

Siri Vølstad Jensen

# Trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser på smal 4-felts motorveg

Effekten av redusert skulderbredde og trafikkstyring ved hjelp av ITS

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arvid Aakre

Juni 2021



Siri Vølstad Jensen

# **Trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser på smal 4-felts motorveg**

Effekten av redusert skulderbredde og trafikkstyring ved hjelp av ITS

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk  
Veileder: Arvid Aakre  
Juni 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk





# Sammendrag

---

Investeringer i det norske vegnettet utgjør store årlige kostnader for samfunnet, og målet er hele tiden at man bygger bedre, sikrere og mer samfunnsøkonomisk lønnsomme veier. For å redusere kostnader knyttet til nye veier er det stadig et behov for å utforske hvilke kostnader det er mulig å kutte ned på, og om det finnes teknologi man kan ta i bruk for å kunne gjøre dette uten at det går på bekostning av kvaliteten på veien. De siste årene har myndighetene og aktører innen fagfeltet forsøkt å ta stilling til om reduksjon av skulderbredden på nye 4-felts motorveier kan bidra til å redusere kostnader uten at dette går på bekostning av trafikantenes sikkerhet og uten at kvaliteten på trafikkavviklingen svekkes. Trafikkstyring ved hjelp av variable skilter sammen med automatisk hendelsesdeteksjon er nevnt som et mulig avbøtende tiltak for de negative konsekvensene en redusert vegskulder kan medføre, uten at det refereres til nyere studier som er gjennomført for å bekrefte effekten av dette på norske veier.

I denne studien brukes mikrosimuleringer ved hjelp av Aimsun Next til å utforske ulike effekter av både redusert skulderbredde og bruken av et ITS-tiltak (intelligent transport-system) med variable skilt for reduksjon av fartsgrense og stenging av kjørefelt når en hendelse oppstår på veien. Som en del av studien er det nødvendig å utvikle en metode som gjør at man kan simulere hendelser som blokkerer kjørefelt i ulik grad. Simuleringsforsøkene tar sikte på å kartlegge hvordan ytelsesparametre knyttet til trafikkavvikling og risikoen for sekundære hendelser endres ved ulike kombinasjoner av skulderbredde, hendelsestype, hendelsesvarighet, trafikketterspørsel, og om man benytter ITS-tiltaket eller ikke.

Simuleringene som er gjennomført medfører en god del usikkerhet ettersom metoden for å simulere hendelser som blokkerer kjørefelt delvis baserer seg på flere ulike antakelser og estimer. Metoden er likevel vurdert som nyttig for å si noe om hvordan ytelsesparametrene endres ved ulike scenarioer, og resultatene kan dermed si noe generelt om effekten av skulderbredde og ITS-tiltak.

Resultatene fra simuleringene tilsier at man har utfordringer med å opprettholde både trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser når man reduserer skulderbredden fra dagens standard på 2,75 meter til 1,5 meter. Den negative effekten ser ut til å øke med økt trafikketterspørsel på veien. Resultatene indikerer at ved trafikketterspørsel rundt 500 kjt/t er forskjellene mellom skulderbreddene 2,75 meter og 1,5 meter relativt små, mens når etterspørselen er større (1000 kjt/t og 1500 kjt/t) vil man i flere tilfeller få store problemer med trafikkavviklingen og økt risiko for sekundære hendelser ved smal skulder. Bruken av smal skulder bør dermed vurderes ut fra hvilke trafikketterspørsler man forventer å ha på den aktuelle vegstrekningen. Bruk av ITS-tiltaket når man har smal skulder ser ut til å stort sett medføre mer negative konsekvenser i de tilfellene der et kjøretøy er stoppet nærmere enn 0,5 meter fra rekkverk eller vegkant, mens tiltaket virker positivt når det stoppede kjøretøyet ikke har mulighet til å stå like langt ut mot kanten. Hvor stor effekten er vil også her være avhengig av trafikketterspørselen. ITS-tiltaket vurderes til å ha en generelt positiv effekt på sikkerheten til de involverte i hendelsen og eventuelle opprydnings- eller helsepersonell på hendelsesstedet, ettersom hastigheten forbi hendelsen reduseres og man dirigerer bort kjøretøy fra det berørte kjørefeltet.



# Abstract

---

Investment costs connected to the Norwegian road network represent major annual costs for society. The investment goals are at all times focused on building better, safer, and more socio-economically beneficial roads. To limit the costs of new roads, there is a constant need for exploration of possible cost-reducing measures and available technology that can be utilized to ensure that the quality of the roads is maintained despite these measures. The Norwegian Government, and various actors within the field of roads and transportation, have in recent years attempted to investigate whether reducing the width of the hard shoulders on new four-lane freeways can be used as a cost-reducing measure without reducing the safety of road users and the quality of traffic flow. Traffic management using variable signs and automatic incident detection has been mentioned as a possible countermeasure for the negative consequences that reduced shoulder width could lead to as an incident occurs, without referring to newer studies that confirm the effect this could have on Norwegian roads.

In this study, microsimulations using Aimsun Next have been conducted to explore various effects of reduced shoulder width and the use of an ITS measure (Intelligent Transport System) that includes variable signs that reduce the speed limit and closes affected lanes when an incident occurs on the road. A method for simulating incidents that block lanes to various extents is proposed to be able to create different incident scenarios. The study attempts to explore how different measures of effectiveness concerning the quality of traffic flow and the risk of secondary incidents vary with different combinations of shoulder width, type of incident, incident duration, traffic demand, and whether or not the ITS measure is activated.

The simulations involve uncertainty induced by the method for simulating incidents that partly block a lane being largely based on assumptions and estimations. The method is still considered useful in saying something about how the measures of effectiveness change for different scenarios, thus the results can contribute to a general assessment of the effect of shoulder width and the ITS measure in question.

The simulation results indicate that reducing the shoulder width from the present standard of 2.75 meters to 1.5 meters would create challenges when it comes to maintaining both the quality of traffic flow and safety when an incident occurs. The negative effects seem to be increasing with increased traffic demand. The results indicate that the difference in performance between the shoulder widths when the traffic demand is about 500 veh/h is relatively small, while there seem to be major traffic flow issues and an increased risk of secondary incidents in some instances when the demand is larger (1000 veh/h and 1500 veh/h) and the shoulder is narrow. Thus, the use of narrow shoulders should be considered based on the traffic demands that are expected to occur on the road in question. Using the ITS measure when the shoulder is narrow seems to mostly cause negative consequences when the incident involves a vehicle that is stopped closer than 0,5 meters from the railing or edge of the road, while the measure has a positive effect when the stopped vehicle is further from the edge. The ITS measure is also considered to have a positive effect on the safety of the parties involved in the incident, including the response team, because of the reduced speed past the incident and the absence of traffic flow in the affected lane.



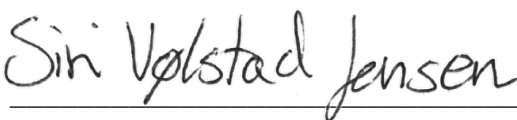
# Forord

---

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Forarbeid er gjennomført som en del av en prosjektoppgave utarbeidet høsten 2020, og selve masteroppgaven er utført våren 2021. Deler av det teoretiske grunnlaget som ble skrevet som en del av prosjektoppgaven er brukt i denne oppgaven. Prosjektoppgaven er inkludert som en del av de digitale vedleggene.

Først og fremst vil jeg takke veilederen min, Arvid Aakre, for god hjelp og oppfølging under arbeidet. I tillegg vil jeg takke Per Tore Torgersen i Multiconsult for tilsending av relevant litteratur og høringer knyttet til temaet, samt Trond Foss i SINTEF og Randi Eggen i Statens Vegvesen for tilsending av relevant litteratur. Jeg vil også takke Gavin Jackman i Aimsun, som tok seg tid til å hjelpe meg når jeg satt fast med hvordan det hele kunne utføres i Aimsun. Takk til Aimsun Next for tilgang til tilleggslisens for å kunne teste ut mulighetene knyttet til bruken av API i oppgaven.

Trondheim, juni 2021



Siri Vølstad Jensen

# Innholdsfortegnelse

---

<b>1. Introduksjon .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Bakgrunn .....</i>	1
1.2 <i>Hypotese og forskningsspørsmål .....</i>	3
1.3 <i>Avgrensninger og omfang .....</i>	3
1.4 <i>Rapportens oppbygning .....</i>	4
<b>2. Teoretisk grunnlag .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Vegskulder .....</i>	5
2.1.1 <i>Generelt .....</i>	5
2.1.2 <i>Hensikten med vegskuldre .....</i>	6
2.2 <i>Hendelser i trafikken .....</i>	6
2.2.1 <i>Generelt .....</i>	6
2.2.2 <i>Nødstopp og ulykker .....</i>	7
2.2.3 <i>Sekundære hendelser .....</i>	9
2.2.4 <i>Kapasitet ved hendelser .....</i>	10
2.3 <i>Intelligente transportsystemer (ITS) .....</i>	13
2.3.1 <i>Generelt .....</i>	13
2.3.2 <i>Active Traffic Management (ATM) og Traffic Incident Management (TIM) .....</i>	13
2.3.3 <i>Automatic Incident Detection (AID) .....</i>	14
2.3.4 <i>Retningslinjer og standarder .....</i>	18
2.4 <i>AIMSUN som simuleringsverktøy for hendelser i trafikken .....</i>	19
2.4.1 <i>Bygging av basismodell i Aimsun Next 20 .....</i>	19
2.4.2 <i>Trafikketerspørsel .....</i>	20
2.4.3 <i>Scenarier .....</i>	20
2.4.4 <i>Vehicle Entry .....</i>	21
2.4.5 <i>Gipps car-following modell .....</i>	22
2.4.6 <i>Lane-changing modell .....</i>	23
2.4.7 <i>Trafikkstyring i Aimsun .....</i>	23
2.4.8 <i>Begrensninger .....</i>	25
<b>3. Metode .....</b>	<b>26</b>
3.1 <i>Bakgrunn for metodevalg .....</i>	27
3.2 <i>Utvikling av metode .....</i>	28
3.3 <i>Nettverket .....</i>	29
3.4 <i>Scenarier .....</i>	30
3.4.1 <i>Generelt .....</i>	30

3.4.2	Trafikketterspørsel.....	32
3.4.3	Varighet .....	33
3.4.4	Skulderbredde.....	33
3.4.5	Hendelse .....	34
3.4.6	Tiltak .....	40
3.5	<i>Kalibrering av basismodellen .....</i>	41
3.6	<i>Estimering av hastigheter ved kapasitetsreduksjon.....</i>	43
3.6.1	Uttrykk for justering av speed-flow-forholdet .....	43
3.6.2	Oppsett av scenarier i Aimsun .....	51
3.7	<i>Ytelsesparametre .....</i>	52
3.8	<i>Dataanalyse .....</i>	53
3.8.1	Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen.....	53
3.8.2	Gjennomsnittlig forsinkelse for kjøretøy .....	53
3.8.3	Kø .....	53
3.8.4	Stopp.....	54
3.8.5	Feltskifter .....	54
3.9	<i>Usikkerhet og feilkilder .....</i>	55
3.9.1	Generelt .....	55
3.9.2	Usikkerhet knyttet til stokastiske modeller.....	56
<b>4.</b>	<b>Resultater.....</b>	<b>58</b>
4.1	<i>Estimat av kapasitet og hastigheter.....</i>	58
4.2	<i>Trafikkavvikling.....</i>	60
4.2.1	Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen.....	60
4.2.2	Gjennomsnittlig forsinkelse.....	77
4.2.3	Kø .....	80
4.3	<i>Trafikksikkerhet .....</i>	82
4.3.1	Antall stopp .....	82
4.3.2	Forsinkelse på grunn av stopp.....	83
4.3.3	Antall feltskifter.....	84
<b>5.</b>	<b>Diskusjon.....</b>	<b>87</b>
5.1	<i>Metode for modellering av hendelser .....</i>	87
5.2	<i>Trafikkavvikling.....</i>	89
5.2.1	Effekten av skulderbredde .....	89
5.2.2	Effekten av ITS-tiltak .....	91
5.3	<i>Trafikksikkerhet .....</i>	94
5.3.1	Effekten av skulderbredde .....	94
5.3.2	Effekten av ITS-tiltak .....	96
<b>6.</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>99</b>

6.1	<i>Videre arbeid</i> .....	101
<b>7.</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>102</b>
<b>8.</b>	<b>Vedlegg</b> .....	<b>106</b>



