatet fra den manuelle tellingen av andel snikere. Snikere er i dette tilfellet de som kjører av E6 før broen over Kv. 6549, via rundkjøringen ved City Syd, for å så benytte påkjøringsrampen til å komme seg på E6 igjen. Av figuren kan man se at det, i løpet av den timen som ble registrert, var rundt 45 % som benyttet seg av denne muligheten utenom bussene i rute som var tvunget til det for å kunne betjene holdeplassen på avkjøringsrampen.

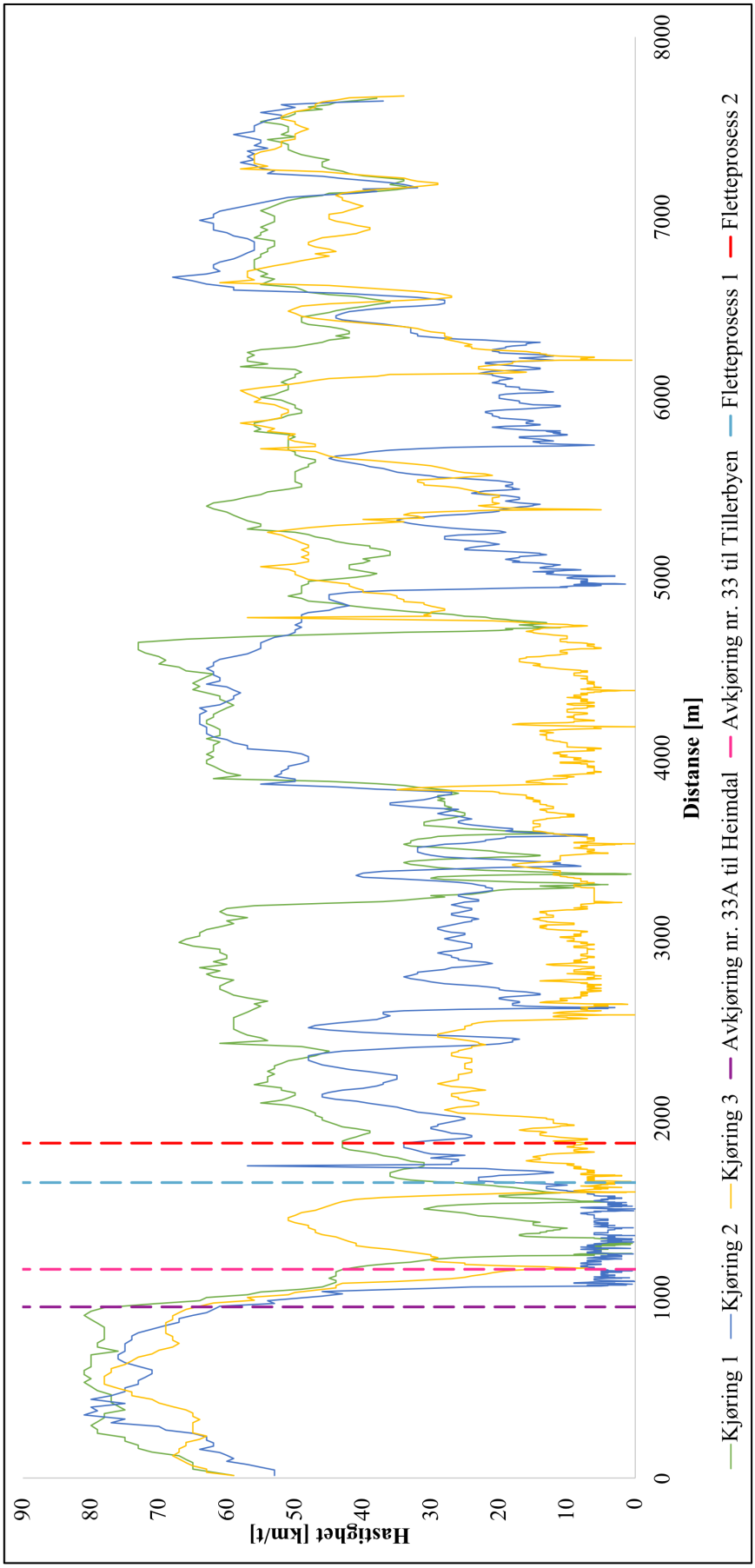


Figur 42: Andel førere (snikere) som kjører av E6, via rundkjøringen og på E6 igjen.

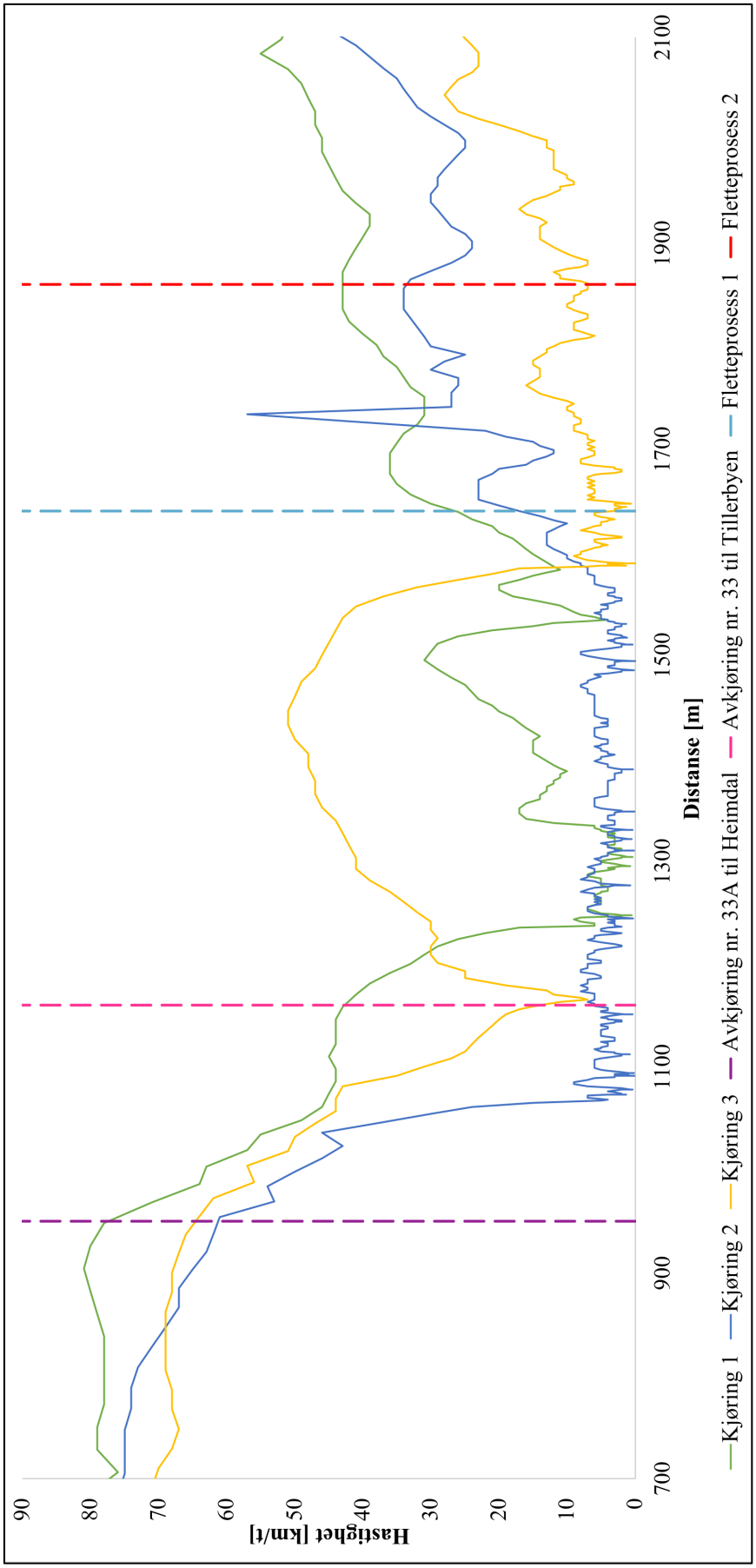
Hastighetsprofilene fra de tre kjøringene fra Tonstadkrysset til rundkjøringen på Klett, gjennomført samtidig som videoregistreringene, er vist i Figur 43. Et utsnitt av hastighets-profilene som blant annet omfatter registreringsområdet er vist i Figur 44. Viktige referansepunkter er markert med stiplede linjer. Dette gjelder avkjøringene til henholdsvis Heimdal og Tillerbyen (ned til rundkjøringen ved City Syd), samt starten på begge fletteprosessene.

I Figur 43 og Figur 44 kan man se at man på alle tre kjøreturene holdt en relativt høy hastighet frem til avkjøringen til Heimdal. Av dette kan man anslå at køen aldri strakk seg forbi dette punktet. På den tredje kjøreturen var køen minst like lang som ved kjøring 2, og snarvegen nedenom rundkjøringen ved City Syd ble testet ut. Dette kan man se i Figur 44 at hadde stor innvirkning på hastighetsprofilet. Der hvor kjøring 2 har lav hastighet fra før avkjøringen til Tillerbyen helt frem til fletteprosess 1 starter, har kjøring 3 en hastighet på opp mot 50 km/t takket være snikemuligheten.

Figur 43 og Figur 44 viser også problemet med at det ikke var fri flyt etter fletteprosess 2. Store variasjoner i hastighetsprofilene tyder på køproblemer videre mot Klett, noe som også ble bekreftet av føreren som gjennomførte kjøringene.



Figur 43: Hastighetsprofiler fra de tre kjøreturene gjennomført på registreringsdagen.



Figur 44: Utsnitt av hastighetsprofiler fra de tre kjøreturene gjennomført på registreringsdagen.

Tabell 8: Sammendrag av de tre kjøringen gjennomført i løpet av registreringsperioden.

Kjøring	**Start [tt:mm:ss]**	**Slutt [tt:mm:ss]**	**Varighet [mm:ss]**	**Distanse [m]**	**Gjennomsnittlig hastighet [km/t]**
Kjøring 1	14:25:32	14:37:45	12:13	7659	37,6
Kjøring 2	14:47:54	15:11:43	23:49	7661	19,3
Kjøring 3	16:02:19	16:29:53	27:34	7673	16,7

Tabell 8 viser et sammendrag av de tre kjøringene med start- og sluttidspunkt, varighet, distanse og gjennomsnittlig hastighet. Strekningen er på rundt 7,66 km og har en fartsgrense som varierer mellom 50 og 70 km/t. For å gi et sammenligningsgrunnlag er normal kjøretid estimert ut ifra en antagelse om fartsgrense 50 km/t hele strekning. Dette er vist i Formel [10].

$$Normal\ kjøretid = \frac{7{,}66\ km}{50\ km/t} = 0{,}15\ t = 9{,}0\ min \qquad [10]$$

Ved fri flyt-situasjoner skulle dermed denne strekningen ikke ta mer enn rundt ni minutter å kjøre (egentlig noe raskere da det som nevnt er 70 km/t på store deler av strekningen). Av dette kan man se at det var forsinkelser på alle tre kjøringene. Selv på kjøring 3 som sparte tid grunnet bruk av snarvegen nedenom rundkjøringen, var tidsbruken rundt tre ganger så stor som den ville vært uten forsinkelse.

$$Snarveg = \frac{0{,}4\ km}{40\ km/t} = 0{,}01\ t = 0{,}6\ min \qquad [11]$$

$$E6 = \frac{0{,}4\ km}{2{,}5\ kmt} = 0{,}16\ t = 9{,}6\ min \qquad [12]$$

$$Tid\ spart = 9{,}6\ min - 0{,}6\ min = 9{,}0\ min \qquad [13]$$

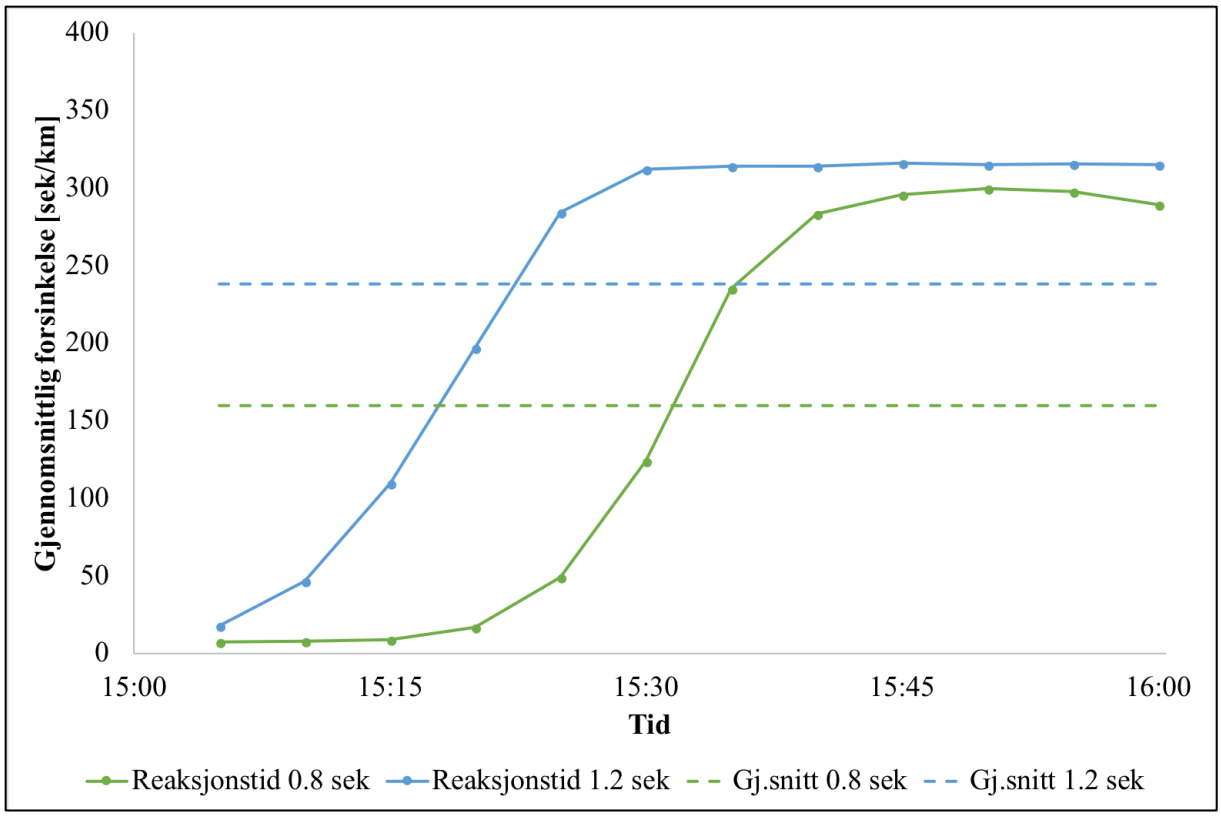
Et estimat av hvor mye tid man sparte på å kjøre snarvegen i kjøring 3 er beregnet i Formel [13] ut ifra Formel [11] og Formel [12]. En strekning på 400 meter og gjennomsnittshastigheter på 40 km/t og 2,5 km/t for henholdsvis snarvegen og E6 er kun gjettede antagelser ut ifra data fra hastighetsprofilene i Figur 44. Ved å kjøre av og på E6 via rundkjøringen sparte man altså en estimert verdi på ni minutter, noe som tilsvarer tiden hele strekningen fra Tonstadkrysset til Klett egentlig skal ta å kjøre.

4.2 Fiktiv modell i Aimsun

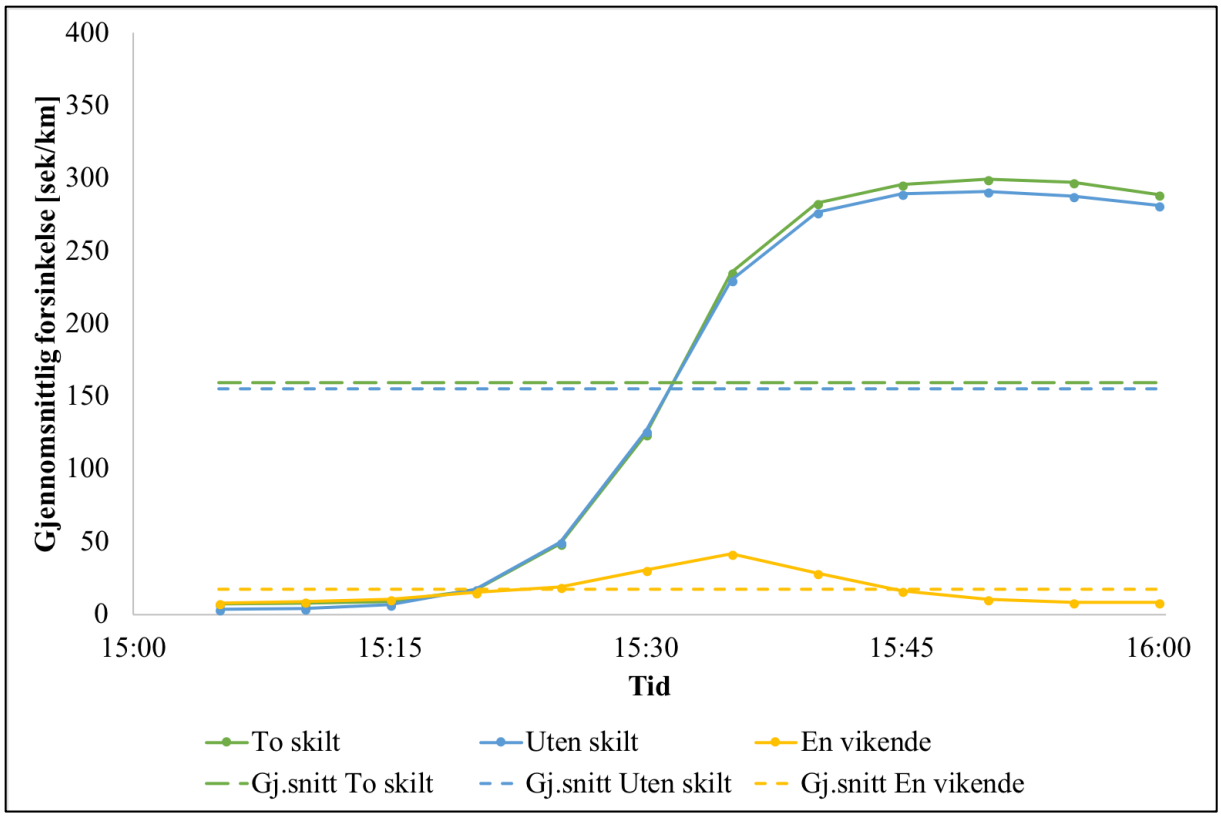
Den fiktive modellen fikk et standardutgangspunkt som nevnt i Tabell 5. Dette innebar at den tok utgangspunkt i variablene listet opp under dersom ikke annet var spesifisert:

- Reaksjonstid: 0,8 sek
- Vikepliktskilt på begge trafikkstrømmer
- Lik trafikkmengde: 1000 kjt/t
- Lik hastighet: 80 km/t
- Uten samarbeidsmodell aktivert
- Bremsing: normal
- Aggressivitet: 0 %

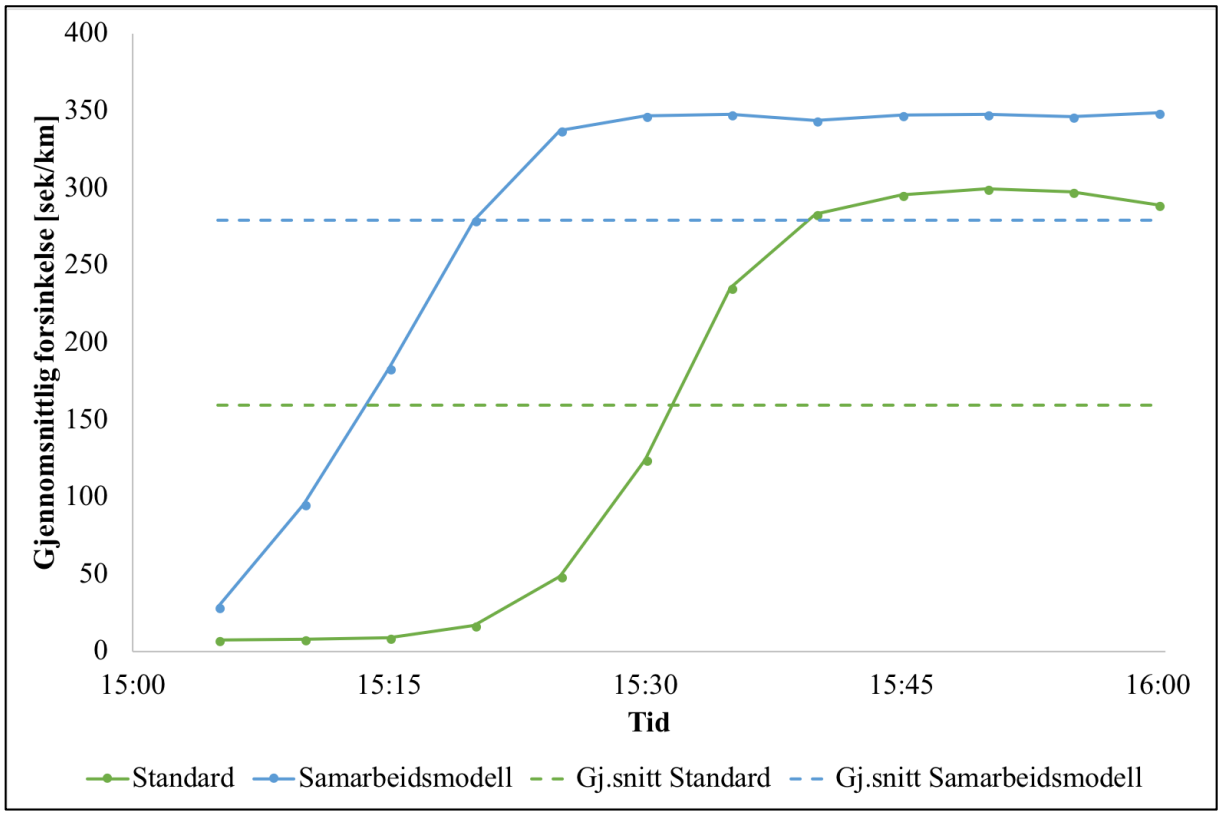
Figur 45 viser gjennomsnittlig forsinkelse ved reaksjonstidene 0,8 sekunder og 1,2 sekunder. Av figuren kan man se at gjennomsnittlig forsinkelse øker når reaksjonstiden øker fra 0,8 til 1,2 sekunder.



Figur 45: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende reaksjonstid.



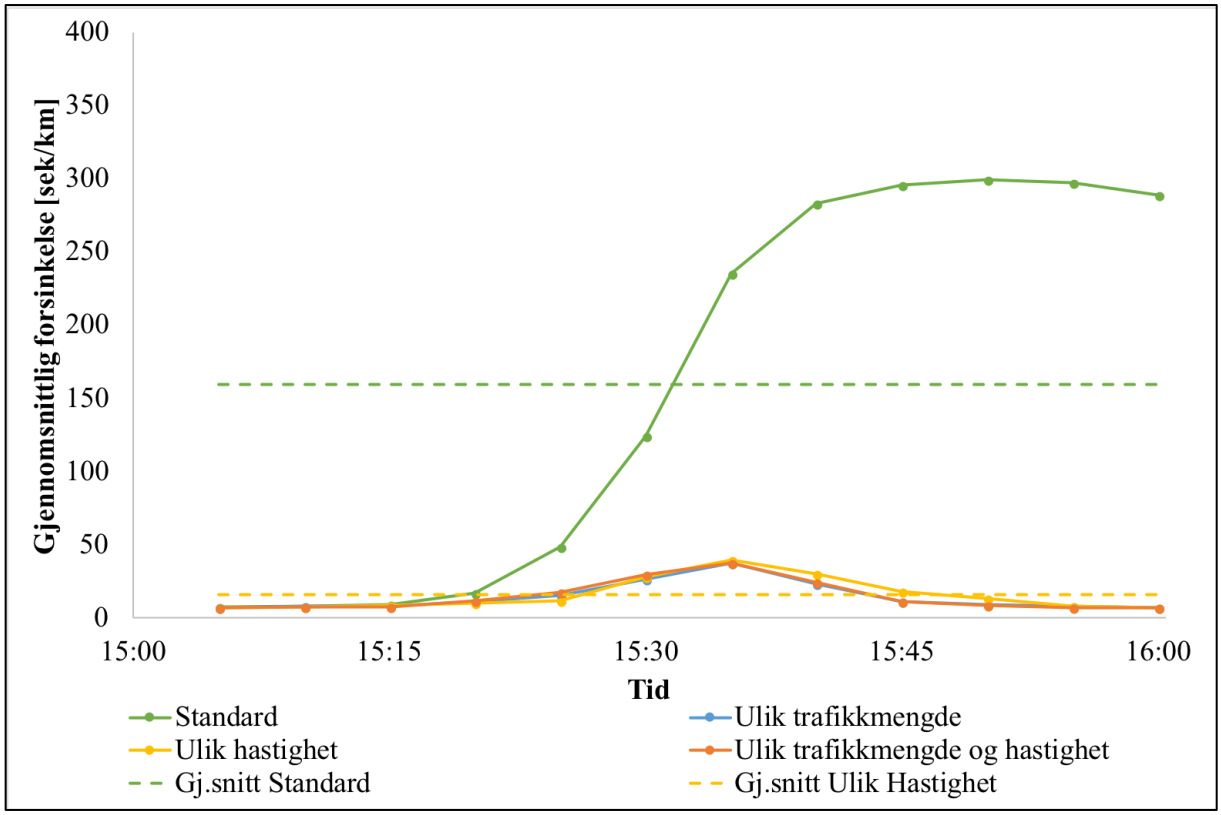
Figur 46: Gjennomsnittlig forsinkelse med ulike skiltutforminger.



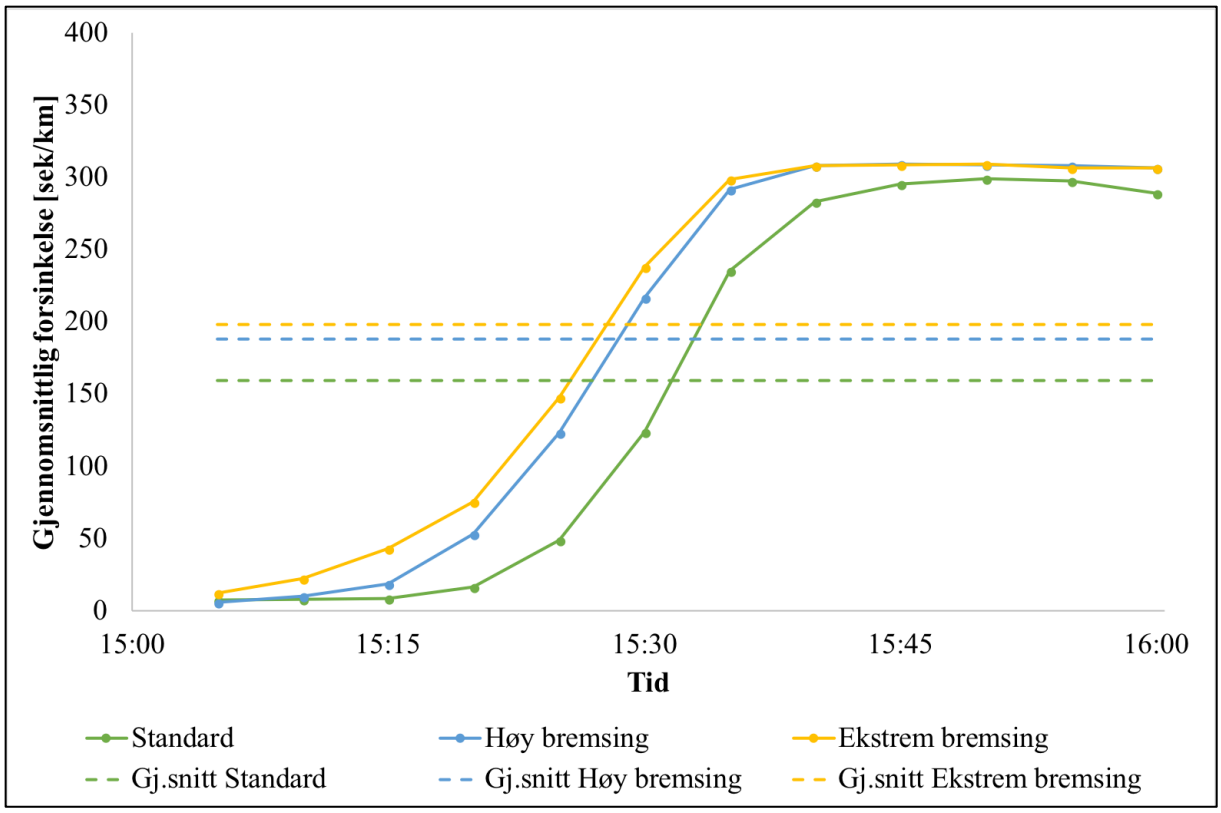
Figur 47: Gjennomsnittlig forsinkelse med og uten samarbeidsmodell aktivert.

Figur 46 viser hvordan gjennomsnittlig forsinkelse varierer med ulike skiltutforminger. Om strekningen er utformet med vikepliktskilt på begge trafikkstrømmene, eller ikke har skilt i det hele tatt, gir tilnærmet null utslag på forsinkelsen. Én med forkjørsrett og én med vikeplikt gir derimot stor forbedring på den gjennomsnittlige totale forsinkelsen for systemet.