# Figurer

---

Figur 1.1 Tverrprofil for dimensjoneringsklasse H3 (Figur C4, Statens Vegvesen, 2019b, s. 39) .....	1
Figur 1.2 Tverrprofil for dimensjoneringsklasse H8 (2013) (Figur 1, Statens Vegvesen, 2019a, s. 8).....	2
Figur 2.1 Faser av en hendelse, basert på J.Javid og Jahanbakhsh Javid (2018) .....	7
Figur 2.2 Generelt forhold mellom volum, hastighet og tetthet (Exhibit 7-2, TRB, 2000, s. 7-5).....	12
Figur 3.1 Flytdiagram for metoden.....	27
Figur 3.2 Illustrasjon av nettverket.....	29
Figur 3.3 Scenarioer .....	31
Figur 3.4 Trafikkprofil for simuleringsperioden.....	32
Figur 3.5 Trafikkvolum ved T1, T2 og T3 .....	33
Figur 3.6 Illustrasjon av posisjonering av kjøretøy ved nødstop på veg, med aktuelle mål .....	35
Figur 3.7 Illustrasjon av H1_S1 .....	37
Figur 3.8 Illustrasjon av H1_S2 .....	37
Figur 3.9 Illustrasjon av H2_S1 .....	38
Figur 3.10 Illustrasjon av H2_S2 .....	38
Figur 3.11 Illustrasjon av H3_S1 .....	39
Figur 3.12 Illustrasjon av H3_S2 .....	39
Figur 3.13 Illustrasjon av H4_S1 .....	40
Figur 3.14 Illustrasjon av H4_S2 .....	40
Figur 3.15 Illustrasjon av ITS-tiltak.....	40
Figur 3.16 Hastighet ved maksimal gjennomstrømning ved ulike CAF.....	44
Figur 3.17 Trafikktetthet ved maksimal gjennomstrømning vs. CAF .....	45
Figur 3.18 Hastighetsdifferanse mellom simulert og teoretisk vs. kapasitetsutnyttelse - høyre kjørefelt .....	46
Figur 3.19 Hastighetsdifferanse mellom simulert og teoretisk vs. kapasitetsutnyttelse - venstre felt .....	47
Figur 3.20 Justert speed-flow-kurve, høyre kjørefelt .....	48
Figur 3.21 Justert speed-flow-kurve, venstre kjørefelt.....	49
Figur 3.22 Andel av trafikkvolum i høyre kjørefelt.....	50
Figur 3.23 Flytskjema for estimering av hastigheter.....	51
Figur 4.1 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_H1_T1 .....	61
Figur 4.2 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_H1_T2 .....	61
Figur 4.3 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_H1_T3 .....	62
Figur 4.4 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals 08:00-09:00 - V1_H163	
Figur 4.5 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_T2_T1.....	63
Figur 4.6 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_H2_T2 .....	64

Figur 4.7 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_H2_T3 .....	64
Figur 4.8 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals 08:00-09:00- V1-H2	65
Figur 4.9 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen, V1_H3 .....	66
Figur 4.10 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehalsen 08:00-09:00 - V1_H3 .....	67
Figur 4.11 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1_H4.....	68
Figur 4.12 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals 08:00-09:00 - V1_H4 .....	69
Figur 4.13 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2_H1.....	70
Figur 4.14 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2_H1 .....	71
Figur 4.15 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2_H2.....	72
Figur 4.16 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2_H2 .....	73
Figur 4.17 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2_H3.....	74
Figur 4.18 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2_H3 .....	75
Figur 4.19 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2_H4.....	76
Figur 4.20 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2_H4 .....	77
Figur 4.21 Gjennomsnittlig forsinkelse - V1_H1 og V1_H2 .....	77
Figur 4.22 Gjennomsnittlig forsinkelse - V1_H3 og V1_H4 .....	78
Figur 4.23 Gjennomsnittlig forsinkelse - V2_H1 og V2_H2 .....	79
Figur 4.24 Gjennomsnittlig forsinkelse - V2_H3 og V2_H4 .....	79
Figur 4.25 Antall feltskifter per km - V1_H1 og V1_H2 .....	84
Figur 4.26 Antall feltskifter per km - V1_H3 og V1_H4 .....	85
Figur 4.27 Antall feltskifter per km - V2_H1 og V2_H2 .....	85
Figur 4.28 Antall feltskifter per km - V2_H3 og V2_H4 .....	86

# Tabeller

---

Tabell 2.1 Andel gjenstående kapasitet på motorveg ved ulike hendelser (Exhibit 22-6, TRB, 2000, s. 22-11) .....	11
Tabell 2.2 Verdier for MTTD, DR og FAR når AID er brukt på simulerte data. ....	15
Tabell 2.3 Verdier for MTTD, DR og FAR når AID er brukt på ekte datasett. ....	17
Tabell 2.4 Mulig tiltak/trafikkforhold/hendelser .....	24
Tabell 3.1 Parametre for kjøretøy endret fra standard verdi .....	42
Tabell 3.2 Reaksjonstider og observert kapasitet ved kalibrering .....	42
Tabell 3.3 Trendlinjer for ulike intervaller av kapasitetsutnyttelse – høyre kjørefelt.....	47
Tabell 3.4 Trendlinjer for ulike intervaller av kapasitetsutnyttelse - venstre kjørefelt....	48
Tabell 3.5 Avvik (d) i % ved 95% konfidensintervallet.....	57
Tabell 4.1 Estimerte kapasiteter .....	58
Tabell 4.2 Estimering av hastigheter, H1 .....	59
Tabell 4.3 Estimerte hastigheter for alle scenarioer, km/t .....	60
Tabell 4.4 Kødata ved varighet V1 .....	80
Tabell 4.5 Kødata ved varighet V2 .....	81
Tabell 4.6 Totalt antall stopp.....	82
Tabell 4.7 Gjennomsnittlig stopptid per kjøretøy (sek) .....	83
Tabell 5.1 Trafikkavvikling ved S2 sammenlignet med S1 .....	89
Tabell 5.2 Trafikkavvikling ved ITS-tiltak sammenlignet med S2.....	91
Tabell 5.3 Trafikksikkerhet ved S2 sammenlignet med S1.....	94
Tabell 5.4 Trafikksikkerhet ved ITS-tiltak sammenlignet med S2 .....	96

# Aktuelle forkortelser

---

<b>AID</b>	Automatic Incident Detection. Automatisk gjenkjennelse av hendelser på vegnettet.
<b>ATM</b>	Automatic Traffic Management. Automatisk styring av trafikken ved gjentakende avviklingsproblemer eller tilfeldig oppståtte hendelser.
<b>DR</b>	Detection Rate. Hvor stor del av faktiske hendelser som blir fanget opp av AID systemet.
<b>FAR</b>	False alarm rate. Hvor ofte det blir utløst alarm av AID systemet uten av det ha oppstått en hendelse.
<b>ITS</b>	Intelligente transportsystemer. «Anvendelse av informasjons- og kommunikasjonsteknologi og- tjenester innen transport og tilhørende infrastruktur» (Appel, Aakre og Kronborg, 2018, s. 9).
<b>MTTD</b>	Mean Time to Detect. Her brukt om den gjennomsnittlige tiden det tar før en AID har konstatert at en hendelse har forekommet på vegnettet.
<b>TIM</b>	Traffic Incident Management. Styring av trafikken ved tilfeldig oppståtte hendelser.
<b>TRB</b>	Transportation Research Board. Forskningsnemnd som er en del av den amerikanske organisasjonen National Academies of Science, Engineering, and Medicine.
<b>ÅDT</b>	Årsdøgntrafikk. Gjennomsnittlig antall kjøretøy på en veg i løpet av et døgn.

# 1

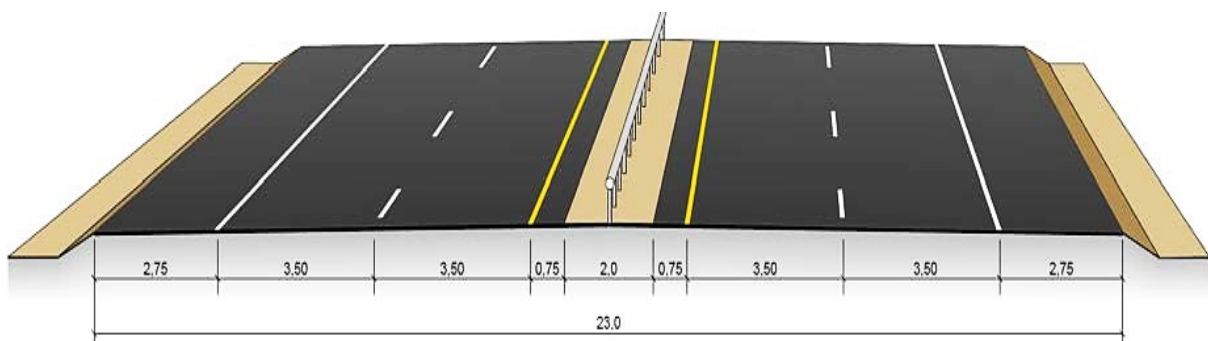
## Kapittel 1

# Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Transportsystemer utgjør en betydelig del av de årlige utgiftene for de fleste land, da effektiv og sikker mobilitet har høy prioritet i en moderne verden. I Norge sammenfattes planer for (og økonomiske aspekter av) drift, vedlikehold og investeringer knyttet til transportsystemer i Nasjonal Transportplan (NTP). I Nasjonal Transportplan for perioden 2018-2029 (Meld. St. 33 (2016-2017), 2017s. 22-11) oppgis det at regjeringen legger til grunn at rundt 933 milliarder kroner brukes til formål knyttet til transport gjennom tolvårsperioden, noe som tilsvarer omtrent 77,7 milliarder kroner per år. Av dette skal rundt 57% gå spesifikt til vegformål (Meld. St. 33 (2016-2017), 2017). Av dette igjen øremerkes omtrent 40% til investeringsformål.

Ettersom et av målene til Samferdselsdepartementet i perioden 2018-2029 er å binde sammen regioner og landsdeler ved å korte ned reisetider (Meld. St. 33 (2016-2017), 2017), er det naturlig at en stor del av ressursene går til kapasitetssterke veger på de travleste strekningene. I 2021 følger man Håndbok N100 Veg- og gateutforming (Statens Vegvesen, 2019b) sine dimensjoneringsstandarder for veger, og den mest kapasitetssterke dimensjoneringsklassen er H3. H3 er den eneste dimensjoneringsklassen for 4-felts veg i håndboken, og den benyttes for veger med årsgjennsnitttrafikk (ÅDT) på over 12 000 og legger til rette for en fartsgrense på 110 km/t, som er den høyeste lovlige i Norge per dags dato. Figur 1.1 viser tverrprofilen til en H3 veg.

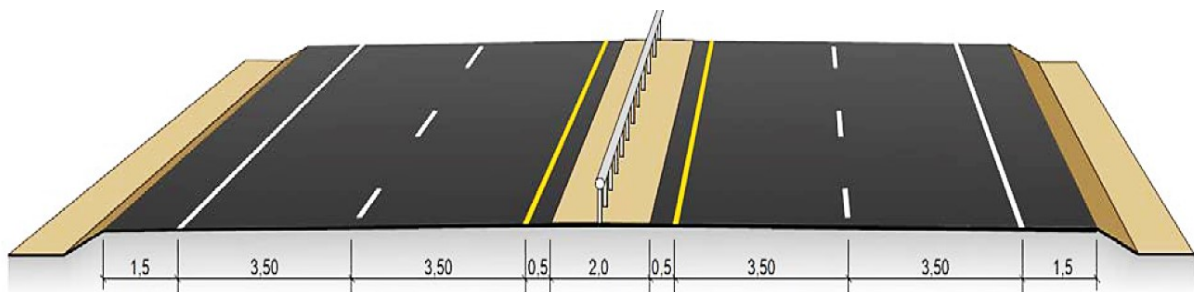


Figur 1.1 Tverrprofil for dimensjoneringsklasse H3 (Figur C4, Statens Vegvesen, 2019b, s. 39)

Med de store summene avsatt til vegformål tatt i betraktning, er det åpenbart viktig å redusere kostnadene for nye vegprosjekter der det er mulig å gjøre dette uten at det går ut over trafikksikkerhet og en effektiv avvikling av trafikken. Et naturlig spørsmål å stille seg når man ønsker å redusere disse kostnadene er om det er mulig å spare på «mengden» veg man må bygge for hver vegstrekning. Dersom det totale tverrsnittet til vegen er smalere vil man ha besparelser knyttet til at mindre mengder asfalt går med, man trenger

mindre mengder vegoverbygning, mindre fyllinger og skjæringer og man gjør mindre beslag på nyttige arealressurser.

De siste årene har reduksjon av vegens tverrprofil vært et sentralt tema i diskusjonen rundt nye motorvegprosjekter, og flere har ønsket å utfordre dagens standard for 4-felts motorveg ved å bruke reduserte skulderbredder. I Nasjonal Transportplan framgår det at dette bør vurderes etter hvert som det foreligger ytterligere erfaringstall knyttet til kostnad og nytte av en slik løsning (Meld. St. 33 (2016-2017), 2017). I den forbindelse ble Statens Vegvesen i mars 2019 bedt om å vurdere dette temaet for Samferdselsdepartementet, noe som resulterte i utarbeidelsen av *Utredning av smal 4-felts veg og standarder på veger med ÅDT 6000-20 000* (Statens Vegvesen, 2019a). I utredningen defineres smal 4-felts veg til å ha en total bredde på mellom 19 og 20,5 meter, og som håndfast eksempel vises det til dimensjoneringsklasse H8 som var gjeldende i den foregående versjonen av Håndbok N100. Denne dimensjoneringsklassen hadde ytre skulderbredde på 1,5 meter og indre skulderbredde på 0,5 meter, i motsetning til H3 i 2019-versjonen sine hhv. 2,75 meter og 0,75 meter. Det må også bemerkes at H8 fra 2013 forutsatte en fartsgrense på 100 km/t, mens utredningen vurderer om en slik veg kan brukes med en fartsgrense på 110 km/t. Figur 1.2 viser tverrprofilen til dimensjoneringsklasse H8.



Figur 1.2 Tverrprofil for dimensjoneringsklasse H8 (2013) (Figur 1, Statens Vegvesen, 2019a, s. 8)

I et brev til Samferdselsdepartementet datert 29.mai 2020 (Vegdirektoratet, 2020) presenterer Vegdirektoratet sine vurdering av bruken av smal 4-felts motorveg basert på Statens Vegvesens utredning og 35 høringsinnspill som har blitt tatt i betraktning. Som svar på spørsmålet om reduksjon av skulderbredde konkluderer Vegdirektoratet med at man bør kunne redusere skulderbredden på 4-felts motorveg til 1,5 meter dersom ÅDT er mindre enn 12 000, under forutsetningen at man da bruker avbøtende tiltak for de negative konsekvensene som dette eventuelt medfører (Vegdirektoratet, 2020). De mulige tiltakene som nevnes er nedskrivning av fartsgrense ved hendelser, regulering av trafikken i ulike kjørefelt, og automatisk hendelsesdeteksjon. Variable skilt som kan gjennomføre trafikkregulerende tiltak som nedsetting av fartsgrense og regulering av trafikken i ulike kjørefelt, sammen med automatisk hendelsesdeteksjon (Automatic Incident Detection – AID), omfattes gjerne av begrepet Intelligent Transportsystemer (ITS). ITS er definert som «anvendelse av informasjons- og kommunikasjonsteknologi og -tjenester innen transport og tilhørende infrastruktur» (Appel, Aakre og Kronborg, 2018, s.9).

I Nasjonal Transportplan står det: «Det handler om å følge utviklingen nøye og å legge til rette for at vi kan ta de riktige valgene til riktig tid når store samferdselsinvesteringer fremover skal gjøres under endrede teknologiske forutsetninger. Å gripe mulighetene som ligger i ny teknologi er derfor sentralt for å nå målene for transportsektoren» (Meld. St. 33

(2016-2017), 2017, s. 12). Det er altså et uttalt mål at man skal tilstrebe å benytte seg av ny teknologi for å kunne investere pengene best mulig i fremtidige samferdselsprosjekter. Det er også et uttalt mål fra Vegdirektoratet sin side at Norge tar ledende roller i utviklingen og utprøvingen av ITS-systemer (Statens Vegvesen, 2018). Når dette sees i sammenheng med de mulige avbøtende tiltakene beskrevet av Vegdirektoratet legges det et grunnlag for at det kan være høyst aktuelt å se nærmere på hvilke effekter man får av å bruke smalere skulderbredde sammen med et ITS-tiltak basert på automatisk hendelsesdeteksjon, nedsatt fartsgrense og regulering av trafikk i de ulike kjørefeltene.

## 1.2 Hypotese og forskningsspørsmål

Denne oppgaven vil forsøke å fremlegge noen resultater som kan bidra til å vurdere Vegdirektoratets uttalelse om den mulige bruken av smal 4-felts motorveg sammen med avbøtende ITS-tiltak. Hypotesen som dermed utfordres er:

*Trafikkstyring ved hjelp av ITS kan brukes som avbøtende tiltak for negative konsekvenser knyttet til trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser når man har redusert skulderbredde på 4-felts motorveg.*

De avbøtende tiltakene knyttes spesielt til negative konsekvenser som oppstår på vegen ved forhold som ikke er en normal del av trafikkbildet. Dette kan inkludere uforutsette eller planlagte hendelser som kan gjøre at man får en endring i kvaliteten på trafikkavviklingen, som igjen kan føre til at man har endret risiko for ulykker. På grunn av tidsbegrensningen og mangel på ekte data knyttet til trafikkflyten ved hendelser på motorveg er det mest aktuelt å bruke et trafikksimuleringsprogram for å kunne analysere hva som skjer på vegen ved ulike hendelser. For å kunne vurdere hypotesens validitet stilles dermed følgende forskningsspørsmål:

1. Hvordan kan man bruke trafikksimuleringsprogrammet Aimsun Next 20 til å modellere det som skjer ved hendelser som blokkerer kjørefelt helt eller delvis?
2. Hvordan påvirkes trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser når man reduserer skulderbredden på en 4-felts motorveg med utgangspunkt i norske standarder for fartsgrense og tverrprofil?
3. På hvilken måte kan bruk av intelligente transportsystemer (ITS) for trafikkregulering ved hendelser påvirke parametre knyttet til trafikkavvikling og -sikkerhet på 4-felts motorveg med redusert skulderbredde?

## 1.3 Avgrensninger og omfang

Begrepet trafikkisikkerhet brukes i denne rapporten om risikoen for sekundære ulykker som følge av at kvaliteten på trafikkavvikling endres ved hendelser. Det betyr at man i hovedsak bruker metoder og parametre som sier noe om endret trafikkavvikling, og at man på bakgrunn av dette også kan si noe om endret trafikkisikkerhet.

Gjennom studien gjøres det en rekke forenklinger knyttet til vegutforming og trafikkbelastning. Dette er gjort for å kunne si noe om effekten av vegskuldre og nytten av ITS

systemer på et generelt grunnlag. Analysen baserer seg ikke på observerte data, og resultatene vil dermed ikke kunne gjelde direkte for en reell vegstrekning. Målet er å kunne si noe generelt om effekten av vegskuldre og avbøtende tiltak som videre må vurderes for den enkelte vegstrekningen.

For å begrense omfanget av oppgaven velges det her å kun ta i betraktning uforutsette hendelser som fører til at et kjøretøy blokkerer et kjørefelt helt eller delvis, og planlagte hendelser som vegarbeid eller begivenheter sees dermed bort fra. Det sees også bort fra hva som skjer om det er gjenstander som fungerer som blokkering av vegbanen. Det tas ikke stilling til effekten av skulderbredden på trafikkavvikling og trafiksikkerhet ved normale forhold, selv om dette naturligvis er relevant for valg av standarder for 4-felts motorveg i fremtiden.

Store deler av metoden for å modellere hendelser baserer seg på formler og verdier fra Highway Capacity Manual fra 2000 (HCM2000), ettersom denne blir hyppig referert til i relevante studier. HCM2000 er ikke den nyeste versjonen av HCM. Den nyeste utgaven, HCM2016, ble kun funnet tilgjengelig for kjøp ved utarbeidelsen og gjennomføringen av metoden, og ettersom det ikke initialt var budsjettet for kjøp av litteratur til store summer ansees HCM2000 som tilstrekkelig oppdatert for formålet. HCM2016 ble først gjort tilgjengelig for meg i løpet av de siste ukene til rådighet, og det ser ut til at det blant annet forekommer noen endringer i denne med tanke på formelen som brukes for justering av speed-flow kurver.

## **1.4 Rapportens oppbygning**

I denne rapporten vil leseren først bli presentert med en gjennomgang av det teoretiske grunnlaget som er nødvendig for å utvikle og utføre metoden og for å besvare forsknings-spørsmålene. I kapittel 3 presenteres den brukte metoden og hvordan den er utviklet. Kapittel 4 består av en presentasjon av resultatene som skal legge grunnlaget for en vurdering av hypotesen, mens i Kapittel 5 diskuteres betydningen av disse resultatene og hva de har å si for trafikkavviklingen og trafiksikkerheten ved hendelsene. I kapittel 6 presenteres en konklusjon av det utførte arbeidet og en vurdering av hva som er nødvendig av videre arbeid knyttet til temaet.



# 2 Kapittel 2

---

## Teoretisk grunnlag

*Deler av dette kapittelet er basert på prosjektoppgaven som ble utarbeidet av meg som et forberedende arbeid til denne masteroppgaven. Prosjektoppgaven er en del av de digitale vedleggene knyttet til denne oppgaven.*

For å få tilstrekkelig kunnskap om temaer knyttet til forskningsspørsmålene, samt et grunnlag for metodeutvikling, er det gjennomført litteratursøk både som en del av arbeidet til oppgaven og når det har vært behov for å finne supplerende teori under arbeidet. Litteratursøk er blant annet utført ved hjelp av søk med relevante søkeord i databasene *Web of Science*, *Scopus* og *Google Scholar*, i tillegg til at litteratur har blitt funnet ved å bruke bakover- og framover «*snowballing*»-teknikk, altså hhv. å finne relevante studier i referanselisten til den primære litteraturen og å finne relevante studier blant de som refererer til den primære litteraturen. Søk i slike databaser resulterer stort sett i artikler i internasjonale journaler, og ettersom det også er interessant å kunne trekke linjer til norske forhold er det også funnet retningslinjer, standarder og veiledere på Statens Vegvesen sine nettsider. I tillegg har relevant litteratur om skulderbredde blitt tilsendt fra ansatte i SINTEF, Statens Vegvesen og Multiconsult.

Temaene som belyses videre er knyttet til vegskulder, hendelser i trafikken, intelligente transportsystemer og Aimsun som simuleringsverktøy for hendelser i trafikken.

### 2.1 Vegskulder

#### 2.1.1 Generelt

Tverrprofilen til en veg som er bygget etter Statens Vegvesens håndbøker består alltid av kjørefelt, ytre vegskuldre og vegens sideterreng. I tillegg har nasjonale hovedveger med høy ÅDT midtdeler og indre vegskuldre. Midtdeler kan være et tosidig rekkverk, en midtrabatt med rekkverk på hver side eller en jordvoll. Noen ganger er det også behov for rekkverk på utsiden av ytre skulder. Dette blir nødvendig når et eller flere faremomenter befinner seg innenfor vegens sikkerhetssone (Statens Vegvesen, 2014a).

Vegens skulder er definert som den delen av vegen som ligger utenfor kantlinjen, og bredden måles fra midt i kantlinjen til vegkanten (Statens Vegvesen, 2014a). Ytre vegskuldre til en veg med dimensjoneringsklasse H3 er 2,75 meter bred, mens de fire kjørefeltene er 3,50 meter brede, som vist i Figur 1.1. Denne dimensjoneringsklassen har også midtdeler og indre skuldre på totalt 3,5 meter. Vegskuldre skal ha samme tverrfall som vegen, og hele skulderen skal asfalteres (Statens Vegvesen, 2019b).

### **2.1.2 Hensikten med vegskuldre**

I SINTEFs notat sendt til Statens Vegvesen, Vegdirektoratet (Foss, 2019) beskrives hensikten med vegskuldre og deres viktigste funksjoner. Vegskulderens funksjon er blant annet å kunne fungere som areal for nødstopp. Dette er spesielt viktig på veger med høye volumer for å sikre trafikkflyten på vegen, og på veger med høye hastigheter for å kunne unngå påkjøring bakfra når et kjøretøy er stoppet. Skuldrene skal også kunne gi plass til at politi eller andre myndigheter skal kunne stoppe kjøretøy langs vegen når dette er nødvendig. I tillegg skal de kunne gi plass til at vedlikehold skal kunne gjennomføres langs vegen uten at det skaper konsekvenser for trafiksikkerhet- og avvikling, og de skal kunne brukes til å vike for utrykningskjøretøy, som ellers ville blitt hindret i å komme fram ved mye trafikk på vegen. Skuldrene skal også kunne fungere som et spillrom for førere av et kjøretøy som er på vei ut av kjørebanelen til å kunne få kontroll på kjøretøyet igjen, i tillegg til at det fungerer som ekstra plass dersom en fører må forlate kjørefeltet for eksempel for å unngå å treffe et objekt i vegen (Foss, 2019).

I SINTEF-notatet pekes det også på at vegskuldre er med på å øke stoppsikten i horisontal- kurver med små radier, i tillegg til at en bred vegskulder øker førerens opplevelse av sikkerhet og komfort på vegen. Denne effekten kan bidra til at føreren holder en høyere hastighet når skulderen er bred enn når den er smalere (Foss, 2019).

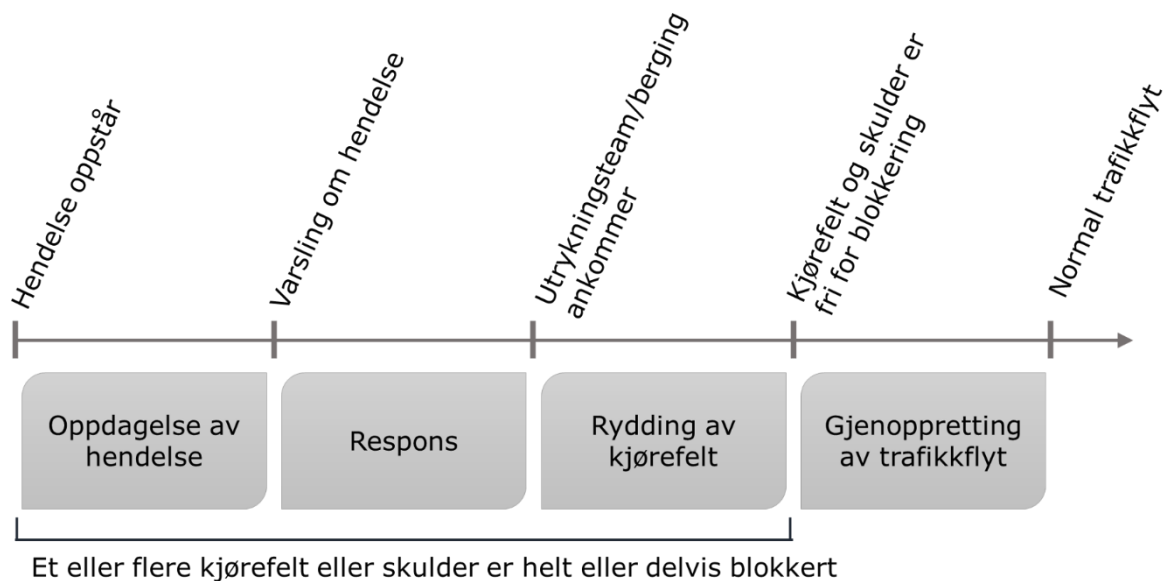
Alle disse funksjonene er viktige å ta i betraktning når man skal ta stilling til om det er hensiktsmessig å bygge en veg med smalere skulder, og det bør studeres nærmere hvilke av funksjonene som kan opprettholdes på en smalere skulder og hvilke man vil trenge andre løsninger for. Ettersom det i denne rapporten er ønskelig å se på hvordan skulderbredden påvirker trafiksikkerhet og trafikkavvikling ved hendelser blir vegskulderens funksjon som areal for nødstopp satt søkelys på videre. I den forbindelse er det nyttig å finne teoretisk grunnlag for slike hendelser i trafikken, noe som følger i det neste delkapittelet.