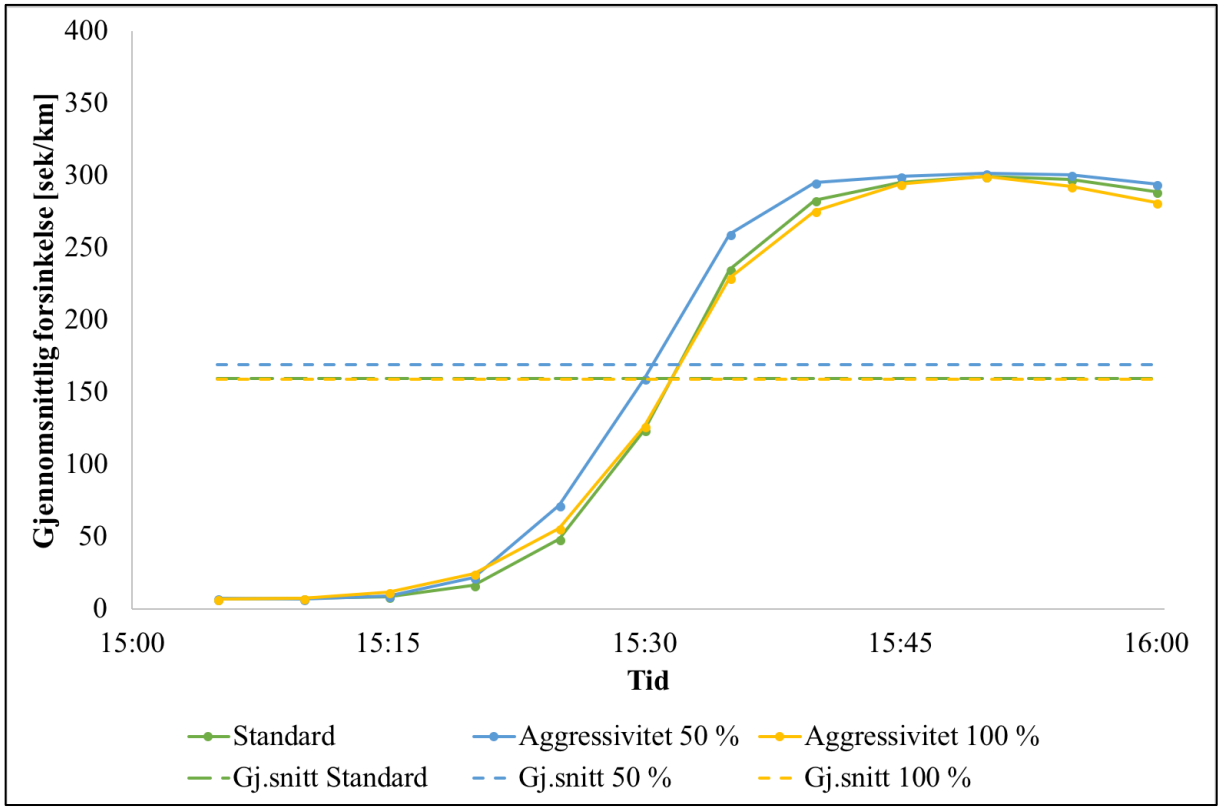
Hvordan gjennomsnittlig forsinkelse varierer med og uten samarbeidsmodell aktivert, kan man se i Figur 47. Å aktivere samarbeidsmodellen økte den totale gjennomsnittlige forsinkelsen med rundt 100 sek/km. Ved å se på enkelte av replikasjonene på disse simuleringene, kunne man se at kjøretøyene brukte mye tid på å kjøre i rykk og napp. Kjøretøyene, som egentlig har forkjørsrett, så ut til å bremse mer enn nødvendig for å slippe frem kjøretøyene som egentlig har vikeplikt. Figur 48 viser at det, i følge den fiktive modellen, er fordelaktig om både trafikkmengden og hastigheten mellom de to trafikkstrømmene som skal flettes sammen er ulike. Ulik trafikkmengde og/eller ulik hastighet minker gjennomsnittlig forsinkelse betraktelig sammenlignet med lik hastighet og trafikkmengde. Figur 49 og Figur 50 viser at verken bremsing eller aggressivitet har spesielt mye å si når det kommer til gjennomsnittlig forsinkelse.



Figur 48: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende trafikkmengde og hastighet.



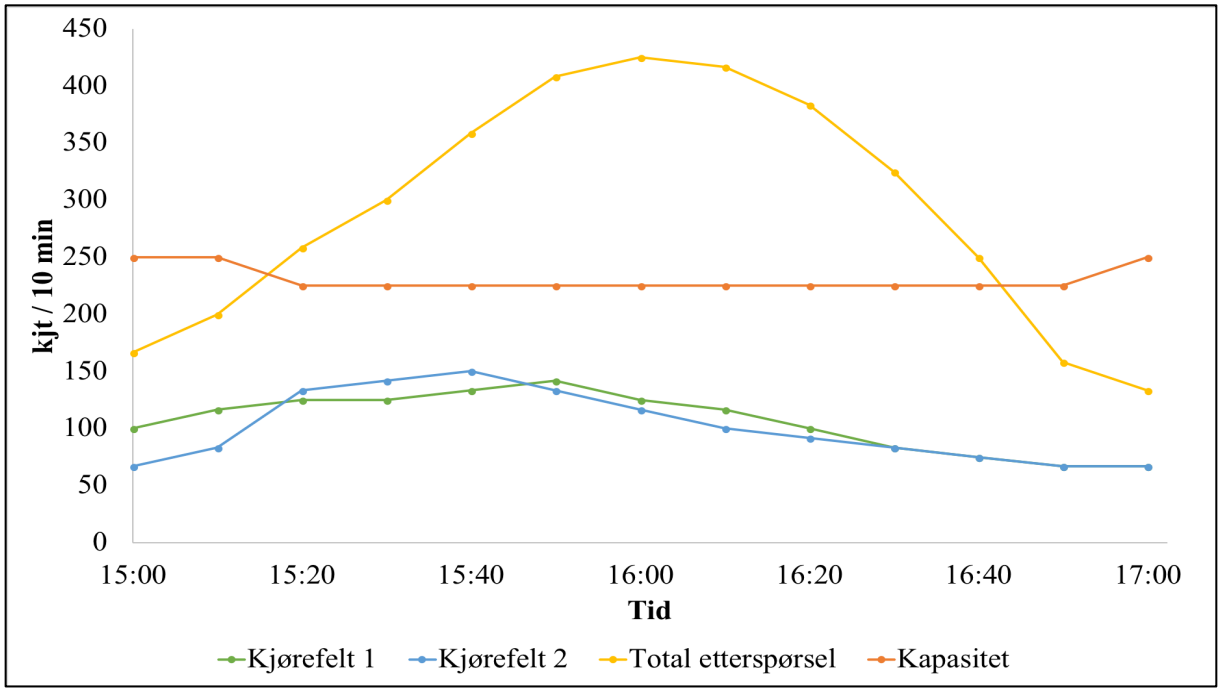
Figur 49: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende bremsing.



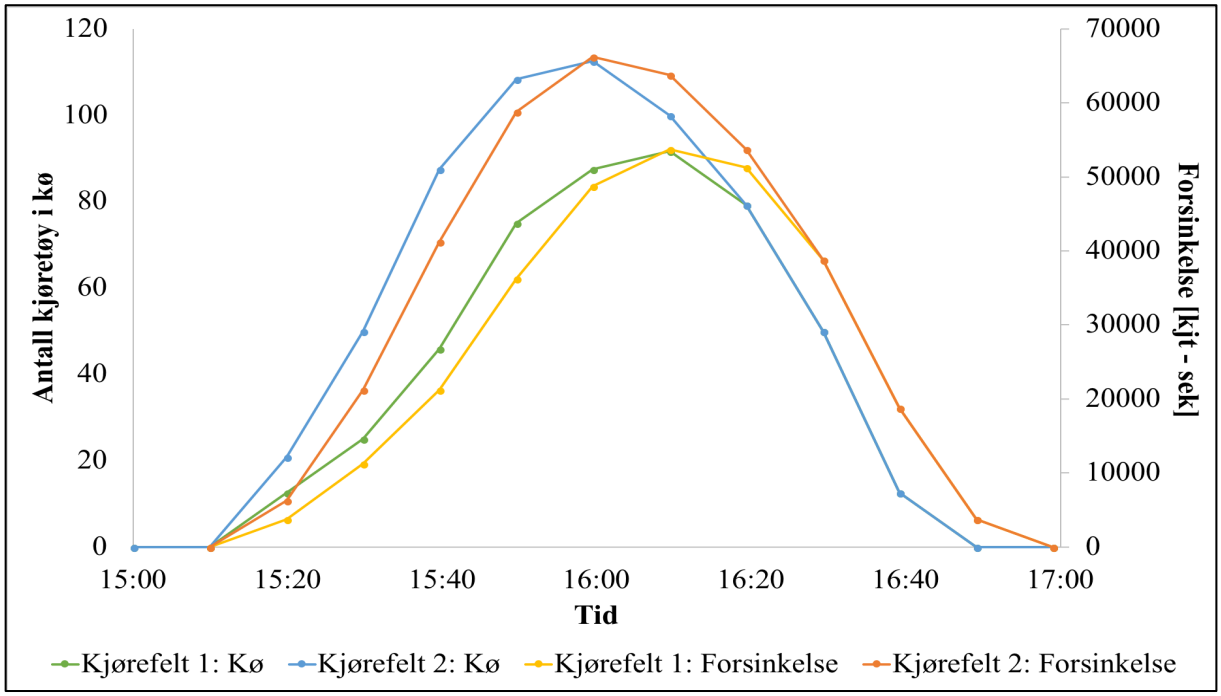
Figur 50: Gjennomsnittlig forsinkelse med varierende aggressivitet.

4.3 Flettemodell i Microsoft Excel

Figur 51 og Figur 52 viser eksempler på hvordan flettemodellen fungerer. I Figur 51 kan man se at kapasiteten faller når total etterspørsel overskrider kapasiteten. Figur 52 viser en korrelasjon mellom kø og forsinkelse.



Figur 51: Illustrasjon av hvordan kapasitetsnivået avhenger av total etterspørsel.



Figur 52: Illustrasjon av korrelasjonen mellom kø og forsinkelse.

Tester med modellen ble gjennomført med en total tidsperiode på to timer og ti minutter, hvorav de ti første minuttene er i intervall null og regnes som oppvarming. Andre verdier som ble benyttet som utgangspunkt:

- Kapasitet: 1500 kjt/t, 750 kjt/t per kjørefelt
- Kapasitetsfall: 10 %
- Hastighet før sammenbrudd: 60 km/t
- Hastighet etter sammenbrudd: 40 km/t

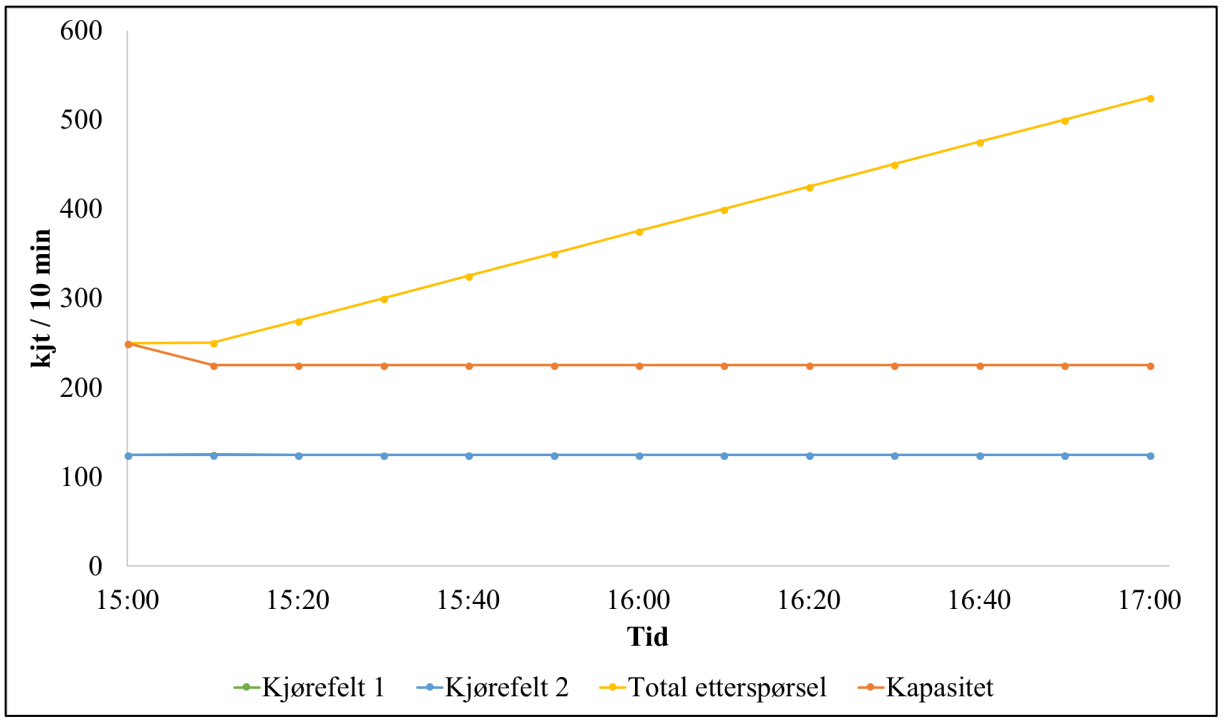
Tabell 9: Varierende gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy ut ifra trafikkmengde og når sammenbrudd inntreffer.

Trafikkmengde	**Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy**	
På kapasitetsgrensen	0,00 min	0,00 t
Ett kjøretøy mer i første tidsintervall	6,11 min	0,10 t
Ett kjøretøy mer i syvende tidsintervall	1,45 min	0,02 t

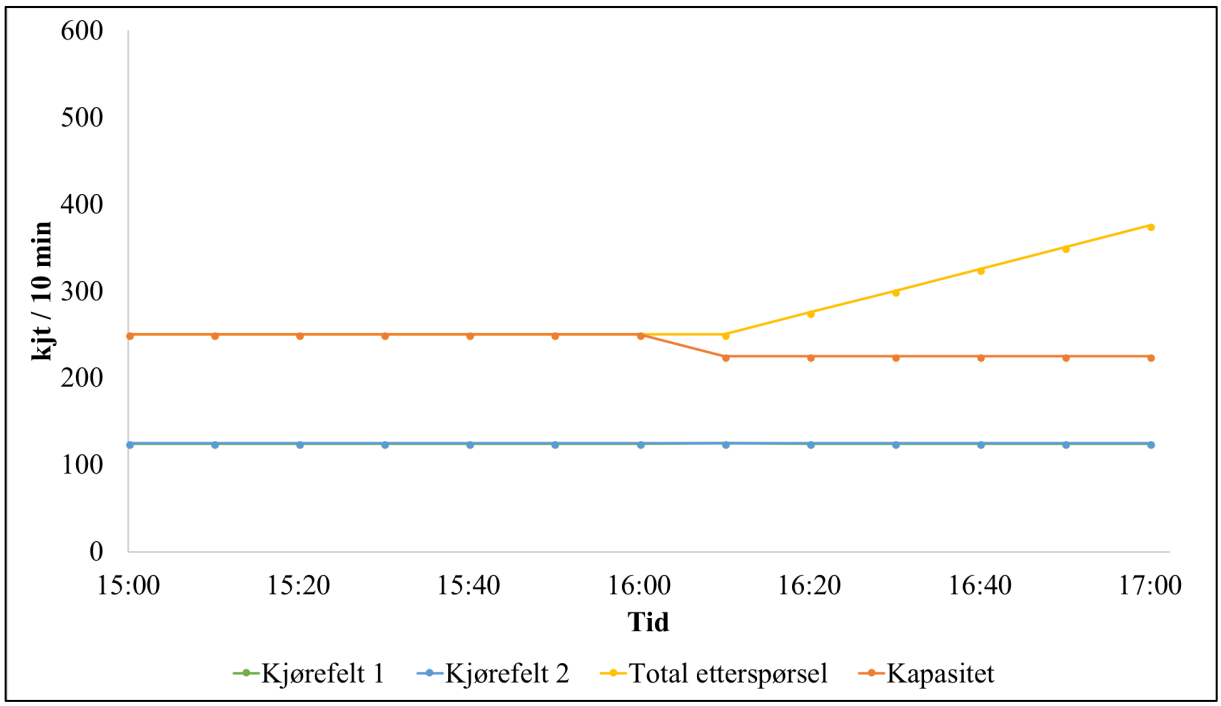
Ved å holde trafikkmengden under eller akkurat på kapasitetsgrensen gjennom hele tidsperioden som ble modellert, viste flettemodellen null forsinkelse, se Tabell 9.