## **2.2 Hendelser i trafikken**

### **2.2.1 Generelt**

En håndbok for trafikkstyring ved hendelser utviklet for Federal Highway Administration (FHWA) har definert hendelser som «(...) any non-recurring event that causes a reduction of roadway capacity or an abnormal increase in demand.» (PB Farradyne, 2000, s. 1-2). Dette kan inkludere alt fra uforutsette hendelser som stoppede kjøretøy, trafikkulykker eller gjenstander i vegen, eller forutsette hendelser som vegarbeid eller begivenheter. I denne rapporten velges det å se på nødstopp eller ulykker med kjøretøy som plutselig og uforutsett blokkerer et eller flere kjørefelt eller skulder helt eller delvis, og når hendelser er omtalt videre i denne rapporten er det denne typen hendelser det er snakk om.

Transport Research Board sin Highway Capacity Manual (HCM) fra 1994 (1994, referert i J. Javid og Jahanbakhsh Javid, 2018) presenterer fire ulike faser av en hendelse, som alle vil kunne påvirke trafikkavvikling og trafiksikkerheten på vegen. Figur 2.1 viser de ulike fasene.



Figur 2.1 Faser av en hendelse, basert på J.Javid og Jahanbakhsh Javid (2018)

Hvor stor del hver fase utgjør av den totale hendelsen, og hvor lenge den totale hendelsen varer kan variere. Faktorer som påvirker varigheten av de ulike fasene kan for eksempel være teknologi for deteksjon av hendelse, avstand for utrykningsteamet, alvorligheten av hendelsen, typen hendelse, antall og typer kjøretøy involvert, lokal praksis for rydding m.m.

*Giuliano* (1989) har på bakgrunn av observasjoner funnet at den gjennomsnittlige varigheten av en hendelse i trafikken er 37 minutter, og over halvparten av hendelsene varer under 30 minutter mens 22% varer i over en time. Varighetene presentert i denne studien inkluderer ikke tiden det tar før man har normal trafikkflyt, og det gjelder dermed kun fase 1 til 3. Studien baserer seg på data fra USA på 80-tallet, og det må antas at flere forhold vil gjøre at dette kan avvike fra det som er dagens gjennomsnitt i Norge. Man ser også ut fra dataene som er analysert av *Giuliano* at den største delen av hendelsene som er registrert ikke har medført stenging av et kjørefelt. Ved en reduksjon av skulderbredden kan man anta at andelen hendelser som medfører stenging av kjørefelt økes. Tallet kan likevel vurderes å brukes som et utgangspunkt når man skal bruke ulike hendelsesvarigheter i analyser.

### 2.2.2 Nødstopp og ulykker

Med nødstopp menes det her alle stopp på skulder eller i vegbanen, som ikke er et resultat av trengsel i trafikken eller sammenstøt med andre kjøretøy eller objekter, på arealer der man ikke normalt skal stoppe et kjøretøy. Årsakene til at nødstopp forekommer på skulder kan være mange. Den mest nærliggende årsaken å tenke på i forbindelse med nødstopp er at et kjøretøy havarerer. Det vil si at føreren har fått et problem med kjøretøyet som gjør at det ikke er mulig å komme seg videre. Et slikt problem kan for eksempel være motorstans, punktert dekk eller at kjøretøyet er tomt for strøm. Med en økende andel elektriske kjøretøy kan det tenkes at det sistnevnte blir en mer og mer hyppig årsak til nødstopp i fremtiden. Andre årsaker til at det stoppes på skulderen på en motorveg kan

være medisinske forhold, for eksempel at fører eller passasjer får et illebefinnende, eller simpelthen at føreren har behov for hvile, men at det er for langt til neste rasteplass. Den sistnevnte er en årsak som sannsynligvis bør unngås så langt det lar seg gjøre, da stopp på skulder også medfører en risiko. Et problem med at vegskuldrene skal være brede nok til at kjøretøy kan plasseres der ved nødstop er at det er mulig det oppleves som en falsk trygghet å ha stoppet på skulderen, og at den dermed brukes selv når det ikke er strengt nødvendig eller at de som er stoppet oppfører seg uforsiktig i forhold til risikoen som er til stede.

Når et kjøretøy er nødstoppet i et kjørefelt, er årsaken sannsynligvis så akutt at det ikke har vært mulig å manøvrere kjøretøyet til siden. Dette vil trolig medføre en enda større risiko for ulykker enn dersom man hadde klart å komme seg mest mulig over på skulderen, ettersom kjøretøyet er mer til hinder for trafikken.

En studie gjennomført av *Cambridge Systematics Inc.* i Texas i 1990 viste at 80% av hendelser på hovedveger er nødstop (Cambridge Systematics Inc., 1990). I denne studien er det også anslått at i 80% av disse tilfellene igjen står kjøretøyet på skulderen, mens i 20% av tilfellene står det i vegbanen. Det kommer ikke fram av rapporten om kjøretøyene som står på skulder også blokkerer deler av kjørefeltet. *Chimba og Kutela* (2014) fant også tall i samme størrelsesorden som tallene fra Texas i 1990. Mellom 2005 og 2009 ble det i denne studien funnet at 72% av de 108 911 motorveghendelsene som ble rapportert inn i Tennessee innebar nødstop, og at antallet nødstop økte med 7% per år mellom 2005 og 2010. Det anslås også at i 76% av nødstoppenes var vegskulderen involvert. *Institute of Road Safety Research* i Nederland (SWOV, 2002) peker på at man kan bruke statistikk fra Nederland, som sier at det gjennomsnittlig er 11 stoppede kjøretøy per 100 km på begge sider av vegen, som en referanse for antall stopp på skulder. Også i Virginia er det rapportert at det forekommer store mengder nødstop i kjørefelt eller på skulder. 72,9% av hendelsene i deres kollisjonsdatabase tilskrives denne årsaken, mens resten er klassifisert som ulykker (Smith, Qin og Venkatanarayana, 2003). I Florida ble det mellom 2005 og 2007 registrert 95 844 hendelser med behov for bilberging på tre travle motorvegstrækninger, og kun 8,2% av disse var ulykker (Zhan, Gan og Hadi, 2009). 4,6% av hendelsene med behov for bilberging førte til at et eller flere felt var blokkert.

Ut fra de undersøkte studiene kan det se ut til andelen av hendelser som kan beskrives som nødstop kan anslås til å være mer enn 70%. Andelen av disse igjen som benytter seg av vegskulderen historisk sett har vært omtrent 76-80% i USA, mens en liten andel blokkerer et eller flere hele kjørefelt. Det har ikke lyktes å finne statistikk for nødstop i Norge, men det kan tenkes at tallene vil være i samme størrelsesorden ettersom årsakene som fører til nødstop kan ansees som universelle.

Det kan tenkes at ulykker på vegen ofte medfører at hele kjørefelt er blokkert for ferdsel. Politirapporterte ulykker med «ikke uvesentlig» personskaade i Norge registreres i Statens Vegvesens database TRINE. I 2019 var det 125 slike ulykker på motorveg i Norge, og fra 2010 til 2019 har det i gjennomsnitt vært 195 ulykker med personskaade i året (Statens Vegvesen, 2021). Det forventes at mindre alvorlige ulykker er underrepresentert i statistikken, er det er ikke oppgitt statistikk for ulykker uten personskaader eller nødstop i denne databasen.

### 2.2.3 Sekundære hendelser

Sekundære hendelser defineres her som hendelser som følger av at en annen «primær» hendelse har oppstått på veien, og hendelsene oppstår enten som en del av en kjede med den primære hendelsen eller som en del av køen som dannes bak hendelsen (Chimba og Kutela, 2014). *Ohio Department of Transportation* nevner nødstoppede kjøretøy som en av de viktigste årsakene til en trafikkulykke, og nevner også at fra 2000 til 2005 ble det rapportert om 3652 kollisjoner med kjøretøy stoppet i kjørefelt eller på skulder på hovedveger i Ohio (*Ohio Department of Transportation*, 2007). *Zhan, Gan og Hadi* (2009) fant i sin studie at 4,98% av hendelser som blokkerte et eller flere kjørefelt på tre travle hovedveger i Florida mellom 2005 og 2007 førte til sekundære kollisjoner, og at 221 primære hendelser førte til 255 sekundære hendelser. Noen av de primære hendelsene førte altså til flere sekundære hendelser. 12,2% av de primære hendelsene som førte til sekundære hendelser var klassifisert som nødstopp og 3,77% av alle nødstoppe som medførte blokkering av kjørefelt førte til sekundære hendelser. Ut fra de nevnte studiene kan det se ut til at ulykker på grunn av andre hendelser er noe som forekommer i en del tilfeller, og det er grunn til å tro at dette også forekommer i Norge i dag selv om det ikke er funnet studier som støtter denne påstanden.

Det er også funnet at sekundære hendelser ofte er mer alvorlige enn primære hendelser. Det er anslått av 18% av alle dødsulykker på motorveger er sekundære kollisjoner (PB Farradyne, 2000). *Stamatiadis, Agent og Pigman* (2005, referert i *Transportation Research Board (TRB)*, 2009, s. 2) skriver at 11% av dødsulykker på motorveg i USA er relatert til kjøretøy som har stoppet på vegskulder. *Institute of Road Safety Research* i Nederland (SWOV, 2002) peker også på tall i denne størrelsesordenen for Nederland og Storbritannia på 90-tallet. I tillegg framgår det i denne rapporten at 21,5% av alle skadeulykker knyttet til stopp på skulder er dødsulykker, sammenlignet med 6,3% for alle ulykker på motorveg. I en studie utført i 2020 i California er det funnet at andelen sekundære ulykker som medfører alvorlig skade eller død er nesten dobbelt så stor som for primære ulykker (Li *et al.*, 2020).

Forhold knyttet til den primære hendelsen eller trafikken ellers som gjør at risikoen for sekundære hendelser øker eller reduseres er også diskutert i litteraturen. *Zhan, Gan og Hadi* (2009) peker på at det er vanskelig å fastsette faktorene som påvirker sannsynligheten for sekundære ulykker fordi det ofte er dårlig kvalitet på data om hendelser og begrensede mengder trafikkdata knyttet til disse. Denne studien konkluderer likevel med at blant annet lengden på, og varigheten til, køen som dannes bak den primære hendelsen er en viktig faktor ettersom strekningen og tiden det kan forekomme sekundære hendelser på er lengre. I *Traffic Incident Management Handbook* pekes det på at sannsynligheten for en sekundær hendelse øker jo lenger tid det tar før den primære hendelsen er ryddet av veien (PB Farradyne, 2000). Når det tar tid å respondere på hendelsen og å organisere ryddingen av hendelsen tar det lenger tid før trafikken flyter som normalt igjen, og unormal og uventet trafikkflyt kobles til økt risiko for sekundære ulykker fordi førerne kan måtte utføre deselerasjon eller stopp uventet (Cullison *et al.*, 1997). Det er derfor nyttig å redusere responstiden til utrykningspersonell for å redusere denne risikoen. *Chimba og Kutela* (2014) konkluderer i sine studier med at antallet sekundære ulykker øker med økt trafikkvolum, høyere fartsgrense og høyere andel tungtrafikk. I tillegg er det i denne studien funnet at flesteparten av de sekundære hendelsene som er registrert kan tilskrives blokkering av kjørefelt. Primære hendelser med kun blokkering av skulder gir mindre sannsynlighet for sekundære hendelser (Zhan, Gan og Hadi, 2009). I den

forbindelse anbefales det at av *Chimba og Kutela* (2014) at skulderbredden er minst 9 fot ( $\approx 2,74$  m) for å kunne ta nødstoppede kjøretøy. *Xu et al.* (2019) konkluderer også med at gjennomsnittlig hastighet og trafikkvolum er faktorer som påvirker sannsynligheten for sekundære hendelser, og at sannsynligheten kan reduseres ved å innføre tiltak som kontrollerer disse faktorene ved ulykker.

Det ser altså ut til at det er bred enighet i litteraturen om at de viktigste faktorene som påvirker risikoen for sekundære hendelser er hendelsens varighet, den resulterende kølengden, forutsigbarhet i trafikkflyten, trafikkvolum og hastighet forbi hendelsen, samt om deler av et kjørefelt blokkeres av den primære hendelsen. Dersom disse faktorene kan kontrolleres, vil dette gjør at trafikksikkerheten opprettholdes for de andre kjøretøyene på vegen ved en hendelse. *Li et al.* (2020) nevner at det er mulig å opprettholde en viss forutsigbarhet i trafikkbildet selv ved hendelser ved å for eksempel bruke variable fartsgrenser for å jevne ut turbulente trafikkforhold, og *Carson* (2010) mener at risikoen for sekundære hendelser kan reduseres ved å gi trafikantene informasjon om at de nærmer seg et ulykkessted. Ifølge *Farrag et al.* (2020b) har det i ulike studier blitt bevist at reduksjon av fartsgrensen på vegen ved en hendelse kan bedre trafikkavviklingen, og øke sikkerheten ved å redusere risikoen for farlige svingninger i hastigheten til kjøretøyene og dermed risikoen for sekundær kollisjon. I tillegg kan man redusere klimagassutslipp ettersom kjøretøy med tilnærmet konstant fart slipper ut mindre forurensende gasser. Varigheten til hendelsene kan reduseres dersom man har en effektiv måte å oppdage hendelser på og dersom det er enkelt for ryddemannskapet å komme til hendelsesstedet. Det kan tenkes at hendelsesdeteksjon og styring av trafikken til et annet kjørefelt kan bidra til dette.

#### **2.2.4 Kapasitet ved hendelser**

Kapasitet er i trafikksammenheng gjerne definert som «(...) the throughput in vehicles per hour that can pass through a link when there is enough traffic demand to reach this capacity» (*Hadi, Sinha og Wang, 2007, s.63*). Kjør på vegen ved en hendelse, som medfører både forsinkelser og økt risiko for sekundære ulykker, dannes når kapasiteten på vegen reduseres og ankomsten av kjøretøy til flaskehalsen er større enn denne nye kapasiteten. Den gjenstående kapasiteten ved en hendelse avhenger av ulike faktorer, og på bakgrunn av feltstudier er det funnet at prosentandelen av kapasitet tapt på grunn av en hendelse er større enn andelen av kjørefeltet som faktisk er blokkert (*Hadi, Sinha og Wang, 2007*). Den gjenstående kapasiteten kan være avhengig av for eksempel værforhold, typen hendelse, hendelsens alvorlighetsgrad, antall kjøretøy involvert og andelen av vegen som er blokkert. De ikke-fysiske faktorene som spiller inn i kapasitetsreduksjonen kan ofte tilskrives det som kalles «rubbernecking»-effekten, som beskrives nærmere i dette delkapittelet.

Gjennom litteraturstudiet er det observert at de fleste studiene som omhandler reduksjon av kapasitet ved hendelser refererer til *Highway Capacity Manual* fra år 2000 (HCM2000) sine verdier for prosentandelen gjenstående kapasitet. Disse verdiene er vist i Tabell 2.1. Den nyeste versjonen av HCM (HCM2016) har samme verdi for et stengt kjørefelt, men har ikke oppgitt noen verdi for stopp på skulder når det ikke er snakk om en ulykke (TRB, 2016).

Tabell 2.1 Andel gjenstående kapasitet på motorveg ved ulike hendelser (Exhibit 22-6, TRB, 2000, s. 22-11)

Number of Freeway Lanes by Direction	Shoulder Disablement	Shoulder Accident	One Lane Blocked	Two Lanes Blocked	Three Lanes Blocked
2	0.95	0.81	0.35	0.00	N/A
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00
4	0.99	0.85	0.58	0.25	0.13
5	0.99	0.87	0.65	0.40	0.20
6	0.99	0.89	0.71	0.50	0.26
7	0.99	0.91	0.75	0.57	0.36
8	0.99	0.93	0.78	0.63	0.41

Selv om de fleste studiene refererer til denne tabellen, diskuteres det også hvor holdbare disse verdiene er for virkelige forhold. Smith, Qin og Venkatanarayana (Smith, Qin og Venkatanarayana, 2003) mener at det finnes grunnlag for å si at kapasitetsreduksjonen er avhengig av så mange varierende faktorer at den egentlig burde sees på som en tilfeldig variabel. Verdiene skal likevel kunne brukes til å vurdere hvordan kapasiteten endrer seg ved hendelser. Det er ikke funnet studier som sier noe om kapasitetsreduksjon når et kjørefelt kun er litt fysisk hindret men fortsatt naturlig å ta i bruk for kjøretøyene.

### Rubbernecking

*Rubbernecking* betyr ifølge ordboken Merriam-Webster å stirre eller å se seg rundt med overdreven nysgjerrighet ("Rubbernecking", u.å.). I forbindelse med trafikk brukes ordet om tendensen førerne har til å senke hastigheten sin når de passerer en hendelse for å se på hva som har skjedd, eller fordi de blir distraherete. Denne distraksjonen vil føre både til en redusert kapasitet på vegen ved hendelsen og til at risikoen for sekundære hendelser øker (Park *et al.*, 2018).

Ifølge HCM har man begrenset kunnskap som gjør at vi kan tallfeste hvor mye *rubbernecking*-effekten reduserer kapasiteten, men det antas å variere fra 5% reduksjon i kapasitet ved små hendelser med et kjøretøy til 25% ved alvorlige ulykker med mange kjøretøy (TRB, 2000). Ettersom det er vanskelig å måle *rubbernecking*-effekten, er det også vanskelig å si noe om hva som kan gjøres for at denne effekten skal kunne reduseres, men ifølge Chang, Fei og Point-du-Jour (2002) kan det tenkes at det å advare førere om at en hendelse har forekommet foran dem reduserer *rubbernecking*-effekten ettersom nysgjerrigheten til førerne kan bli dempet av informasjon. Informasjonen kan gis ved hjelp av intelligente transportsystemer som omtales i neste delkapittel.

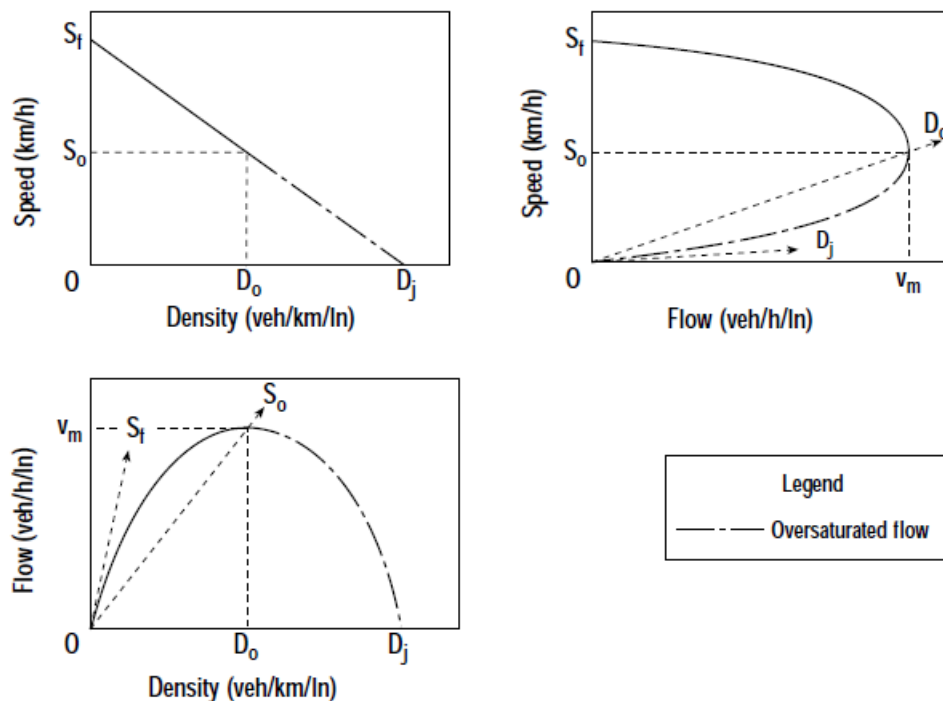
### Sammenhengen mellom trafikkparametere og kapasitet

Når man skal analysere hva som skjer på vegen ved kapasitetsreduksjon er det viktig at man vet noe om forholdet mellom de viktigste trafikkparameterne og hvordan de endrer seg med endret kapasitet på vegen. Den generelle sammenhengen mellom trafikkvolum,  $V$  (kjt/t), seksjonshastighet,  $S$  (km/t), og trafikk tetthet,  $D$  (kjt/km), beskrives med Formel 1.

Formel 1

$$V = S * D \quad (\text{Eq. 7-5, TRB, 2000, s. 7-4})$$

Denne teoretiske sammenhengen tilsier at man kan ha uendelig mange kombinasjoner av hastighet og tetthet som gir det samme trafikkvolumet. I virkelighet vil mulighetene for kombinasjon av hastighet og tetthet begrenses av hastigheten ved fri flyt (FFS) og tettheten når trafikken bryter sammen og står stille ( $D_j$ ) (TRB, 2000). Figur 2.2 viser hvordan det generelle forholdet mellom trafikkparameterne blir kan se ut. I virkeligheten har kurvene vanligvis diskontinuiteter, og ekte data har vist at forholdene mellom hastighet og trafikkvolum og hastighet og tetthet ikke er ideelt parable slik som denne generaliseringen indikerer (TRB, 2016).



Figur 2.2 Generelt forhold mellom volum, hastighet og tetthet (Exhibit 7-2, TRB, 2000, s. 7-5)

Kapasiteten på vegen er nådd når man har den kombinasjonen av hastighet og tetthet som gir høyest volum. Hastigheten og tettheten som gir maksimalt trafikkvolum kalles gjerne hhv. optimal hastighet og optimal tetthet. Når man har en tilstand som tilsvarer den delen av kurvene som har mindre tetthet enn den optimale tettheten sier man gjerne at vegen er underbelastet, mens når man passerer den optimale tettheten er den overbelastet. Som man ser fra kurvene vil strømmingen av trafikk synke under kapasiteten igjen ved overbelastede forhold, fordi man ikke lenger klarer å avvikle trafikken optimalt slik som ved trafikketerspørsel lik kapasitet.



## 2.3 Intelligente transportsystemer (ITS)

*Dette delkapittelet er skrevet som en del av prosjektoppgaven, med noen mindre justeringer der det er nødvendig. I utgangspunktet var det tenkt at effekten av automatisk hendelsesdeteksjon skulle ha et større fokus i oppgaven en det til slutt har fått, så en god del studier som omhandler dette ble funnet i litteraturstudiet. Dette er tatt med videre i teorien selv om det har fått en mindre plass i selve oppgaven, ettersom det fortsatt er interessant å ha et bilde av hva som er mulighetene og begrensningene til et slikt system når effekten av ITS-tiltaket skal diskuteres.*

### 2.3.1 Generelt

Intelligente transportsystemer (ITS) kan defineres som «avanserte applikasjoner som, uten at de inneholder intelligens som sådan, har som mål å tilby nyskapende tjenester for trafikkstyring og ulike transportformer og sette ulike brukere i stand til å bli bedre informert, og til å bruke transportnettene på en sikrere, mer koordinert og «smartere» måte» (Dir 2010/40/EU, nr. 7/92). ITS kan være en del av infrastrukturen langs vegen eller en del av kjøretøyet. ITS som er en del av kjøretøyet innebærer at kjøretøyene kan kommunisere med føreren, hverandre eller infrastrukturen, eller at de har autonome funksjoner som fungerer som førerstøtte. ITS som er en del av infrastrukturen består stort sett av elektroniske systemer, og variable skilt og signaler. Systemene som er plassert langs vegkanten og rettet mot trafikantene har som mål å informere og varsle trafikantene, og styre og overvåke trafikken (Statens Vegvesen, 2011). Statens Vegvesen har utarbeidet en strategi for utvikling og bruk av ITS i Norge, og peker i denne på at det er nødvendig å nytte seg av ITS for å nå målene om trafiksikkerhet, framkommelighet og klima/miljø (Statens Vegvesen, 2018).

ITS langs vegen for overvåkning, varsling og styring av trafikken knyttes gjerne til begrepene *Active Traffic Management* (ATM) eller *Traffic Incident Management* (TIM).

### 2.3.2 Active Traffic Management (ATM) og Traffic Incident Management (TIM)

*Active Traffic Management* (ATM) er definert av Farrag *et al.* (2020a) som «the ability to dynamically manage recurrent and non-recurrent congestions based on predominant and predicted traffic conditions» (Farrag *et al.*, 2020a, s. 1). Med andre ord brukes ATM om det å styre trafikken dynamisk etter hendelser på vegen eller på vanlige tidspunkter hvor man vet at vegen pleier å være svært trafikkert (for eksempel i morgenrushet). Når ATM brukes ved engangstilfeller av kødannelse på grunn av en hendelse på vegen bruker man gjerne også begrepet *Traffic Incident Management* (TIM) (J. Javid og Jahanbakhsh Javid, 2018), men dette begrepet brukes også om strategier man har for å respondere på hendelser som ikke innebærer ITS.

Eksempler på ATM-strategier som kan benyttes er dynamisk kjørefeltstildeling (D-LA), dynamisk «*hard shoulder running*» (D-HSR) (når den asfalterte skulderen brukes som et kjørefelt), dynamisk flettekontroll (DMC), dynamiske fartsgrenser (D-SPL) og dynamisk stenging av ramper (D-RC) eller tilfartskontroll ved hjelp av signal (Farrag *et al.*, 2020a). I tillegg nevner Statens vegvesens veileder for ITS på veg blant annet automatisk stenging

av kjørefelt og automatisk nedsettelse av fartsgrensen på stedet når en hendelse har oppstått som tiltak som kan brukes for styring av trafikken (Statens Vegvesen, 2011).