En økning på ett kjøretøy over kapasitetsgrensen i det ene kjørefeltet i første tidsintervall, økte gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy til 6,11 minutter. Dette kommer av kapasitetsfallet som da inntreffer og forplanter trafikk, som ikke har blitt avviklet i forrige intervall, videre i neste intervall. Kø oppstår. Dette kan man se i Figur 53 hvor kapasiteten faller fra klokka tre til ti over tre, og forblir lav gjennom alle de resterende intervallene. Ettersom kapasiteten alltid ligger under den totale etterspørselen, øker den totale etterspørselen gradvis i hvert intervall etter kapasitetsfallet. Dette forekommer fordi det alltid er kjøretøy fra forrige intervall som fortsatt står i kø når det neste intervallet starter.

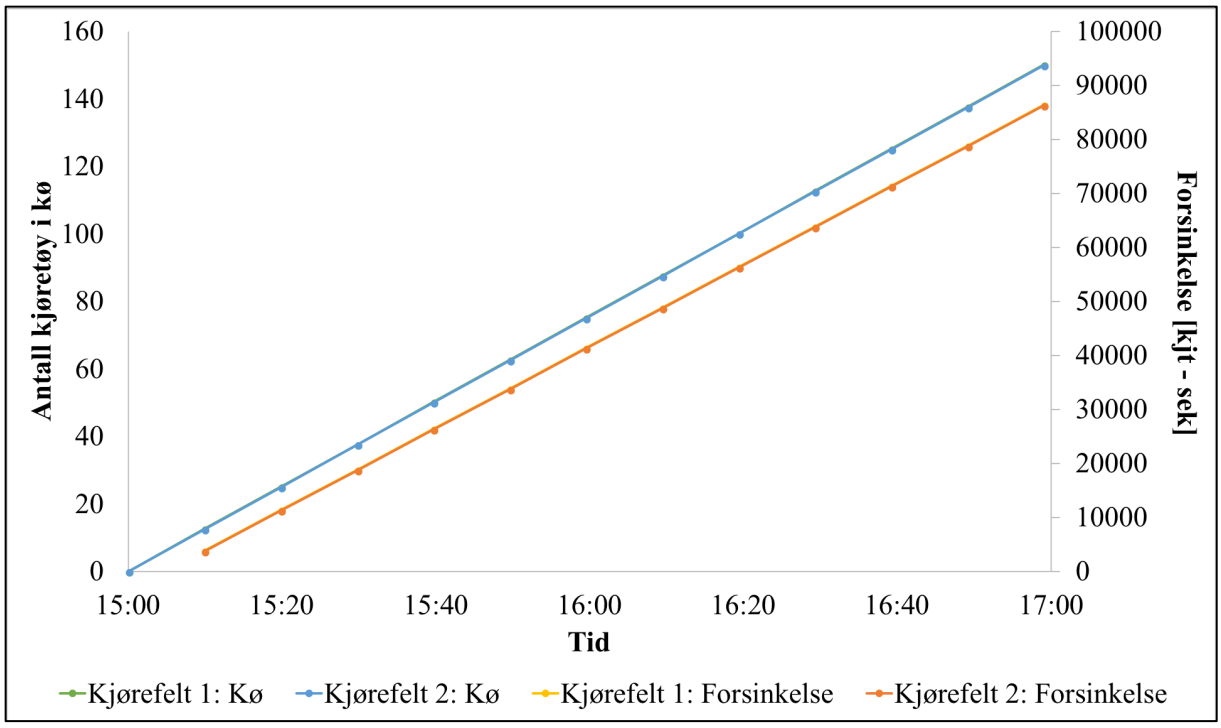
Ved å vente til syvende tidsintervall (utsette økningen fra klokka tre til klokka fire), gikk gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy ned til 1,45 minutter som man kan se i Tabell 9. Denne reduseringen kommer av at sammenbruddet ble utsatt, noe man kan se hvis man sammenligner Figur 53 og Figur 54. Utsettelse av sammenbrudd og reduksjonen i forsinkelse kommer også frem ved å sammenligne Figur 55 og Figur 56.



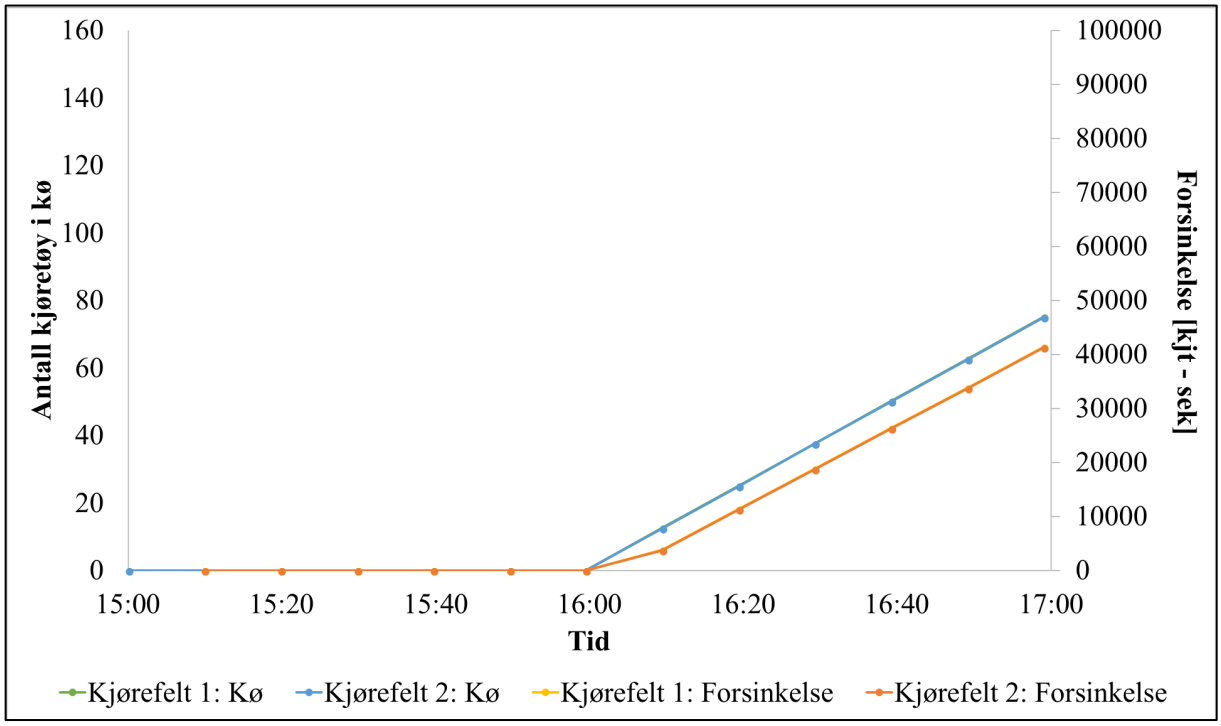
Figur 53: Endring i total etterspørsel og kapasiteten som følge av en økning på ett kjøretøy i første tidsintervall.



Figur 54: Endring i total etterspørsel og kapasiteten som følge av en økning på ett kjøretøy i et senere tidsintervall.



Figur 55: Endring i kø og forsinkelse som følge av en økning på ett kjøretøy i første tidsintervall.



Figur 56: Endring i kø og forsinkelse som følge av en økning på ett kjøretøy i syvende tidsintervall.

Kapittel 5

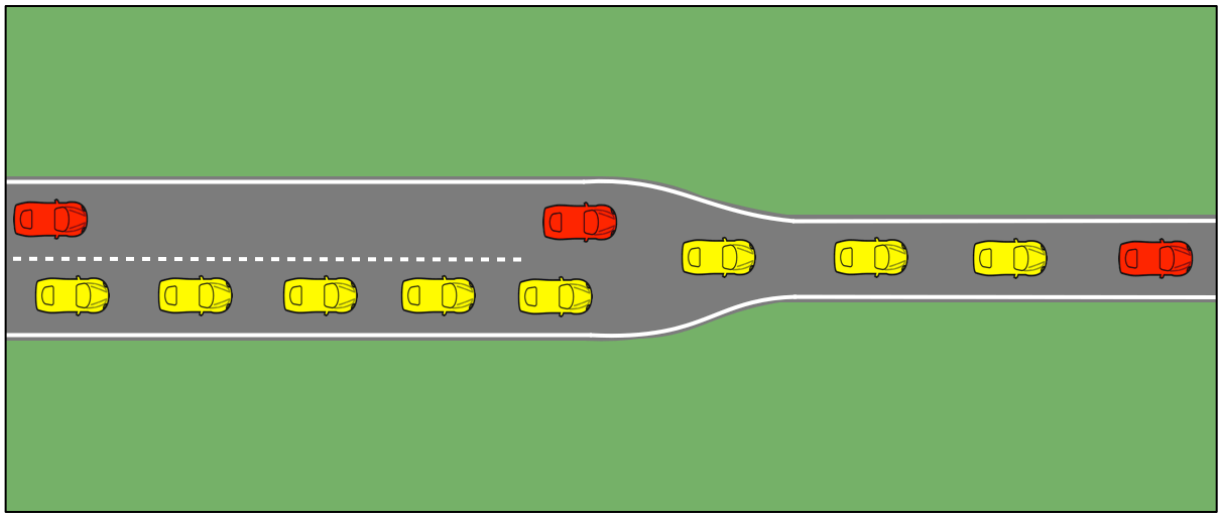
Diskusjon

I dette kapittelet blir først de tre forskningsspørsmålene masteroppgaven bygger på diskutert. Videre blir andre deler av masteroppgaven, som gjennomføring av videoregistreringer og erfaringer fra disse, diskutert.

5.1 Hva foregår før, i og etter en flaskehals i dag?

5.1.1 Før en flaskehals

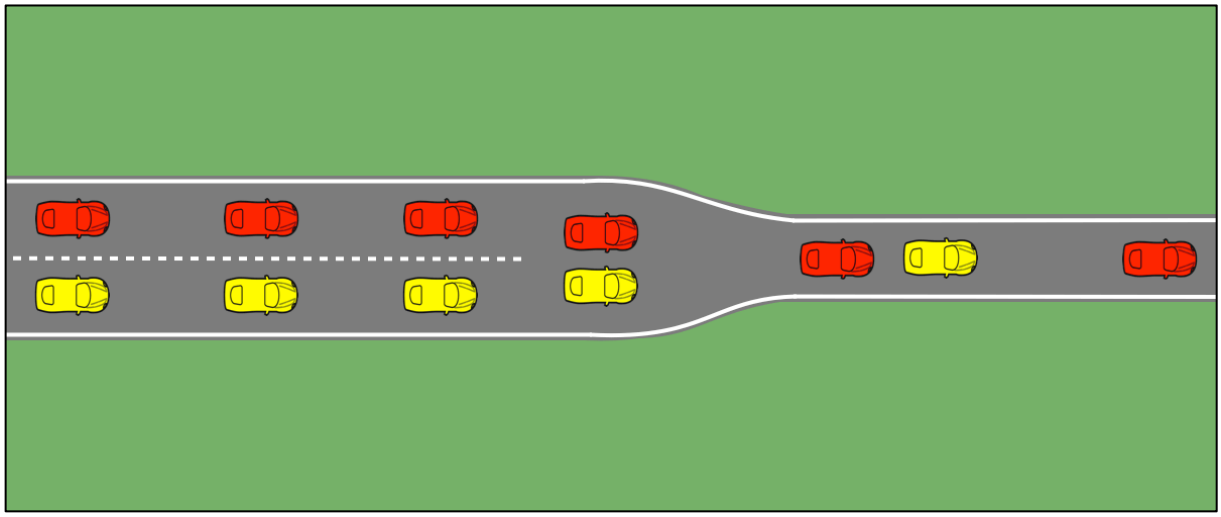
Før man kommer til en flaskehals hvor to kjørefelt går sammen til ett, ser det ut til at man i hovedsak benytter høyre kjørefelt, mens venstre kjørefelt benyttes mer som et forbikjøringsfelt. Dette kan man se av Figur 40 som viser at rundt 90 % benytter høyre kjørefelt på E6 frem til sammenbrudd oppstår. Når det først har oppstått kø, fordeler kjøretøyene seg i begge kjørefelt.



Figur 57: Tidlig fletting med røde kjøretøy som representerer snikere.

At de fleste ligger plassert i høyre kjørefelt når det er fri flyt og trafikkmengden ligger under kapasitetsgrensen, kommer nok av at det er det Trafikkreglene (1986) sier at man skal gjøre. I paragraf 5 første ledd, står det: «Så langt forholdene tillater det skal kjøretøy føres på høyre side av vegen. På kjørebane med to eller flere kjørefelt i kjøreretningen skal høyre felt nyttes når ikke trafikkreglene påbyr eller tillater bruk av felt til venstre.» (Trafikkregler, 1986). Med mindre man skal kjøre forbi eller det på annen måte er hensiktsmessig å bruke venstre kjørefelt, skal man altså ligge i det høyre kjørefeltet.

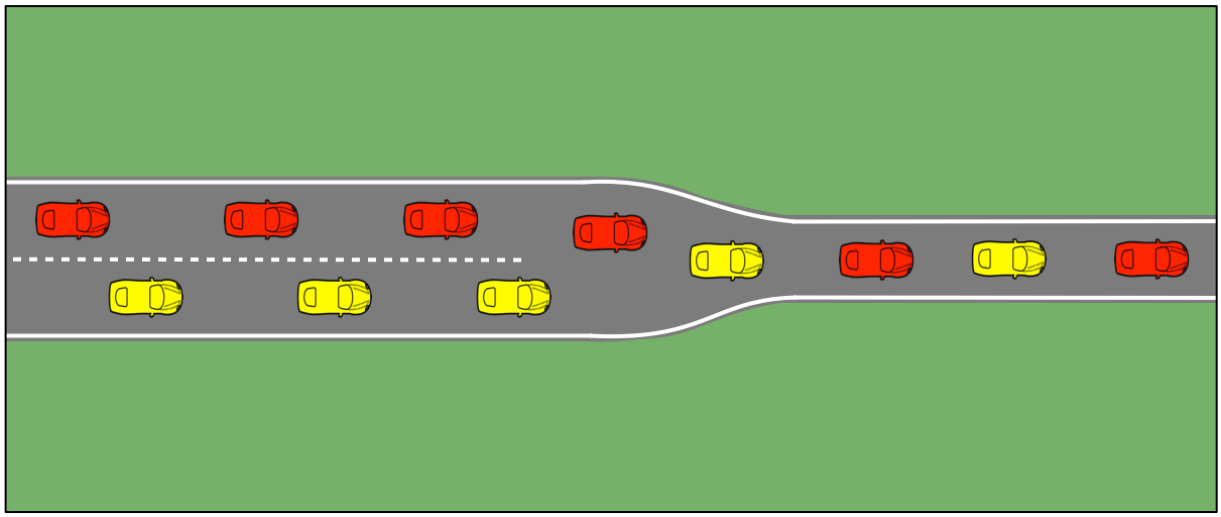
I området før innsnevringen hvor antall kjørefelt reduseres, kan man ofte se at de fleste tidlig legger seg inn i det høyre kjørefeltet, noe som etterhvert skaper en saktegående kø i dette feltet, mens det venstre feltet er nesten fritt for trafikk, illustrert i Figur 57. Trafikkregelen om at man i hovedsak skal ligge i høyre kjørefelt, kan ha innflytelse på dette valget. At de som kjører i det venstre feltet helt frem til innsnevringen blir sett på som snikere, kan også komme av at de som legger seg inn tidlig ser på det å kjøre helt frem som noe som strider imot reglene for hvordan man skal plassere seg i kjørebanen. Det gjør det derimot ikke da reglene tilsier at man skal benytte det venstre feltet dersom det er hensiktsmessig, noe det ifølge litteraturen om sammenfletting er.