De ulike strategiene kan implementeres ved å benytte data som infrastrukturen samler opp om trafikkbildet ved hjelp av CCTV-kameraer eller detektorer, eller data som infrastrukturen får tilsendt fra kjøretøyene selv, også gjerne omtalt som V2I kommunikasjon (*vehicle to infrastructure*), ved hjelp av for eksempel GPS, Bluetooth eller sensorer i *connected vehicles* (CV). Strategiene kan også basere seg på at infrastrukturen ikke er delaktig, men at kjøretøyene deler informasjon seg imellom, også omtalt som V2V (*vehicle to vehicle*). Det siste er enda avhengig av utvikling i teknologien og endring i dagens kjøretøypark, da en effektiv trafikkstyring mellom bilene krever at en stor prosentandel av bilene har denne funksjonen. Infrastrukturen kan også sende meldinger direkte til kjøretøyene ved hjelp av I2V kommunikasjon (*infrastructure to vehicle*), men det oppgis i *Håndbok R311 Trafikkstyringssystemer på veg* (Statens Vegvesen, 2017) at variable skilt vil være viktige for kommunikasjonen til føreren i lang tid fremover selv om systemer for I2V kommunikasjon er i rask utvikling.

### 2.3.3 Automatic Incident Detection (AID)

For å kunne styre trafikken med variable skilt ved ulike hendelser trengs det en måte å oppdage at en hendelse forekommer på vegnettet. For at dette skal kunne skje fortest mulig og til alle døgnets tider er det gunstig at dette gjøres automatisk. Hendelser i trafikken som det er nødvendig å oppfatte er blant annet nødstopp, kollisjon mellom to kjøretøy, kollisjon mellom kjøretøy og objekt, eller objekter eller oljesøl i vegbanen som gjør det nødvendig å stenge av et kjørefelt. Ifølge Han *et al.* (2020) deler man gjerne inn ulike måter å automatisk oppdage trafikkhendelser i tre kategorier: mønstergjenkjennelse, avviksdeteksjon og maskinlæring. Alle de ulike algoritmene tar i bruk store mengder romlige data og tidsdata knyttet til vegnettet og kjøretøyene, som kontinuerlig samles opp.

Algoritmene som har mønstergjenkjennelse som metode bruker detektorbelegg fra kjøretøy til å kunne si noe om trafikksituasjonen ved et gitt mønster i dette belegget. Avviksdeteksjon bruker samme type data, men til å avgjøre når trafikksituasjonen avviker fra normalsituasjonen. Maskinlæringsalgoritmene bruker data om vegbelegg, trafikkvolum, hastighet og tidsintervaller for å trene opp maskinen til å forstå når det har skjedd en hendelse på vegnettet (Han *et al.*, 2020).

For å kunne ha et mest mulig effektivt system for automatisk hendelsesgjenkjenning og trafikkstyring er det flere ulike parametere som må være mest mulig optimale. Disse parameterne er den gjennomsnittlige tiden det tar før systemet blir varslet om en hendelse (Time to detect, MTTD), hvor stor andel av hendelser som blir fanget opp (Detection Rate, DR) og hvor ofte det blir varslet om falske hendelser (False Alarm Rate, FAR) (Road Network Operations & Intelligent Transport Systems, u.å.).

Nylige utførte studier er interessante å se på for å finne hva som er funnet som mulige MTTD, DR og FAR, og dermed hva som er mulighetsrommet for en mest mulig effektiv trafikkstyring ved hendelser. De ulike studiene som er sett på er stort sett fra 2010 og nyere. Noen av studiene har ikke gjengitt de ønskelige verdiene, men presenterer ulike forhold som kan påvirke effektiviteten til AID systemene. *Sheikh, Laing og Wang* (2020)

viser til at sannsynligheten for at trafikkinformasjon blir sendt fra kjøretøy til infrastrukturens sensorenhet langs vegen (RSU) øker jo nærmere kjøretøyet kommer neste RSU. I tillegg viser denne studien at sannsynligheten for å overføre trafikkinformasjon til RSU senkes ved økt hastighet for kjøretøyet. *Han et al.* (2020) sier også at de fleste AID systemene som eksisterer i dag er avhengige av at trafikk tettheten er høy, og man dermed har tilgang på store mengder sanntidsdata. Dette må også vurderes hvis man skal se på hvordan de ulike AID løsningene vil fungere på motorveger i Norge, da det ikke er gitt at datasettet som løsningene er utprøvd på kan gjenspeile trafikkbildet her til lands.

De ulike verdiene for MTTD, DR og FAR som er funnet er vist i Tabell 2.2 og Tabell 2.3. I hver av studiene er ulike AID-metoder brukt på det samme datasettet for å kunne sammenligne dem med hverandre og med den nye metoden som foreslås i artikkelen. I noen av studiene er metoden kun prøvd ut på simulerte datasett, i andre kun på ekte datasett mens noen studier har prøvd ut metodene på begge typer datasett. Funnene ved bruk av AID-metoder på simulerte datasett er vist i Tabell 2.2, og funnene ved bruk av AID-metoder på ekte datasett er vist i Tabell 2.3. Studiene som har verdier funnet ved bruk av Californiaalgoritmen har brukt ulike terskelverdier for konsentrasjon som input og dermed kommet fram til flere resultater. Ettersom målet er å se på hvilke muligheter som finnes for raskest mulig deteksjon gjengis kun verdiene fra California som gav lavest MTTD.

Tabell 2.2 Verdier for MTTD, DR og FAR når AID er brukt på simulerte data.

Kilde	År	Type	DR [%]	FAR [%]	MTTD [min]
Fuzzy-logic-based traffic incident detection algorithm for freeway (Xie, Hu og Ma, 2008)	2008	Fuzzy-logic	91,0	<u>0,00</u>	2,20
		California	82,0	0,13	0,85
		Standard Normal Deviation	92,0	1,30	1,10
		Bayesian	<u>100,0</u>	<u>0,00</u>	3,90
		Exponential Smoothing	92,0	1,87	<u>0,70</u>
Automatic traffic incident detection based on nFOIL (Lu et al., 2012)	2012	NFOIL	88,7	4,43	2,26
		SVM	73,3	3,19	3,27
		BPNN	90,0	4,43	2,10
Traffic incident detection: A trajectory approach (Han et al., 2020)	2020	FDM	86,4	8,69	1,10
		TM	71,7	20,90	2,40
		TSE	83,1	10,90	2,50
		CNNU	73,4	26,60	5,00
		SVMN	65,9	29,20	5,00
		NNA	60,7	31,80	5,00

I tabellene er de høyeste verdiene for deteksjonsgrad (DR) og laveste verdier for falsk-alarm hyppighet (FAR) og beste gjennomsnittlig deteksjonstidene (MTTD) understreket. Som man ser er den laveste verdien man har fått for MTTD ved bruk av simulerte data 0,70 minutter, altså 42 sekunder. Dette er oppnådd ved bruk av *Exponential Smoothing*, eller eksponentiell glatting. Eksponentiell glatting er en prediksjonsmetode som bruker et vektet gjennomsnitt av tidligere observasjoner, hvor det er slik at jo nyere observasjonen er jo mer vekt får den i gjennomsnittet (Brownlee, 2018). Det er også verdt å merke seg at denne metoden også gir en av de høyeste DR verdiene av de modellene som er utprøvd på simulerte data. Dersom det er viktigere å minimere FAR verdien, fordi man ikke ønsker unødig styring av trafikken er både Bayesian algoritmen og Fuzzy-logic algoritmene de beste av metodene som er utprøvd på simulerte data. Bayesian algoritmen har også en 100% deteksjonsgrad, og er dermed den mest presise og korrekte, men denne metoden har en MTTD på 3,90 minutter. Det kan være for lenge dersom man ønsker å bruke hendelsesgjennkjenningen til å styre trafikken effektivt.

Det kan også være verdt å legge merke til at studien publisert i 2020 presenterer mye høyere FAR verdier og mye lavere DR verdier enn de andre studiene. Dette kan enten tolkes som at det ikke har skjedd store forbedringer av metodene de siste tiårene, og at teknologien som testes dermed ikke når opp, eller at de simulerte dataene har blitt mer realistiske. I *Xie, Hu og Ma (2008)*, hvor man hadde metoder med 0 i FAR og en metode med 100 i DR pekes det på at dette kan komme av at det simulerte datasettet ikke har variasjon i trafikkvolumet. *Han et al. (2020)* sier derimot at simuleringene deres er gjort med variasjon i trafikkvolumet etter en metode fra *D'Andrea og Marcelloni (2017)*.

Tabell 2.3 Verdier for MTTD, DR og FAR når AID er brukt på ekte datasett.

Kilde	År	Type	DR [%]	FAR [%]	MTTD [min]
Automatic traffic incident detection based on nFOIL (Lu <i>et al.</i> , 2012)	2012	NFOIL	95,65	5,53	2,57
		NFOIL, ensemble 5 members	95,65	4,87	4,14
		NFOIL, ensemble 9 members	95,65	4,63	2,84
		SVM	95,65	3,35	3,09
		BPNN	95,65	4,14	3,05
An incident detection method considering meteorological factor with fuzzy logic (Zhao, Chen og Sun, 2018)	2016	Fuzzy logic	<u>96,55</u>	<u>0,21</u>	2,54
		California	91,38	1,11	2,49
		SVM	94,57	0,45	3,42
		Bayesian	87,93	0,27	<u>2,10</u>
Traffic incident detection: A trajectory approach (Han <i>et al.</i> , 2020)	2020	FDM	75,80	14,90	2,27
		TM	71,10	23,90	2,50
		TSE	51,70	15,00	2,60
		CNNU	79,70	42,70	5,00
		SVMN	85,20	55,20	5,00
		NNA	83,20	52,30	5,00

Dersom man sammenligner Tabell 2.2 og Tabell 2.3, ser man at de minste MTTD verdien, når metodene er utprøvd på ekte data, generelt er større enn ved utprøvingen på simulerte data. Dette kan forklares ved at det gjerne er større variasjoner i trafikkvolum, hastigheter og typen hendelser i det ekte datasettet. Den laveste MTTD verdien er 2,10 minutter ved bruk av Bayesian algoritme. Det er også verdt å legge merke til at en *fuzzy logic* algoritme viser gode resultater når det kommer til DR og FAR, og MTTD verdien er også relativt lav, 2,54 minutter. Det er sannsynligvis noe i den størrelsesordenen som er tidsbruken man må regne med når det kommer til hendelsesgjenkjenning.

Det ser til ut at jo raskere gjennomsnittlig deteksjonstid man har, jo større sannsynlighet er det for at varslingen er feil. Enten at det er en falsk alarm eller at hendelsen ikke fanges opp av den automatiske hendelsesgjenkjenneren. Ved valg av metode for AID kan man altså måtte velge hva som er viktigst av korrekte deteksjoner eller at deteksjonene skjer raskt, men at man har flere feilvarslinger eller hendelser som ikke blir oppdaget.

### 2.3.4 Retningslinjer og standarder

Statens Vegvesen har håndbøker som omhandler trafikkstyring og bruk av variable skilt; *R311 Trafikkstyringssystemer på veg* (Statens Vegvesen, 2017) og *V321 Variable trafikk-skilt* (Statens Vegvesen, 2014b). I tillegg til disse håndbøkene er det oppgitt krav til at «videoovervåkning med automatisk registrering av hendelser (AID) skal monteres i tunneler med lengde > 3 km i tunnelklasse C, D, E og F.» (Statens Vegvesen, 2020, s. 31). Automatisk hendelsesgjenkjenning er altså brukt i Norge i dag, men stort sett kun i tunnel.

I Håndbok V321 Variable trafikk-skilt (Statens Vegvesen, 2014b) er det oppgitt at variable fartsgrenseskilt er anbefalt ved etablering av ny motorvegstreking. Det er også påpekt i denne håndboken at det å senke fartsgrensen resulterer i redusert risiko fordi forskjellen mellom kjøretøyenes hastigheter blir mindre og den generelle farten senkes, og det nevnes dermed at variable fartsgrenser kan benyttes ved stansede kjøretøy eller trafikkulykker i eller ved siden av kjørebanelen. Dette for å sikre god trafikkavvikling og forhindre sekundære ulykker. Dette samsvarer godt med det som tidligere ble referert til fra *Farrag et al.* (2020b).

Håndbok R311 Trafikkstyringssystemer på veg (Statens Vegvesen, 2017) legger fram flere konkrete krav til utformingen av en trafikkstyringsplan, som inkluderer anbefalte endringer i fartsgrense og forløpet ved stenging av kjørefelt. I Håndbok R311 (Statens Vegvesen, 2017) omtales de ulike punktene hvor man har variable skilt som «snitt». Det er oppgitt at den maksimale avstanden mellom to snitt, når reguleringen skal skje for envegstrafikk i et løp på en flerfeltsveg i dagen, er 400 meter. I tillegg anbefales det at førerne alltid skal kunne se minst to komplette snitt fra alle kjørefelt, så noen ganger må avstanden mellom snitt være mindre enn 400 meter. Det oppgis også at varsling om stengte kjørefelt bør legges til rettstrekninger eller strekninger med svak kurvatur, for at det lettere skal kunne oppfattes av føreren da kjøreoppgavene er enklere ved slik horisontalkurvatur. Ved stenging av et kjørefelt er det oppgitt at stengingen skal forvarsles med minst to snitt med gule skråpiler før rødt kryss over det stengte kjørefeltet, noe som indikerer at kjøretøyene må begynne å skifte kjørefelt.