Figur 58: Hvordan ikke plassere seg i forhold til de andre kjøretøyene.

5.1.2 I en flaskehals

I flaskehalsen, fra litt før innsnevringen starter til litt etter den slutter, skjer selve fletteprosessen. Denne påvirkes i stor grad av hva som foregår i området før flaskehalsen. Dette gjelder blant annet fordelingen av kjøretøy i de forskjellige kjørefeltene og plasseringen til kjøretøyene i forhold til hverandre.



Figur 59: Hvordan man skal plassere seg i forhold til de andre kjøretøyene.

I Figur 58 ser man hvordan man ikke bør plassere seg om fletteprosessen skal gå best mulig. Ved at kjøretøyene plasserer seg likt som kjøretøyene i det andre kjørefeltet, vil det bli vanskelig å finne sin luke i prosessen da man kjemper om samme luke som kjøretøyet i det andre feltet. En slik plassering kunne man også se i simuleringen av modellen med fire sentroider vist i Figur 60. Dersom kjøretøyene kommer inn i fletteprosessen plassert som i Figur 59, vil det bli mye lettere å flette trafikkstrømmene sammen da det er klart hvilken luke som tilhører hvilket kjøretøy. Hvordan sammenfletting reguleres i området før flettepunktet, kan derfor være avgjørende for trafikkavviklingen i selve flaskehalsen.

Ved å se på resultatene fra videoregistreringene, ser man tendensen til at de fleste kommer inn i fletteprosessen fra det høyre kjørefeltet i starten, se Figur 40. Når sammenbrudd først inntreffer, er det derimot en fordeling på rundt 50 % fra hvert kjørefelt. Dette tyder på at folk velger å benytte venstre kjørefelt også, men da i hovedsak etter at det allerede har blitt kødannelse, noe som kan sees på som for sent da dette betyr at et kapasitetsfall allerede har inntruffet.

Figur 60: Utklipp fra 3D-visning av modellen med fire sentroider.

5.1.3 Etter en flaskehals

Da studieområdet var preget av en ekstra fletteprosess og mangel på fri flyt nedstrøms begge fletteprosessene, er det vanskelig å si noe om hva som skjer etter en flaskehals ut ifra videoregistreringene. Det man derimot kan tenker seg til er at trafikkavviklingen etter flaskehalsen avhenger av det som skjer i flaskehalsen, på samme måte som at det som skjer i flaskehalsen avhenger av det som foregår før flaskehalsen.

Dersom kjøretøyene ligger dårlig plassert i forhold til hverandre og fletteprosessen består i litt kjøring i rykk og napp for å finne ledige luker, er det naturlig å anta at tidslukene mellom kjøretøyene etter flettingen, kan bli større enn nødvendig og veldig varierende. Dette er vist i Figur 58 hvor man kan se eksempel på at et gult og et rødt kjøretøy har knivet om en ledig luke, noe som har ført til at luken til det røde kjøretøyet, som var ferdig med fletteprosessen før dem, er lenger enn nødvendig. I Figur 59 har man en jevnere fletteprosess hvor alle vet hvilken luke som er sin, som videre skaper jevnere luker mellom de sammenflettede kjøretøyene. Jevnere og kortere avstand mellom sammenflettede kjøretøy, kan tenkes å være fordelaktig da dette mest sannsynlig vil bedre trafikkavviklingen ut av flaskehalsen, som igjen gir høyere hastighet og bedre kapasitet.

I videoregistreringene kan man se viktigheten av fri flyt etter en flaskehals. Dersom en flaskehals ikke har fri flyt etter fletteprosessen, vil hvor god trafikkavviklingen i flaskehalsen er, ha mindre å si da den uansett blir begrenset av tilbakeblokkeringer nedstrøms.

5.2 Hvordan kan man skape en mer effektiv avvikling gjennom flaskehalser?

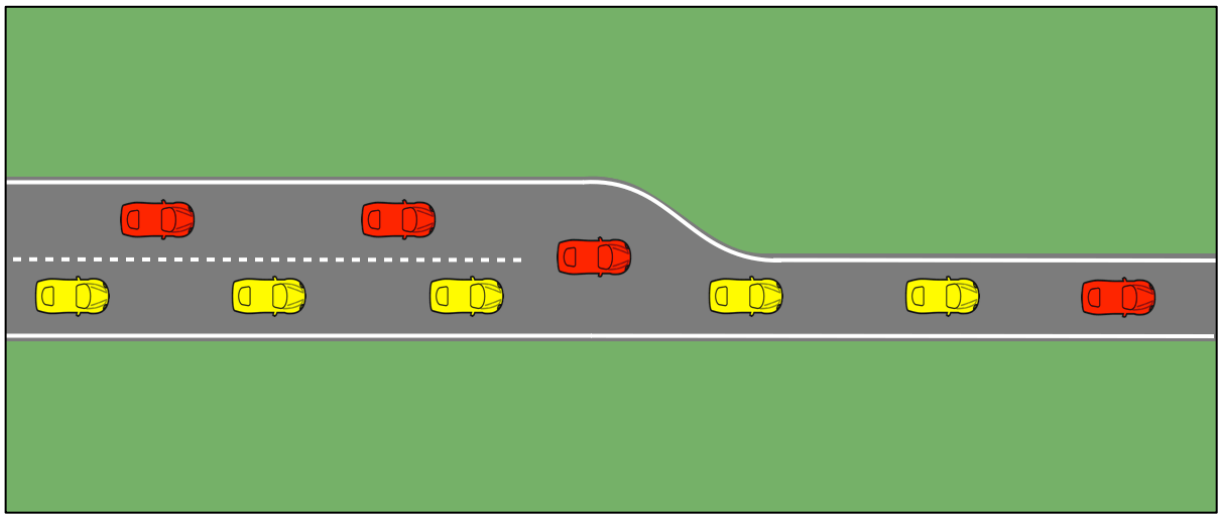
Det er nok mye som kan være med på en skape en mer effektiv avvikling gjennom flaskehalser hvorav noe vil bli diskutert her.

En felles forståelse av hvordan man bør plassere seg i forhold til hverandre i kjørebanen vil, som nevnt i forrige forskningsspørsmål, kunne ha en stor innvirkning på fletteprosessens effektivitet. Dersom man ikke bare følger med på kjøretøyet foran seg, men også forholder seg til kjøretøyet foran eller ved siden av seg i det andre kjørefeltet, vil det bli lettere å finne luken for sammenfletting som er tiltenkt hvert enkelt kjøretøy.

Som nevnt innledningsvis, er det flere som mener at glidelåskjøring, eller sen fletting som det også kalles, kan redusere den totale lengden med kø med opptil 40-50 % (Minnesota Department of Transportation, 2018; Aakre, 2017a; North Carolina Department of Transportation, 2016 og Kansas Department of Transportation, 2016), og dermed gjøre fletteprosessen mye mer effektiv. Dersom det er slik at glidelåskjøring er den mest effektive metoden å sammenflette to trafikkstrømmer på, er dette noe som bør tilstrebes. Hvordan man skal få førere til å kjøre på denne måten, er noe som bør forskes videre på. Det som er sikkert, er at det må noen endringer. Dette kan være alt fra holdningsendringer blant trafikanter til annerledes utforming og skilting av flettestrekninger.

Skilting av sammenfletting praktiseres til en viss grad likt i Norge, Sverige og Danmark med skiltene som viser gjensidig vikeplikt og at begge dermed skal ta like stor del i fletteprosessen. Fletteprosessen forvarsles, men kun ved å benytte samme skiltet (i Norge: skilt 530) med et underskilt som tilsier avstanden til flettepunktet. Mange fletter sammen allerede ved forvarselsskiltet. For å få førere til å benytte begge kjørefeltene helt frem til flettepunktet, kan det av den grunn kanskje være fordelaktig med innføring av nye skilt. Et eksempel på et slikt skiltet fra Colorado Department of Transportation, vist innledningsvis i Figur 7, som sier at man skal benytte begge kjørefelt helt frem til flettepunktet. Et forklarende skilt som dette, kan være det folk trenger for å bli opplyst om hva som er ønskelig fletteadferd.

Reduseringer av antall kjørefelt er ofte utformet som illustrert i Figur 61 hvor et kjørefelt avsluttes, mens det andre fortsetter videre. I Norge reguleres dette av skilt 530 for sammenfletting såfremt trafikkreglenes bestemmelser for fletting skal gjelde. At trafikk i begge kjørefelt i et slikt tilfelle har like stort ansvar for å ta del i fletteprosessen, kan virke noe ulogisk da det for mange kan se ut til at trafikk i høyre felt har et fortrinn ved at det er deres kjørefelt som fortsetter. Å unngå slike utforminger, og heller lage utformingen av flettestrekningen mer som en flaskehals, som vist i Figur 59, kan derfor være med på å skape et bedre utgangspunkt for en fletteprosess da det mer tydelig at ingen har et fortrinn, men at trafikk i begge kjørefelt har gjensidig vikeplikt.



Figur 61: Utformingen av en flettestrekning som man kanskje bør unngå.

Dersom man vil at alle skal ha en felles forståelse for hvordan og når man skal flette, hadde det vært fordelaktig med en undersøkelse for å finne ut hva folk tror og mener er riktig, samt hva de tolker ut ifra skiltene som i dag benyttes til å regulere fletting. Det er sannsynlig at det må en holdningsendring til for å få førere til å endre kjørevanene sine. Å gjennomføre kampanjer som opplyser om hvordan man skal flette med forklarende plakater som de vist i delkapittel 2.6.3 Økt forståelse for hva glidelåskjøring er, Figur 8 og Figur 9, kan hjelpe folk til å forstå og bli påmint hva glidelåskjøring er og at det bør benyttes.

Resultater fra flettemodellen i Microsoft Excel viser at jo lenger man kan utsette et sammenbrudd, jo bedre er det for begrensning av den totale forsinkelsen i systemet, se Figur 55 og Figur 56. Ved å utsette sammenbruddet én time, har gjennomsnitt forsinkelse per kjøretøy gått ned fra rundt 6 minutter til i underkant av 2 minutter, se Tabell 9. Dersom man klarer å

ligge tett opptil kapasitetsgrensen, men ikke overskride den, kan man få en stor gjennomstrømningsrate uten å skape store forsinkelser i systemet. I Figur 53 og Figur 54 kan man se hvor stor innvirkning bare ett kjøretøy mer enn kapasitetsgrensen har på systemet. Det at dette kjøretøyet skaper et kapasitetsfall, gir en gradvis økende total etterspørsel da ti prosent færre kjøretøy blir avviklet i hvert intervall sammenlignet med hvordan det hadde vært dersom ikke kapasitetsfallet hadde inntruffet. Å sørge for en god fletteprosess som utsetter sammenbrudd så lenge som mulig, kan derfor være med på å skape en mer effektiv trafikkavvikling i flaskehalser.

5.3 Kan trafikksimuleringsverktøyet Aimsun benyttes til å se på hva som påvirker effektiviteten av en fletteprosess?

Etter å ha testet både modeller basert på virkelig data, og en fiktiv modell med fiktive data, ser det ikke ut til at Aimsun kan benyttes til å se på hva som påvirker effektiviteten av en fletteprosess.

Grunnen til at Aimsun ikke klarer å simulere en fletteprosess på en god måte er uvisst. Det kan komme av en svakhet i programvaren, men det kan også komme av at undertegnede ikke tilegnet seg god nok kunnskap om programmet til å få det til. Hvorvidt det er det ene eller det andre, kan være et godt utgangspunkt for videre forskning. Videre i underkapittel 5.3.1 Resultat fra simuleringer, diskuteres muligheten for en svakhet i programvaren.

Dersom det viser seg at Aimsun faktisk ikke klarer å simulere fletting på en god måte, er dette en modell som bør utarbeides og legges inn i programmet da sammenfletting er en veldig vanlig prosess i et vegnettverk. Et forslag til hva en slik modell bør inneholde, presenteres i underkapittel 5.3.2 Forslag til modell for fletting i Aimsun.

5.3.1 Resultat fra simuleringer

Simuleringene gjennomført med den fiktive modellen for å teste antall nødvendige replikasjoner var alle preget av store standardavvik og varierende gjennomsnittlig forsinkelse innad i replikasjonene for det samme scenarioet. Med så store standardavvik og varierende gjennomsnittlig forsinkelse innad i replikasjonene for det samme scenarioet som det ble med 50 replikasjoner, er det vanskelig å si om en endring i gjennomsnittlig forsinkelse skyldes endring av en parameter eller den stokastiske variasjonen i programmet.

Etter at den totale trafikkmengden ble økt fra i underkant av 1700 kjt/t til 2000 kjt/t, ble det ikke gjort den samme omfattende testen med standardavvik, men på de testene som ble gjennomført, minket standardavviket noe som ønskelig. Årsaken til minkingen kan være at det ble stabilt mer kø i alle replikasjonene, og ikke bare i halvparten slik det var med 1700 kjt/t.

En strekning med 2000 kjt/t gir en gjennomsnittlig tidsluke på 1,8 sekunder per kjøretøy, se Formel [14]. Dette er en veldig kort avstand mellom kjøretøyene. Det er ingen skrevne regler

på akkurat hvor stor avstanden til forankjørende minst skal være, men en vanlig tommelfingerregel er tre sekunder. I Trafikkreglene (1986) står det i paragraf 5 ledd 3: «Avstanden til forankjørende skal være så stor at det ikke oppstår fare for påkjøring dersom den forankjørende saktner farten eller stanser. Avstanden skal være slik at forbikjørende uten fare kan kjøre inn mellom kjøretøyene.». Ved store trafikkmengder kan det være fordelaktig å nærme seg tidsluker på to sekunder, men å gå under dette, er nok ikke anbefale med tanke på sikkerheten.

$$Gjennomsnittlig\ tidsluke = \frac{3600\ sek/t}{2000\ kjt/t} = 1{,}8\ sek/kjt \qquad [14]$$

Da det er sjeldent man har trafikkmengder på opp mot 2000 kjt/t, er det en stor ulempe om Aimsun krever så store trafikkmengder for å til en viss grad gi statistisk gyldige resultater.

At simuleringene med trafikkmengder basert på virkelige registeringer og variasjonskurver med lavere trafikkmengder, ikke så ut til å fungere, kan også komme av at Aimsun kanskje ikke klarer å kjøre simuleringer med små intervaller og variasjoner fra intervall til intervall. Dataene fra videoregistreringene hadde til tider store variasjoner når de ble inndelt i femminutters-intervaller, noe man kan se i utdraget i Tabell 10 hvor antallet kjøretøy i intervallet nesten halveres fra klokka fem på tre til klokka tre. Ved å lage intervaller på et kvarter i stedet, kunne kanskje Aimsun fungert bedre ved at antall kjøretøy i intervallene muligens hadde blitt jevnere.

Tabell 10: Utdrag fra videoregistreringene.

Tidsintervall	**Antall kjøretøy i intervall**
14:35 – 14:40	108
14:00 – 14:45	89
14:45 – 14:50	87
14:50 – 14:55	100
14:55 – 15:00	57
15:00 – 15:05	105

Å kunne se på simuleringene, som testet effekten av å endre ulike parametere i Aimsun, som pålitelige, ansees som lite trolig grunnet usikkerhetene knyttet til den stokastiske stabiliteten av modellen. Dersom man likevel skulle diskutert resultatene i lys av teorien om glidelåskjøring,

ser det ut til at Aimsun produserer resultater som er i strid med det litteraturen om temaet sier. Ifølge Aimsun og resultatet vist i Figur 48, er det fordelaktig om trafikkstrømmene som skal flettes sammen har ulik hastighet og/eller trafikkmengde. Gjennomsnittlig forsinkelse minker fra rundt 160 sek/km med standardscenarioet til rundt 15 sek/km for de andre scenarioene. Dette er det motsatte av hva litteraturen tilsier, som mener at to trafikkstrømmer med noenlunde lik hastighet og trafikkmengde skal være den mest effektive metoden for sammenfletting.

Figur 45 viser at en økning i reaksjonstid, øker den gjennomsnittlige forsinkelsen. Dette gir mening da en lenger reaksjonstid kan føre til at førere bruker lenger tid på å innse at det er deres tur til å kjøre, eller at køen nå går fremover i stedet for å stå stille som den akkurat gjorde. At verken aggressivitet eller bremsing har spesielt stor effekt på den gjennomsnittlige forsinkelsen, se Figur 49 og Figur 50, kan også virke logisk. Den lille negative effekten en økning i bremsing gir, kan komme av at det blir mer kjøring i rykk og napp ved at flere bremser kraftigere enn nødvendig.

Resultatet fra aktiveringen av samarbeidsmodellen gir derimot ikke helt mening. Samarbeidsmodellen skal i utgangspunktet sørge for at det blir én til én fletting, noe som skal være fordelaktig med tanke på effektivitet ifølge litteraturen. Figur 47 viser det motsatte. Aktivering av samarbeidsmodellen økte gjennomsnittlig forsinkelse med rundt 100 sek/km, noe som kan tyde på at samarbeidsmodellen ikke fungerer optimalt til situasjonen hvor to trafikkstrømmer går sammen til én trafikkstrøm. Dette kan komme av at modellen egentlig er utarbeidet for rundkjøringer, T- og X-kryss.

At Aimsun genererer noen resultater som gir mening, og andre som strider imot litteraturen, tyder på at Aimsun ikke kan benyttes til å si noe konkret om hvilke effekter endringer av parametere knyttet til fletteprosesser har. Dersom man hadde hatt nok data til å verifisere modellen(e), kunne man kanskje sagt noe mer om det skyldes en svakhet i programvaren eller mangel på kunnskap. Mangelen på pålitelighet i resultatene fra Aimsun i denne masteroppgaven, tyder uansett på at det er noe galt et sted.

5.3.2 Forslag til modell for fletting i Aimsun

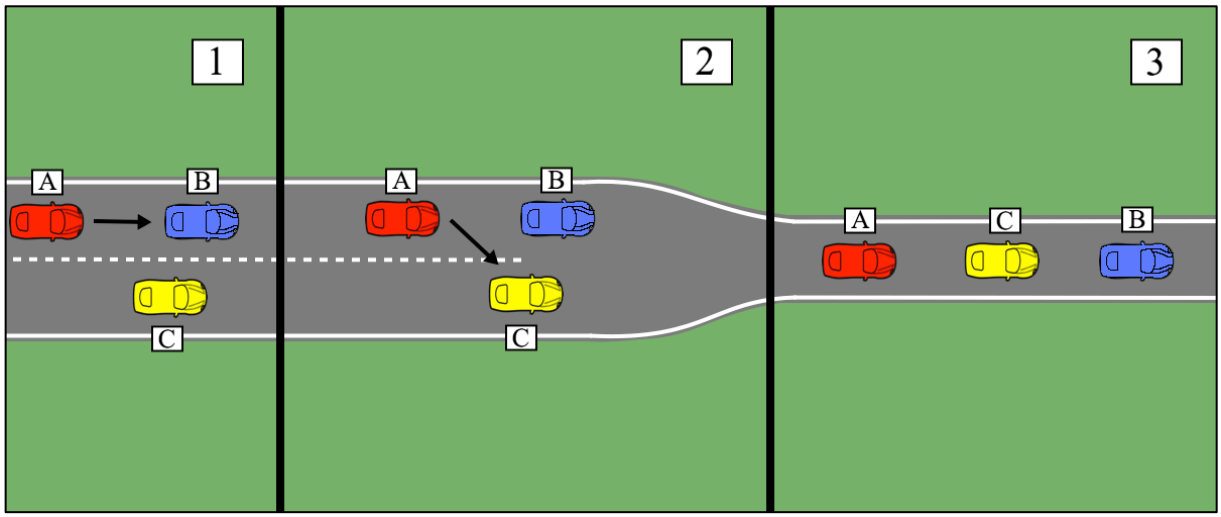
Samarbeidsmodellen som allerede eksisterer i Aimsun krever at det er minst ett kjørefelt som har vikeplikt og ett som har forkjørsrett. Slik er det ikke i virkelige fletteprosesser som reguleres av gjensidig vikeplikt. Modellen for fletting bør derfor kunne aktiveres uten at det må være et kjørefelt som har fortrinnsrett.

Dersom det er lite trafikk, skal kjøretøyene kjøre slik de kjører til vanlig (uten unødvendig nedbremsing). Dersom det er mye trafikk eller trafikken øker nok til at flere kjøretøy blir stående i kø i enten ett eller begge kjørefeltene, skal modellen aktiveres. Ved en aktivering av modellen, skal kjøretøyene bli tvunget til å bremse ned for å slippe frem et kjøretøy fra den andre trafikkstrømmen slik at én til én fletting oppstår.

Det må være en regel som sier noe om hvor lenge et kjøretøy maks må bremse ned, slik at det ikke oppstår unødvendig kø. En slik unødvendig kø så det ut til at samarbeidsmodellen skapte ved at et kjøretøy som egentlig hadde god nok tid til å komme seg over krysset før kjøretøyet i det andre kjørefeltet nådde frem til starten av krysset, bremset helt ned og ventet på det andre kjøretøyet i stedet for å kjøre selv. Dette kan være grunnen til at en aktivering av samarbeidsmodellen økte gjennomsnittlig forsinkelse betraktelig, se Figur 47. For å unngå dette, bør derfor modellen inneholde en regel som avverger slik unødvendig nedbremsing og heller oppfordrer kjøretøyet til å kjøre selv om det fører til at flettingen ikke blir én til én. I virkeligheten ville man ikke bremset ned for et kjøretøy som er såpass langt unna at man kanskje må ned i full stans, når man egentlig har en stor nok tidsluke til å kjøre før kjøretøyet ankommer krysset.

Modellen må baseres på gjensidig vikeplikt og jobbe for at trafikkstrømmene holder noenlunde lik hastighet, men ikke lavere enn nødvendig. Modellen bør også inneholde en form for bilfølgeteori ved at man først forholder seg til kjøretøyet foran seg. Etterhvert som man nærmer seg krysset bør man også forholde seg til kjøretøyet ved siden av eller foran seg i den andre trafikkstrømmen. På den måten kan kjøretøyene tidlig plassere seg riktig i forhold til hverandre og alle skjønner hvilken luke som er sin luke. Slik vil modellen kunne sørge for en god trafikkavvikling i fletteprosessen. Dette er illustrert i Figur 62 hvor kjøretøy A først forholder seg til kjøretøy B som ligger foran i samme kjørefelt. Nærmere krysset forholder kjøretøy A seg til kjøretøyet som ligger ved siden av eller foran i det andre kjørefeltet, i dette tilfelle

kjøretøy C. Kjøretøy A ser at kjøretøy C ligger foran, og skjønner at det at dets luke er bak kjøretøy C.



Figur 62: Forslag til implementering av en bilfølgemodell i en flettemodell i Aimsun.

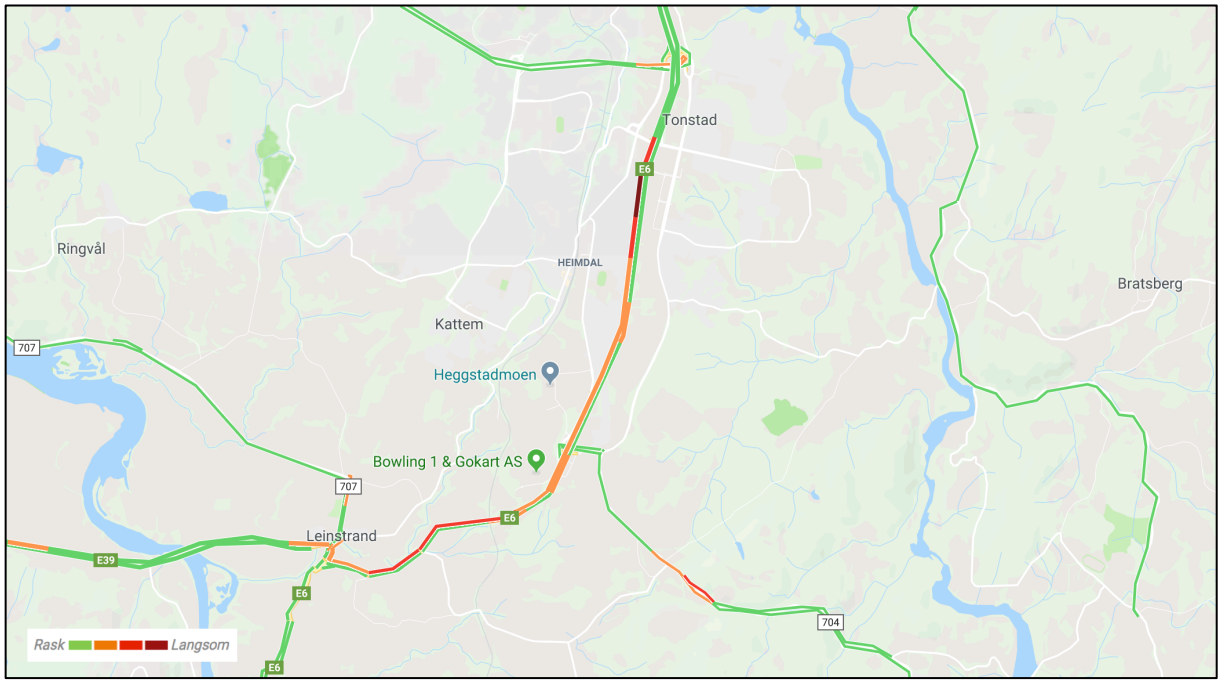
En ting som trolig vil være utfordrende å få til i modellen er samarbeidet når kjøretøy kommer med store hastighetsforskjeller. Et kjøretøy som egentlig ser ut til å komme først frem til krysset, kan kjøre mye saktere enn et kjøretøy som i utgangspunktet ser ut til å komme sist frem til krysset. Dette kan føre til forvirring om hvem som skal bremse for hvem da brått kjøretøyet som lå an til å nå krysset sist, kommer først. Dette er også utfordrende i virkeligheten da det er vanskelig å se an hastighet og avstand til et annet kjøretøy.

5.4 Andre forhold

5.4.1 Innsamling og behandling av data

Valg av studieområde

Studieområdet, som i utgangspunktet så ut til å være et godt eksempel på en strekning med en flaskehals skapt av to trafikkstrømmer som går sammen til én basert på gjensidig vikeplikt og skilt 530, viste seg, som nevnt i metodekapittelet, å ikke fungere optimalt. Det som uansett var positivt med området på Tiller var at det hadde stabilt mye kø og lå i Trondheim.



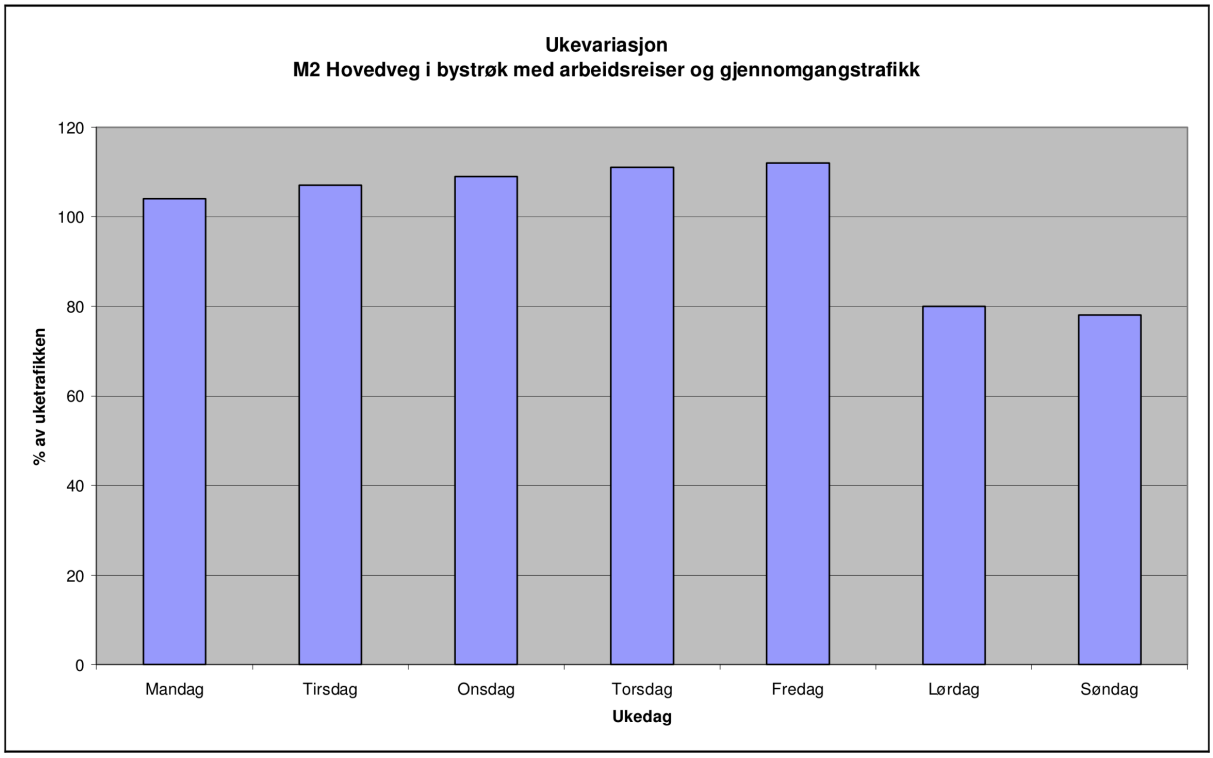
Figur 63: Mangel på fri flyt og en kø som strekker seg helt ned til Klett (Hentet fra: Google Maps).