Også plan for fartsnedskrivning er omtalt i Håndbok R311. Her oppgis det at «skiltet fart ved kjørefeltstenginger på dagstrekninger bør ikke være over 70 km/t» (Statens Vegvesen, 2017, s. 17) og at det for veger som normalt har fartsgrense 110 km/t kan benyttes 80 km/t fra første gule pil til første røde kryss, altså fram til der hvor et kjørefelt er stengt. Det er også oppgitt at avstanden mellom variable fartsgrenseskilt ikke bør være mer enn 500 meter når disse skiltene er tiltenkt å brukes regelmessig for å vise fartsgrensen 70 km/t. Dersom skiltene som regel har variabel fartsgrense mellom 80 og 110 km/t er maksimal avstand mellom dem 1 km. Dersom man skal sette ned fartsgrensen fra 110 km/t til 80 km/t er dette et sprang på 30 km/t. Ifølge Håndbok R311 er det tillatt at dette skjer direkte og uten forvarsel. Hvis man derimot skulle ønske å senke fartene mer enn dette må det i hovedsak skje i to trinn, altså ved at når man egentlig ønsker å skilte 70 km/t må gå innom 80 km/t i første snitt. Et unntak som er angitt i håndboken er at det kan tillates å ha direkte sprang på 40 km/t dersom dette skjer unntaksvis for eksempel som et første tiltak ved en hendelse.

Også temaet trafikkstyringsystemer ved tilfeldige hendelser er omtalt i Håndbok R311. Det er blant annet oppgitt at per i dag er gjeldende regel at operatør alltid skal verifisere den oppståtte hendelsen via kameraer eller personer på stedet før trafikkstyringsplanen iverksettes. Det er derimot definert flere typer hendelser som kan være grunnlag for automatisk iverksetting av trafikkplaner, men dette gjelder mer akutte tilfeller enn de tidligere omtalte vanlige hendelsene som for eksempel nødstopp eller ulykke på veg. Nødpanelplaner beskrives som kun tillatte i tilfeller hvor vegtrafikksentralen ikke har mulighet til å iverksette reguleringen (Statens Vegvesen, 2017).

Tidsbruken fra trafikkstyringsplanen ved en hendelse iverksettes til kjørefeltet er stengt skal være 15 sekunder, og i de 15 sekundene før man har rødt kryss over kjørefeltet skal det være blinkende gule piler der. Dette er for at kjøretøyene skal ha muligheten til å bytte fil før kjørefeltet stenges. I tillegg skal avslutningen av en stenging av kjørefelt skje ved at grønne piler vises på skiltene over alle kjørefelt i 15 sekunder før de slukkes (Statens Vegvesen, 2017).

## **2.4 AIMSUN som simuleringsverktøy for hendelser i trafikken**

Aimsun Next 20 er et trafikksimuleringsverktøy originalt utviklet av bedriften TSS (Transport Simulation Systems) mellom 1989 og 1997. Programvaren var fra begynnelsen av et rent mikrosimuleringsverktøy, mens i dag tilbyr den også både makro- og mesosimulering samt hybrid meso/mikrosimulering og hybrid makro/mesosimulering. I 2018 ble Aimsun kjøpt opp av Siemens Mobility, og i samsvar med selskapets økte fokus på mobilitet har det i 2019-2020 blitt lansert tilleggsplattformer for simulering av autonome kjøretøy, transport på forespørsel, fotgjengere, syklistere og hvordan kollektivtransport brukes i et område (Aimsun, u.å.). I dette delkapittel beskrives de viktigste prinsippene for oppbygging av en modell i Aimsun, nyttig teoretisk bakgrunn for mikrosimuleringer i Aimsun, og noen innebygde funksjoner som kommer til nytte når forskningsspørsmålene skal besvares ved hjelp av simulering. Modelloppbyggingen, de ulike funksjonene og teorien bak mikrosimuleringer i Aimsun er beskrevet i programmets brukermanual (Aimsun, 2020). I tillegg pekes det på hvilke begrensinger programvaren har når det kommer til en realistisk simulering av hendelser og ITS systemer.

### **2.4.1 Bygging av basismodell i Aimsun Next 20**

En modell i Aimsun bygges opp ved å først legge inn de geometriske og funksjonelle spesifikasjonene til det nettverket man ønsker å simulere trafikk på. I tillegg legger man inn eventuell trafikk kontroll (signalregulering, tilfartskontroll, detektorer, variable skilt osv.) og kollektivlinjer dersom dette er en faktor i trafikkbildet. Vegstrekninger i Aimsun kalles seksjoner, og for de ulike seksjonene kan man definere blant annet vegtype, fartsgrense, tillatte kjøretøy, antall kjørefelt og kjørefeltbredder. Seksjoner kobles sammen av noder. Noder kan være av/påkjørsler, kryss, signalregulerte kryss, rundkjøringer eller en enkel sammenkobling av seksjoner som har ulike funksjonelle eller geometriske spesifikasjoner. For hver node defineres tillatte svingbevegelser og hvilke svingbevegelser som må vike for andre.

Detektorer kan settes opp i modellen der man ønsker punktmålinger av trafikken. Ulike parametre kan måles av detektoren, og man må spesifisere hvilke som skal samles inn basert på simuleringsformålet. Detektorene kan også brukes til å initiere trafikk kontroll, som signalregulering, tilfartskontroll og trafikkstyring med variable skilt (VMS). Signalreguleringer og tilfartskontroll er ikke aktuelt å bruke til denne oppgavens formål, og går dermed ikke nærmere inn på her. Variable skilt er derimot høyst aktuelt å bruke i modelleringen, men i Aimsun settes skiltene kun opp for presentasjonsformål og har ikke noen aktiv funksjon i modellen. Meldinger som gis til førerne via variable skilt i virkeligheten, må legges inn som tiltak for trafikk kontroll i Aimsun. Om det er et skilt i modellen har ingenting å si for om tiltaket gjennomføres, men det kan være greit å sette opp skiltene uansett for å kunne se for seg hvor de bør plasseres og dermed hvor man kan få meldinger om tiltak som nedsenket fartsgrense eller stenging av kjørefelt.

I tillegg til å sette opp selve infrastrukturen i modellen, kan det også være nødvendig å redigere de ulike kjøretøytypene man skal ta inn i modellen slik at disse reflekterer kjøretøyparken på det aktuelle området. Dette kan for eksempel gjelde gjennomsnittlig lengde, gjennomsnittlig bredde eller maksimum ønsket hastighet for kjøretøytypen. I tillegg kan det være nødvendig å justere oppførselsparametre for de ulike kjøretøytypene slik at de reflekterer førernes oppførsel i trafikken, noe som gjerne varierer alt etter hvor man er i verden. Parametre som gjerne varierer fra kultur til kultur kan være hvor villige man er til å akseptere fartsgrensen og hvor stor avstand man holder til kjøretøyet foran seg i en køsituasjon. I ulike kulturer kan man også ha ulik grad av samarbeid i trafikken, og man kjører gjerne med mer eller mindre aggressivitet.

#### **2.4.2 Trafikketerspørsel**

Etter at man har definert de geometriske og funksjonelle delene av modellen, og før man kjører en simulering i Aimsun, må man definere trafikkmengden som skal tilføres modellen i løpet av simuleringsperioden. Dette kan gjøres ved å definere en trafikktilstand (*traffic state*) eller en OD-matrise, som igjen danner grunnlaget for trafikketerspørselen til nettverket. Dersom man bruker en trafikktilstand gir man en verdi for innstrømning av trafikk til hver av de ulike seksjonene som vil få tilført trafikk fra utenfor det definerte nettverket. En OD-matrise kobles til ulike sentroider som man har definert i nettverket, hvor hver sentroide er et reisemål, en reisedestinasjon eller begge deler. Verdiene som legges inn i en OD-matrise beskriver hvor mange som reiser til og fra sentroiden i løpet av simuleringsperioden. Trafikketerspørselen kan være jevnt fordelt over hele simuleringsperioden, men dersom man ønsker en modell som er nærmere en faktisk trafikksituasjon kan det være ønskelig å definere en trafikkprofil som vil angi ulik fordeling av trafikketerspørsel i løpet av simuleringsperioden (Aimsun, 2020).

#### **2.4.3 Scenarioer**

Når man har satt opp alle de geometriske og funksjonelle spesifikasjonene i modellen og definert en trafikketerspørsel, kan man opprette ulike scenarioer som man ønsker å simulere. De ulike scenarioene kan skille seg fra hverandre ved å for eksempel ha ulike trafikkmengder, ulike kontrollplaner, ulike kollektivplaner eller ulike definerte hendelser eller strategier. Et valg man gjør når man oppretter et scenario er hvilken metode man skal kjøre modellen med. Metoden kan være mikro, meso eller hybrid simulering, makroskopisk tildelingsmodell eller en fire-stegs planleggingsmodell (Aimsun, 2020). Videre



omtales mikroskopisk simuleringsmetode ettersom dette er metoden som brukes videre til simulering for å besvare forskningsspørsmålene i denne rapporten.

Mikrosimulering i Aimsun gjøres ved å bruke et dynamisk scenario med enten en tildelingsmetode basert på stokastisk rutevalg eller dynamisk brukerlikevekt. Et dynamisk scenario med stokastisk rutevalg vil si at modellen tar hensyn til variasjoner over tid og at rutevalget tar hensyn til tilfeldigheter i rutevalget basert på statistiske distribusjoner (Márquez, 2010). Ved å velge dette tar man hensyn til variasjon som eksisterer i det virkelige trafikkbildet.

Hvert scenario har et eller flere eksperimenter, hvor ulike parametre kan varieres for å oppnå den trafikksituasjonen man ønsker å se på. Man kan for eksempel variere reaksjonstid, ulike oppførselsparametre eller ankomstalgoritmer. For hvert eksperiment kan man ha flere replikasjoner. Ettersom metoden er dynamisk vil hver replikasjon produsere litt ulike resultater, og det kan derfor være gunstig å kjøre flere replikasjoner for hvert eksperiment for å kunne luke bort uheldige eller urealistiske variasjoner.

#### **2.4.4 Vehicle Entry**

Når simuleringen så kjøres er det ankomstalgoritmene som bestemmer når et nytt kjøretøy skal genereres inn i modellen. De ulike ankomstalgoritmene i Aimsun Next 20 er *Exponential*, *Uniform*, *Normal*, *Constant*, *External* og *ASAP*. Navnet på de fire første algoritmene kommer av at tidsluken mellom to kjøretøy velges ut fra en distribusjon som enten er hhv. eksponentiell, uniform, normal eller konstant. Man kan også ha en distribusjon som er eksternt definert eller som baserer seg på «så fort som mulig» (*ASAP*)-prinsippet (Aimsun, 2020).

Eksponentiell distribusjon av tidslukene er brukt som standard i Aimsun. I en eksponentiell distribusjon brukes den gjennomsnittlige trafikkintensiteten ( $\lambda$ ) til seksjonen (i kjøretøy/sekund) som input parameter. Den gjennomsnittlige tidsluken er definert som  $1/\lambda$ . Tidsluken ( $t$ ) mellom et kjøretøy som genereres og kjøretøyet foran bestemmes av en variabel  $u$ , som er et tilfeldig tall mellom 0 og 1, og den gjennomsnittlige tidsluken (Aimsun, 2020). Formel 2 brukes for å finne denne tidsluken ved eksponentiell ankomstalgoritme.

*Formel 2*

$$t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(u) \quad (\text{Aimsun, 2020})$$

Når ankomstalgoritmene har tillatt et kjøretøy å bli generert i modellen bestemmes det også om det er nok plass for at kjøretøy skal kunne slippe inn på en seksjon. Tilgjengelig plass på seksjonen bestemmes av posisjonen til kjøretøyet foran, bremselengden til kjøretøyet foran, lengden av kjøretøyet foran og minimum distanse kjøretøyet foran må ha til bilen den følger. Dersom det ikke er plass til at kjøretøyet kan slippe inn på seksjonen, stilles kjøretøyene opp i en virtuell kø hvor kjøretøyene har den tidsluken mellom seg som ble generert ved ankomstalgoritmen. Ved *ASAP* ankomstalgoritme er det ingen tidsluke

mellom kjøretøyene i køen, og det eneste som bestemmer om de slipper inn på seksjonen er om det er plass til dem der eller ikke (Aimsun, 2020).

#### 2.4.5 Gipps car-following modell

Når det er flere kjøretøy på en vegstrekning, vil førerens oppførsel påvirkes av hvordan kjøretøyet foran oppfører seg. Hvordan kjøretøyene følger hverandre er forsøkt beskrevet på flere ulike måter, og man snakker gjerne om ulike grupperinger av «*car-following*» modeller basert på hvilken logikk som benyttes. GHR-modeller baserer seg på at akselerasjonen eller deselerasjonen til det følgende kjøretøyet bestemmes av fartsforskjellen mellom det følgende og det ledende kjøretøyet, og en sensitivitetsfaktor (Aakre og Lu, 2020). Andre modeller er klassifiserte som psykofysiske, hvor man definerer terskelverdier for når føreren av det følgende kjøretøyet påvirkes av det ledende kjøretøyet. Man tar altså hensyn til at føreren ikke reagerer på veldig små fartsforskjeller eller endringer i avstand mellom kjøretøyene som er lite betydningsfulle (Olstam og Tapani, 2004).

Andre har nyttet seg av *fuzzy*-logikk for å beskrive hvordan kjøretøyene følger hverandre. Denne typen *car-following* modell bruker et sett med *fuzzy* regler for å beskrive reaksjonen til det følgende kjøretøyet (Olstam og Tapani, 2004). Fuzzy regler kan være at kjøretøyene er «for nærme» eller at farten til kjøretøyet foran er «for lav». Man har altså ikke noen klart definerte grenser, og de ulike reglene overlapper gjerne hverandre.