En fletteprosess uten forstyrrelser i form av på- og avkjøringsramper var ønskelig, men ikke oppnådd på studieområdet ved City Syd. Det at flettepunktet flyttet seg slik at det ved registreringstidspunktet hadde en påkjøringsrampe rett etter fletteprosessen, så derimot ikke ut til å være det største problemet. Observasjoner underveis i registreringsperioden tydet på at det var mangel på fri flyt etter fletteprosessene, som videre skapte tilbakeblokkeringer, som var hovedproblemet. Mangel på fri flyt, er vist i Figur 63 som viser et utsnitt av trafikkdata fra Google Maps en fredag rundt klokken fire hvor man kan se at trafikken går langsommere (oransje til rød) enn vanlig (grønn) helt ned til rundkjøringen på Klett. Dette problemet så man også i hastighetsprofilene vist i Figur 43 og Figur 44 hvor hastigheten til de tre kjøreturene i utgangspunktet burde ligget stabilt rundt fartsgrensen, men i stedet varierer fra 0 til 70 km/t.

Å velge et område i stadig forandring med mye anleggsdrift, viste seg å ikke være det mest fordelaktige med tanke på å samle gode inngangsdata til modellen i Aimsun. Det hadde vært hensiktsmessig å bruke mer tid på å finne et bedre egnet sted uten kø nedstrøms flaskehalsen og uten andre forstyrrelser i vegnettet.

Valg av tidspunkt for videoregistreringer

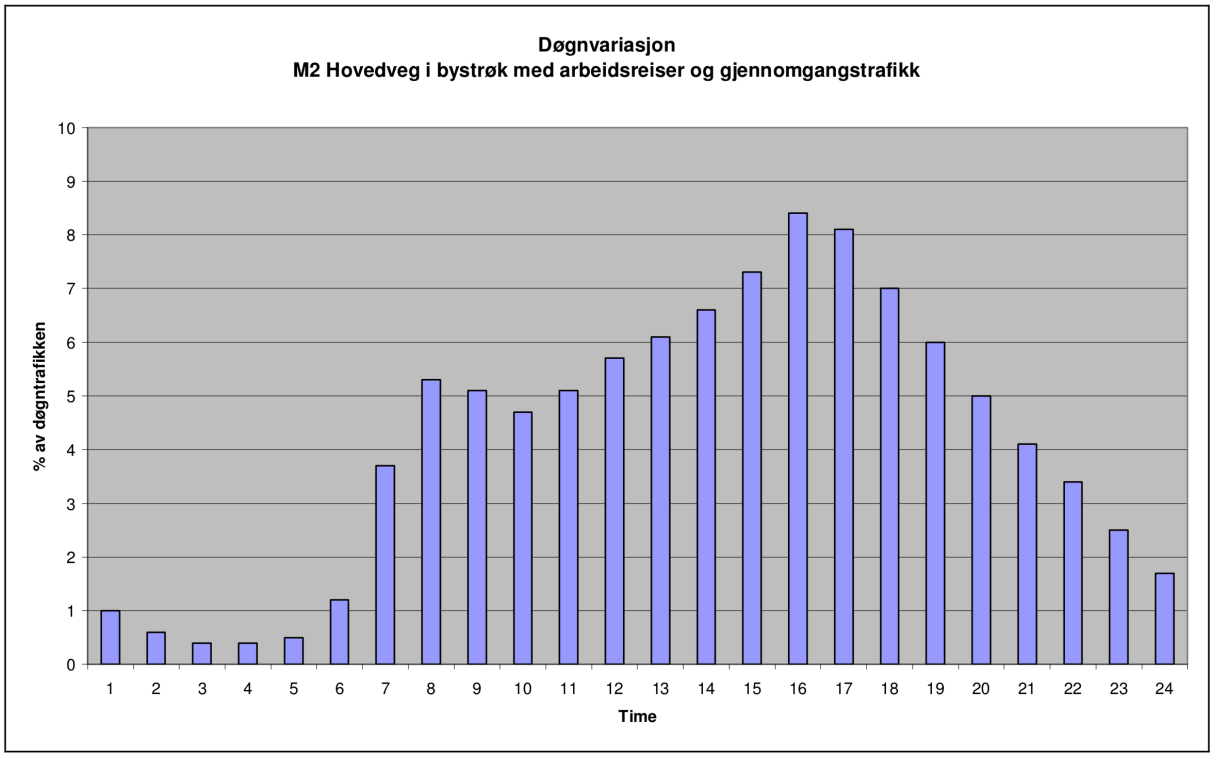
Ifølge trafikkdata-ansvarlig i gamle Sør-Trøndelag (e-post, T. T. Rypdal, 23.04.18), kan strekningen fra Tonstadkrysset til Klett regnes som kategorien M2 – Hovedveg i bystrøk med arbeidsreiser og gjennomgangstrafikk. Det vil si at det gjerne er mindre trafikk i januar og februar (90-95 % av ÅDT), og at sommertrafikken som regel ligger mellom 95 og 100 % av ÅDT. Døgntrafikken er også betydelig redusert på lørdag og søndag sammenlignet med de andre ukedagene. Uke- og døgnvariasjon av en veg i kategorien M2 er vist i Figur 64 og Figur 65.



Figur 64: Ukevariasjon for en veg i kategorien M2 (Vegdirektoratet 2014c).

At det er mindre trafikk i måneden som ble registrert enn i mange av årets resterende måneder, vurderes til å ikke ha noe negativ innvirkning på analysen da problemet med trafikkavvikling var stort selv med den reduserte trafikkmengden. Ved å gjennomføre samme registrering i en

av sommermånedene med mer trafikk, ville nok problemet bli noe større, men trafikkmengden i februar ble ansees som tilstrekkelig for å få frem poenget.

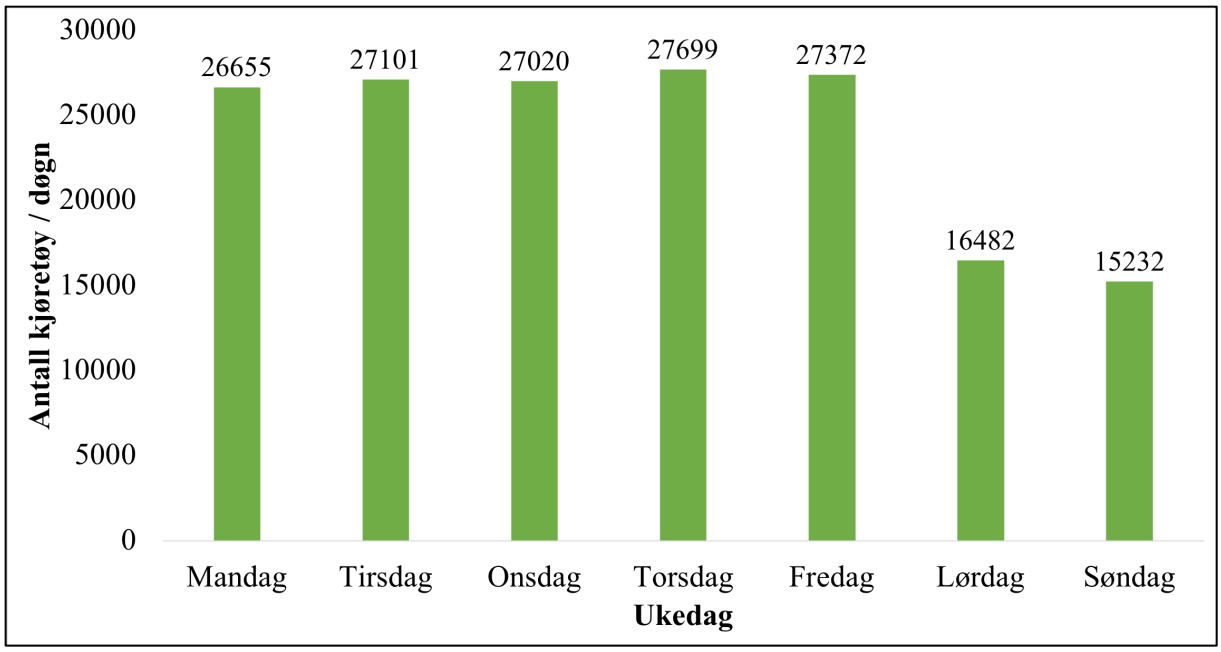


Figur 65: Døgnvariasjon for en veg i kategorien M2 (Vegdirektoratet, 2014c).

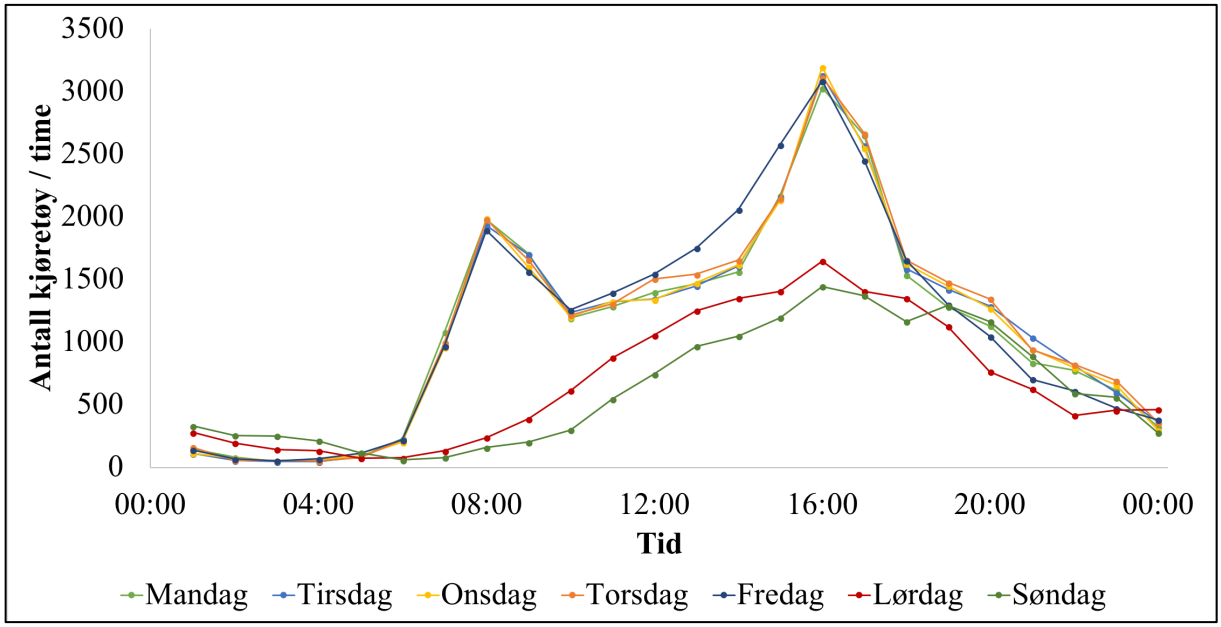
Nærmeste tellepunkt til delstrekningen fra Tonstadkrysset til forbi City Syd, er tellepunkt 1601405 Kroppan bru. Dette tellepunktet har data fra 2017 som geodataseksjonen i Statens vegvesen har gitt tilgang til. Figur 66 og Figur 67 viser henholdsvis uke- og døgnvariasjonen fra dette tellepunktet i uke 5 i 2017, samme uke som registreringene ble gjennomført, bare ett år tidligere. Ved å sammenligne Figur 64, Figur 65, Figur 66 og Figur 67, kan man se at det ser ut til å stemme at strekningen kan regnes som en veg i kategorien M2.

Som nevnt i metodekapittelet, ble fredag valgt som registreringsdag grunnet at køproblemene startet tidligere. Dette kan man se at stemmer overens med dataene fra tellepunktet i Figur 67 hvor antall kjøretøy per time øker tidligere på fredagen.

Ved å se på ukevariasjonen i Figur 64 og Figur 66, kan man se at alle hverdagene har tilnærmet lik trafikkmengde. Valg av hverdag for gjennomføring av registreringer ville derfor hatt lite å si for sluttresultatet. At videoregistreringene ble gjennomført på en fredag, så derfor ut til å være greit.



Figur 66: Ukevariasjon for uke 5 i 2017 for tellepunkt 1602405 Kroppan bru.



Figur 67: Døgnvariasjon i uke 5 i 2017 for tellepunkt 1602405 Kroppan bru.

Generelt om videoregistreringene

For å finne ut hva som fungerer og hva som ikke fungerer, kunne det vært hensiktsmessig å gjennomføre en pilotstudie da man har erfart at ikke alt var optimalt med registreringene som ble gjort.

Selv om kameraene var plassert helt greit, kunne de med fordel vært plassert bedre. Dette gjelder spesielt kameraet som ble plassert på støygjerdet i retning Klett. Dette kameraet sto for

langt unna fletteprosessen til at man fikk en god nok oversikt til å med en viss sikkerhet kunne si at alle kjøretøyene ble registrert. For å ha et bedre utgangspunkt for å generere inngangsdata til modellen i Aimsun, hadde det vært en fordel om kameraene var plassert slik at de også filmet etterspørselen, og ikke bare avviklet trafikk i fletteprosessene.

I løpet av registreringsperioden burde også vegene i tilknytning til registreringsområdet blitt filmet, slik at man kunne hatt korrekte data på trafikken i rundkjøringen ved City Syd, og dermed også sett hvor mange det var som benyttet seg av muligheten til å snike seg forbi køen på broen.

I tillegg til at kølengder burde blitt registrert for å kunne lage realistiske variasjonskurver, burde det også blitt filmet helt til køen på strekningen var oppløst for å få frem situasjonen med fri flyt – kø – fri flyt.

Dersom området på Tiller hadde vist seg å være et godt utgangspunkt for innsamling av data, hadde det vært fordelaktig med flere dager med registreringer for å få en god oversikt over flaskehalsen og hva som skjer rundt den. Siden strekningen var preget av tilbakeblokkeringer, ble det derimot valg å ikke gjennomføre flere registreringer der, men heller bruke tiden på å jobbe med dataene som allerede var samlet inn.

Databehandling

At samme person har gjort alt av registreringer sørger for at eventuelle feil som er gjort, gjelder alt av registreringer, og at det dermed blir en stabil feilkilde sammenlignet med om det hadde vært flere personer som registrerte på ulike måter.

Å få registrert alle kjøretøyene riktig viste seg uansett å bli utfordrende, men ved hjelp av Python ble det litt mindre manuelt arbeid, og sannsynligheten for menneskelige feil minket. Skriptet i Python ble startet samtidig som filmene ble satt på play. Dette ga forholdsvis nøyaktige tidspunkt for når kjøretøyene passerte et bestemt punkt på vegen. Feilkilden her er eventuelle forsinkelser i når undertegnede trykket inn knappen for å registrere kjøretøyet. Å få registrert kjøretøyene enkeltvis på denne måten var fordelaktig sammenlignet med den manuelle metoden som samlet opp kjøretøy over intervaller på fem minutter da det gjorde det lettere å arbeide videre med registreringene etterpå.

5.4.2 Flettemodell i Microsoft Excel

Denne flettemodellen ble i hovedsak laget i håp om å generere noen resultater da det som ble gjort tidligere i masteroppgaven ikke så ut til å gi noe brukbart. Det ble derfor ikke lagt vekt på å utarbeide en fullverdig modell, men heller et forslag til en modell som kan bygges videre på ved en senere anledning.

Modellen viser, som nevnt tidligere, blant annet hvordan et kapasitetsfall kan ha innvirkning på avviklingen av trafikken i et vegnettverk. I modellen er det en forenkling som sier at kjørefeltene til enhver tid vil ha tilgang på halve kapasiteten hver uavhengig av forskjell i trafikkmengde. Dette er en svakhet i modellen. Selv om det ene kjørefeltet ikke utnytter sin fulle kapasitet, kan ikke det andre kjørefeltet bruke den ubenyttede kapasiteten. Dette kan stemme ved cirka like store trafikkmengder, men vil være urealistisk dersom det er store forskjeller mellom trafikkmengden i kjørefelt 1 og 2. I forsøkene gjort med modellen i denne studien, er det benyttet noenlunde like trafikkmengder slik at denne svakheten ikke skal ha en innvirkning på resultatene.

Kapittel 6

Konklusjon og videre arbeid

I dette kapittelet oppsummeres resultatene og diskusjonen til en konklusjon for den utførte studien. Til slutt foreslås forslag til videre arbeid innenfor problemstillingsområdet.

6.1 Konklusjon

Denne studien har undersøkt hva som foregår før, i og etter en flaskehals hvor to kjørefelt flettes sammen til ett, samt hva som kan være med på å skape en mer effektiv trafikkflyt gjennom flaskehalser. Det har også blitt vurdert om trafikksimuleringsverktøyet Aimsun 8.2.0 kan benyttes til å evaluere effektene av ulike parameterendringer som førerens aggressivitet og grad av samarbeid.

Hovedfunnene i denne studien er at Aimsun ikke ser ut til å klare å simulere situasjonen hvor to kjørefelt flettes sammen til ett kjørefelt på en god nok måte til å kunne se på hvordan endringer av ulike parametere påvirker effektiviteten av en fletteprosess. Hvordan avviklingen i en fletteprosess er, ser ut til å i stor grad avhenge av hva som foregår før flaskehalsen da dette forplantes videre i prosessen. En tendens til tidlig fletting i stedet for glidelåskjøring kan være mye av årsaken til at fletteprosessen i dag er langt under sitt effektivitetspotensiale. Kjøretøyenes plassering i forhold til hverandre før innsnevringspunktet kan også være en grunn til forvirring rundt hvilken luke som «tilhører» hvilket kjøretøy, noe som skaper unødvendig nedbremsing og forsinkelser. Dårlig avvikling i flettepunktet kan gi større tidsluker enn nødvendig nedstrøms flaskehalsen, og et lavere gjennomstrømningsvolum.

En innføring av nye og mer forklarende trafikkskilt, samt kampanjer om hva glidelåskjøring er og bedre utforming av flettestrekningene (mer som en flaskehals, og ikke som et kjørefelt som avsluttes) kan være det grunnleggende som må til for å få en mer effektiv fletteprosess.

6.2 Videre arbeid

For å bedre besvare forskningsspørsmålene, må det videre arbeid til. I hovedsak går dette ut på å finne ut om Aimsun faktisk kan benyttes til å simulere glidelåskjøring, og i så fall hvordan det best kan gjøres. Det går også ut på å kartlegge trafikanters kunnskap om og oppfatning av fletting og glidelåskjøring. Dersom Aimsun ikke kan benyttes, vil en utarbeidelse av en flettemodell som den foreslått i underkapittel 5.3.2 Forslag til modell for fletting i Aimsun være av stor nytte. Som nevnt i underkapittel 5.4.2 Flettemodell i Microsoft Excel, bør også denne modellen arbeides mer med. Dette gjelder blant annet variasjon i tilgjengelig kapasitet for trafikkstrømmene og verifisering og validering av modellen med for eksempel videoregistreringer.

6.2.1 Spørreundersøkelse

For å kartlegge hva slags kunnskap og meninger trafikanter har om sammenfletting når det kommer til bruk av skilt, utforming av vegen og når og hvordan man skal flette, kan det utføres en spørreundersøkelse.

I en slik spørreundersøkelse vil det være naturlig å finne ut hva folk tror skiltene vi benytter i dag betyr, samt hvordan de eventuelt hadde stilt seg til innføring av nye skilt. Ville innføring av skilt som vist i Figur 7 fått førerne til å flette ved flettepunktet og ikke tidligere som ved skiltet om forvarsling av sammenfletting?

Å kartlegge hvor stor andelen som legger seg inn tidlig er, sammenlignet med andelen som velger å kjøre helt frem før de legger seg inn, samt hva man lærer om fletting i trafikkopplæringen ved kjøreskolene rundt om i landet, kan også være interessant.

Referanser

Akcelik, R. (2007) *Microsimulation and Analytical Models for Traffic Engineering – Presentation at the ARRB – AUSTROADS Microsimulation Forum*

Aimsun (2017) *Aimsun Next*. Tilgjengelig fra: https://www.aimsun.com/ (Hentet: 17. desember 2017)

Alberta Motor Association (2017) *Zipper Merge Demonstration (film).* Tilgjengelig fra: https://www.youtube.com/watch?v=cX0I8OdK7Tk&feature=youtu.be (Hentet: 20. desember 2017)

Bang, B. (2016) Trafikksimulering av kø i by. *Teknologidagene 2016,* Trondheim: Statens Vegvesen. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/1563780/binary/1137886?fast_title=03+Mikrosimulering+av+trafikkavvikling+i+by.pdf (Hentet: 17. desember 2017)

Bedrebilist.dk. *Trafiktavler.* Tilgjengelig fra: https://www.bedrebilist.dk/trafiktavler-vejskilte/ (Hentet: 13. mai 2018)

Bertini, R. L. og Leal, M. T. (2005) Empirical Study of Traffic Features at a Freeway Lane Drop. *Journal of Transportation Engineering,* 131(6), 379-407

Blakstad, F. (1993) *Kompendium i trafikkteknikk.* Utgave 3. Trondheim: Tapir forlag

Blakstad, F. (1995) *Anvendt statistikk for trafikkingeniører.* Trondheim: Tapir forlag

Buisson, C., Daamen, W., Punzo, V., Wagner, P., Montanino, M. og Ciuffo, B. (2014) Calibration and validation principles, i Daamen, W., Buisson, C. og Hoogendoorn, S. P. (red.) *Traffic Simulation and Data.* Utgave 1. Boca Raton: CRC Press, s. 89-117

Cassidy, M. J. og Bertini, R. L. (1999) Some traffic features at freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B,* 33, 25-42

Cassidy, M. J. og Rudjanakanoknad, J. (2002) *Study of Traffic at Freeway Merge and Roles for Ramp Metering.* US Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology.

Chen, D. og Ahn, S. (2018) Capacity-drop at extended bottlenecks: Merge, diverge, and weave. *Transportation Research Part B,* 108, 1-20

Chen, D., Ahn, S., Laval, J og Zheng, Z. (2014) On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: The role of driver characteristics. *Transportation Research Part B,* 59, 117-136

Colorado Department of Transportation. *GIF.* Tilgjengelig fra: https://www.codot.gov/library/traffic/signing-and-pavement-markings/sign-library-files/Construction/gif (Hentet: 22. juni 2018)

Department for Transport (2018) *The Highway Code.* Tilgjengelig fra: https://www.gov.uk/guidance/the-highway-code/traffic-signs (Hentet: 29. juni 2018)

Euroskilt. *Opplysningsskilt*. Tilgjengelig fra: http://euroskilt.no/skilt/trafikkskilt/opplysningsskilt (Hentet: 13. desember 2017)

Flügel, S., Voll, N. G. og Bockemühl, F. (2014) *Ny og bedre metode for å beregne trafikkavvikling*. Tilgjengelig fra: https://samferdsel.toi.no/pa-veien/ny-og-bedre-metode-for-a-beregne-trafikkavvikling-article32606-1426.html (Hentet: 16. desember 2017)

Færdselsloven (1976) Tilgjengelig fra: http://vejregler.lovportaler.dk/showdoc.aspx?schultzlink=lov19760287 (Hentet: 25. april 2018)

Garmin. *VIRB® X/XE Owner's Manual.* Tilgjengelig fra: http://www8.garmin.com/manuals/webhelp/virbx-xe/EN-US/GUID-1A130AC5-1FEC-46ED-AFF5BE2715CE8B99-homepage.html (Hentet: 16. desember 2017)

Gipps, P. G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological,* 15, 105-111.

Gopro. *Hero 5 black User Manual.* Tilgjengelig fra: https://gopro.com/content/dam/help/hero5-black/manuals/HERO5Black_UM_ENG_REVC_Web.pdf (Hentet: 16. desember 2017)

Jin, W. L., Gan, Q. J. og Lebacque, J. P. (2015) A kinematic wave theory of capacity drop. *Transportation Research Part B,* 81, 316-329

Kansas Department of Transportation (2016) *Kansas City Metro*. Tilgjengelig fra: https://www.ksdot.org/bureaus/kcmetro/zipper-merge.asp (Hentet: 8. juni 2018)

May, A. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. New Jersey: Prentice Hall

Miljødirektoratet (2014) *Kilder til luftforurensning.* Tilgjengelig fra: http://www.miljokommune.no/Temaoversikt/Forurensing/Luftkvalitet/Luftkvalitet-i-arealplanlegging/Kilder-til-luftforurensning/ (Hentet: 18. juni 2018)

Miljødirektoratet (2018) *Bedre luftkvalitet i 2017 enn året før.* Tilgjengelig fra: http://www.miljodirektoratet.no/no/Nyheter/Nyheter/2018/April-2018/Bedre-luftkvalitet-i-2017-enn-aret-for/ (Hentet: 18. juni 2018)

Minnesota Department of Transportation (2018) *What is a zipper merge?* Tilgjengelig fra: https://www.dot.state.mn.us/zippermerge/ (Hentet: 24. mai 2018)

Missouri Department of Transportation (2016) *Twittermelding.* Tilgjengelig fra: https://twitter.com/MoDOT/status/759024641730080768 (Hentet: 22. juni 2018)

North Carolina Department og Transportation (2016) *State Studying «Zipper Merge» to Help Reduce Congestion at Emerald Isle.* Tilgjengelig fra: https://apps.ncdot.gov/newsreleases/details.aspx?r=12682 (Hentet: 10. juni 2018)

Sagen, R. (1993) *Trafikkstrømsteori.* Trondheim: Institutt for samferdselsteknikk, Norges tekniske høgskole

Skiltforskriften (2005) Forskrift om offentlige trafikkskilt, vegoppmerking, trafikklyssignaler og anvisninger *(skiltforskriften)*. Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2005-10-07-1219 (Hentet: 13. mai 2018)

Spiller, N., Blissard, K. Og Margiotta, R. (2017) *Recurring Traffic Bottlenecks: A Primer, Focus on Low-Cost Operational Improvements, Fourth Edition* (FHWA-HOP-18-013). Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Tilgjengelig fra: https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop18013/chap2.htm (Hentet: 10. juni 2018)

Statens vegvesen. *Vegkart.* Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/vegkart (Hentet: 11. februar 2018)

Statens vegvesen (2012) *Følg med og kutt køene.* Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/nasjonalt/følg-med-og-kutt-køene (Hentet: 21. juni 2018)

Statens vegvesen (2016) *Om prosjektet.* Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/Europaveg/e6trondheim/om-prosjektet (Hentet: 13. desember 2017)

Statens vegvesen (2017) *Vegtrafikkindeksen 2016.* Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/1705837/binary/1161150?fast_title=Vegtrafikkindeksen+2016.pdf (Hentet: 15. desember 2017)

Svensk författningssamling (2017) *Förordning om ändring i vägmärkensförordningen (2007:90).* Tilgjengelig fra: http://rkrattsdb.gov.se/SFSdoc/17/170923.PDF (Hentet: 22. mai 2018)

Trafikkregeler (1986) Forskrift om kjørende og gående trafikk *(trafikkregler)*. Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1986-03-21-747 (Hentet: 13. desember 2017)

Trafikförordning (1998) *Trafikförordning (1998:1276).* Tilgjengelig fra: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/trafikforordning-19981276_sfs-1998-1276 (Hentet: 22. mai 2018)

Trafiksäkerhet (2018) Tilgjengelig fra: http://www.trafiksakerhet.se (Hentet: 5. juni 2018)

TranBC (2013) *How to merge safely on a Highway.* Tilgjengelig fra: https://www.tranbc.ca/2013/01/02/how-to-merge-safely-on-a-highway/ (Hentet: 22. juni 2018)

Transportation Research Board (2016) *Highway Capacity Manual – A Guide for Multimodal Analysis*. Utgave 6. Washington, D. C.

Transportation Simulation Systems (2018) *Aimsun 8.2 User's Manual.* Barcelona: TSS

Treiber, M. og Kesting, A. (2013) *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation,* Berlin: Springer Heidelberg

Tøi (1980) *Trafikksikkerhetshåndboken.* Tilgjengelig fra: https://tsh.toi.no (Hentet: 11. desember 2017)

U.S. Department of Transportation (2009) *Manual on Uniform Traffic Control Devices – For Streets and Highways (2009 Edition).*

Vägverket (2004) Vägar och gators utformning (VGU) Vägmärken. Tilgjengelig fra: https://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga_och_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument_vag_och_gatuutformning/Vagar_och_gators_utformning/Vagmarken/vagmarken.pdf (Hentet: 2. juni 2018)

Vegdirektoratet (2014a) Håndbok N100 Veg- og gateutforming

Vegdirektoratet (2014b) Håndbok N300 Trafikkskilt, Del 3 Forbudsskilt, påbudsskilt, opplysningsskilt og skilt med trafikksikkerhetsinformasjon

Vegdirektoratet (2014c) Håndbok V714 Veileder i trafikkdata

Vegdirektoratet (2015) Håndbok N302 Vegoppmerking, Tekniske bestemmelser og retningslinjer for anvendelse og utforming

Vejdirektoratet (2010) Anvendelse af mikrosimuleringsmodeller.

Vejdirektoratet (2015) Håndbog Kapacitet og serviceniceau

Vejdirektoratet (2018) Håndbog Tavleoversigt

Aakre, A. (2017a) Samtale med Arvid Aakre med referering til intervju med han gjort av Espen Stensrud for Din Side. *Slik kjører du RIKTIG i kø.* Tilgjengelig fra:

https://www.dinside.no/motor/slik-kjorer-du-riktig-i-ko/68526718 (Hentet: 20. desember 2017)

Aakre, A. (2017b) Basic traffic terms and relations. *TBA4286 Trafikkavvikling og ITS*, Trondheim: NTNU

Aakre, A. (2017c) Traffic Flow Theory – part 1 Macroscopic models. *TBA4286* Trafikkavvikling og ITS, Trondheim: NTNU

Aakre, A. (2017d) Traffic simulation and AIMSUN. *TBA4286 Trafikkavvikling og ITS*, Trondheim: NTNU

Aakre, E. (2015) *AIMSUN – samling av forskningsnotater fra Trafikkteknisk senter i 2015*

Vedlegg

Følgende dokumenter er vedlagt elektronisk til oppgaven i en zip-fil:

- Python-skript benyttet til registreringene «telle.py»
- Data fra registreringene «Registreringer.xlsx»
- Flettemodell i Microsoft Excel «Flettemodell.xlsx»
- Data fra kjøreturene «GPS data.xlsx»
- Data fra fiktive matriser «Fiktive matriser.xlsx»
- Aimsun-modell med fire sentroider «Modell1.ang»
- Aimsun-modell med tre sentroider «Modell2.ang»
- Fiktiv modell med fiktive data i Aimsun «Modell3.amg»
- Aimsun-modell benyttet til test av nødvendig antall replikasjoner «Modell4.ang»
- Data fra test av endringer av parametere i Aimsun «Parametertest.xlsx»