Den siste grupperingen av *car-following* modeller baserer seg på antakelsen om at det følgende kjøretøyet alltid har en sikker avstand til det ledende kjøretøyet (Olstam og Tapani, 2004). Gipps *car-following* modell er en slik modell, og i Aimsun Next 20 er oppførselen til kjøretøyene basert på denne modellen (Aimsun, 2020). Modellen består av to deler. Den første delen beskriver hastigheten et kjøretøy kan akselerere til i løpet av et simuleringstrinn, og representerer altså kjøretøyet intensjon om å oppnå en viss hastighet. Den andre delen beskriver hvordan kjøretøyet begrenses av kjøretøyet foran når det forsøker å oppnå denne ønskede hastigheten, altså hva som er den maksimale hastigheten kjøretøyet klarer å nå i løpet av simuleringstrinnet tatt i betraktning dets egne begrensninger og begrensninger på grunn av kjøretøyet foran (Aimsun, 2020). En viktig faktor som er en del av denne andre delen av modellen, er føreren i det følgende kjøretøyet estimat av deselerasjonen til det ledende kjøretøyet. Dette estimatet består av den faktiske deselerasjonen til det ledende kjøretøyet multiplisert med en sensitivitetsfaktor som sier noe om hvor sensitiv føreren i det følgende kjøretøyet er til hva som skjer med kjøretøyet foran. Dersom sensitivitetsfaktoren er større enn 1 overestimerer føreren bak hvor mye det ledende kjøretøyet bremses opp, og blir dermed mer forsiktig enn nødvendig. Dermed økes tidsluken mellom kjøretøyene. Det motsatte skjer dersom sensitivitetsfaktoren er mindre enn 1 (Aimsun, 2020).

Man beregner altså to verdier for hvert simuleringstrinn; én for den maksimale hastigheten kjøretøyet kan nå i løpet av simuleringstrinnet uten begrensninger og én for den hastigheten som er mulig å oppnå tatt i betraktning de ulike begrensningene. Den minste av disse to verdiene vil være den farten man går videre med, ettersom dette blir den begrensende hastigheten. Etter at denne hastigheten er funnet, sjekker modellen at tidsluken front-front mellom de to kjøretøyene ved neste simuleringstrinn vil være større enn en definert, minimum tidsluke. Dersom den ikke er det, må den nye hastigheten justeres for å tilfredsstille dette. For neste simuleringstrinn oppdateres hastigheten til

denne nye hastigheten som har blitt funnet. Posisjonen til kjøretøyet oppdateres også slik at den nå stemmer med hvor mye kjøretøyet må ha forflyttet seg i løpet av simuleringstrinnet (Aimsun, 2020).

*Car-following* modellen som er beskrevet ovenfor skal kunne reflektere godt hva som skjer på veier med lav til moderat trafikk tetthet. Når man derimot har veier med høye tettheter som skaper avviklingsproblemer viser det seg at denne modellen ikke stemmer like godt. Dette er fordi man i Gipps-modellen antar et lineært forhold mellom avstand mellom kjøretøy og hastighet. Derfor har Aimsun brukt en modifisert *car-following* modell for å beskrive hva som skjer ved trafikkmengder opp mot og over vegens kapasitet (Aimsun, 2020). Det denne modifiserte modellen gjør er å endre ligningen for avstand mellom kjøretøyene slik at den bedre reflekterer avstanden mellom kjøretøy i en situasjon der trafikkavviklingen har brutt sammen.

#### **2.4.6 Lane-changing modell**

I et Aimsun-nettverk hvor man benytter seg av flere felt i samme kjøreretning trenger man også å benytte seg av en modell som kan beskrive hvordan kjøretøyene bestemmer om det er nødvendig, ønskelig og mulig å skifte kjørefelt. Prosessen som vil avgjøre om et kjøretøy skifter felt består av ulike avgjørelser som tas for hvert simuleringstrinn (Aimsun, 2020).

Om det er nødvendig å skifte felt bestemmes av flere faktorer; hvilke avkjørselsmuligheter som finnes i det nåværende kjørefeltet, avstanden til neste avkjørsel og hvordan trafikken flyter i det nåværende kjørefeltet. Føreren vil altså vurdere hastigheten i sitt nåværende kjørefelt opp mot sin ønskede hastighet og lengden på kø som eventuelt forekommer i dette kjørefeltet. Deretter vil føreren bestemme om det er ønskelig å skifte felt. Det vurderes så om det er mer gunstige forhold i målfeltet. Hvis køen er kortere i målfeltet eller hastigheten er høyere vil det være ønskelig å skifte felt så fremt man ikke er avhengig av en avkjørsel som er nært foreliggende i det nåværende feltet. Dersom det nå er vurdert at det både er nødvendig og ønskelig å skifte kjørefelt, må det sjekkes om det er mulig å skifte kjørefelt. Dette gjøres ved å sjekke om man har stor nok tidsluke mellom kjøretøyene i målfeltet til å trygt kunne foreta et feltskifte. Tidsluken kan beregnes mellom to kjøretøy ved siden av, foran eller bak kjøretøyet. Hvor den trygge luken er i forhold til kjøretøyet vil avgjøre om kjøretøyet kan skifte kjørefelt direkte, eller om det må øke hastigheten eller bremse opp for å nå en trygg luke (Aimsun, 2020).

#### **2.4.7 Trafikkstyring i Aimsun**

I Aimsun Next 20 er det mulig å definere ulike trafikkforhold/hendelser og strategier for å kunne se effekten av ulike trafikkstyringsplaner som utløses ved både uforutsette og forutsette hendelser på vegen. Disse kan ha definerte tider de utløses på, de kan gjelde gjennom hele scenarioet eller de kan utløses av triggere. Trafikkforhold og hendelser, og strategier kan hukes av for i de ulike scenarioene, og man kan da se effekten av dem sammenlignet med normalsituasjonen.

En strategi kan inneholde flere tiltak som kan ha ulike tidsrammer eller utløses av ulike triggere. De ulike tiltakene og trafikkforholdene/hendelsene som det er mulig å velge mellom er de samme, men forskjellen mellom dem er at trafikkforholdene/hendelsene

brukes til å representere endringer i nettverket som ikke er en del av en trafikkstyringsstrategi mens tiltakene er bevisste endringer i nettverket som en respons på endrede trafikkforhold eller hendelser. Tabell 2.4 viser de ulike tiltakene eller trafikkforhold/hendelsene som det er mulig å benytte seg av i Aimsun Next 20.

Tabell 2.4 Mulig tiltak/trafikkforhold/hendelser

<b>Tiltak/trafikkforhold /hendelser</b>	<b>Beskrivelse</b>
<b>Lane Closure</b>	Stenger et valgt kjørefelt i en seksjon, eller en definert del av en seksjon.
<b>Turn Closure</b>	Stenger en svingbevegelse i en node. Denne funksjonen kan kun benyttes når trafikketerspørselen er definert ved hjelp av OD-matriser.
<b>Speed reduction</b>	Endrer fartsgrensen på en seksjon, del av en seksjon, et kjørefelt, type veg eller svingbevegelse i node.
<b>Forced Turn</b>	Tvinger kjøretøyene til å bruke en annen gitt svingbevegelse i en node. Kjøretøy som skal i fra seksjon A til B kan bli tvunget til å bruke svingbevegelse til seksjon C i stedet. Man kan også definere hvor stor prosent av kjøretøyene som faktisk etterfølger dette pålegget.
<b>Force En-Route Path Update</b>	Tvinger kjøretøyene til å endre rutevalget for å nå sin destinasjon. Dette kan kun brukes når trafikketerspørselen er definert ved hjelp av OD-matriser. Her kan man også definere hvor stor prosent som faktisk gjør dette.
<b>Destination Change</b>	Endrer destinasjonen til kjøretøyene når man har definert trafikketerspørsel ved hjelp av OD-matriser.
<b>Park and Ride</b>	Sender kjøretøy til en annen destinasjon, hvor passasjerer og fører parkerer og så fullfører turen til den originale destinasjonen med kollektiv transport.
<b>Section Incident</b>	Blokkerer et eller flere kjørefelt på en spesifisert lengde og sted på en seksjon.
<b>Periodic Section Incident</b>	Lager tilfeldige hendelser på vegen (blokkert del av felt) innenfor et spesifisert område og tid. Man angir også lengden på blokkeringen, hvor lenge de i snitt varer, og hvor ofte de forekommer (samt avvik fra dette).
<b>Control Plan Change</b>	Endrer fra den originale trafikk kontrollplanen i scenarioet til en annen trafikk kontrollplan.
<b>Section Behavioural Parameters Change</b>	For mesoskopisk simulering kan man endre reaksjonstidsfaktoren til en gitt seksjon. For mikroskopisk simulering kan man endre synligheten til reserverte kjørefelt, feltskifteparametre, kjøpløsningsparametre eller man kan aktivere to-felts car-following modell.
<b>Turn Behavioural Parameters Change</b>	For mesoskopisk simulering kan man endre hvor langt frem man kan se en node, reaksjonstiden for svingbevegelser og parametre for vikende kjøretøy. For mikroskopisk simulering

	kan man også endre hvor langt frem man kan se en node samt legge til ventetid man tåler før man bestemmer seg for å ikke gjennomføre en svingbevegelse. Man kan også endre vikepliktsparametre.
<b>Reserved Lane Deactivation</b>	Endrer kjørefelt, eller del av kjørefelt, reservert for spesifikke kjøretøytyper til å være mulig å bruke for alle kjøretøytyper.
<b>Turn Cooperation Model Activation</b>	Endrer prioriteten til valgt svingbevegelser i en node. Her kan man også velge om det kun er enkelte kjøretøytyper som har forkjørsrett i svingbevegelsen.

De mest relevante strategiene/trafikkforholdene for simulering av hendelser og trafikkstyring ved hjelp av ITS er *Section Incident*, *Speed Reduction* og *Lane Closure*. For disse tre tiltakene/trafikkforholdene/hendelsene er det mulig å legge til en avstand for synlighet. Dette vil bestemme når førerne registrerer endringene i nettverket, og dermed når og hvordan de tar dette i betraktning for videre valg. For *Section Incident* kan man også legge til en reduksjon av fart i forbindelse med hendelsen, og man kan spesifisere hvor langt foran og bak hendelsen dette skal gjelde. For *Speed Reduction* og *Lane Closure* kan man spesifisere hvilke kjøretøytyper tiltaket/trafikkforholdet skal gjelde.

#### 2.4.8 Begrensninger

Ved studering av funksjoner og mulighetene for simulering av ulike hendelser i Aimsun Next 20, har det dukket opp noen begrensninger knyttet til mulighetene for å modellere de ulike hendelsestypene som vil være interessante. Det er blant annet ikke mulig å velge at kun deler av et kjørefelt er blokkert, eller at skulderen er blokkert. Modellen har også begrensede oppførselsparametre knyttet til hva som skjer ved siden av kjøretøyet, og oppførselen er dermed uavhengig av skulderbredde og eventuelle objekter man legger til i modellen langs vegen. Dette vil gjøre det vanskelig å se noen forskjell i effekten av ulike skulderbredder uten å gjøre noen antakelser om hvordan en ulykke eller stopp helt eller delvis på skulder vil påvirke trafikkbildet.

En annen begrensning i programvaren som gjør at modellen vil skille seg fra virkeligheten er at dersom man setter ned fartsgrense på en del av en veg (ved å bruke *Speed Reduction* eller reduksjon av fart i forbindelse med *Section Incident*) vil fartsgrensen endres også for kjøretøy som allerede er inne i segmentet som har endret fart (Müller, Carlson og Kraus, 2015). Det vil si at førere som i virkeligheten ikke vil ha sett denne fartsgrenseendringen fordi de har passert det variable skiltet, fortsatt vil sette ned hastigheten sin på samme måte som førerne som ser skiltet.

# 3

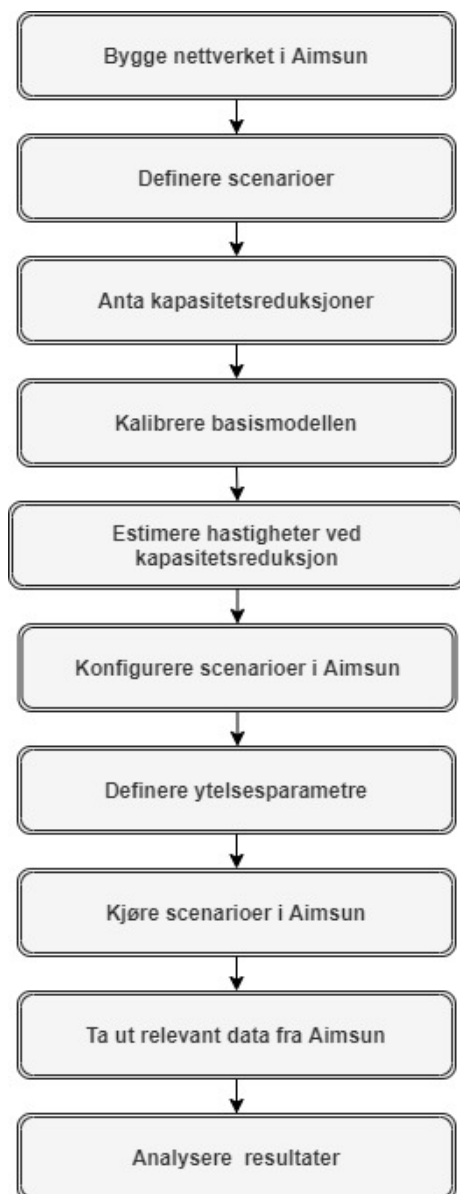
## Kapittel 3

---

# Metode

Forskningsspørsmålene knyttes til effekten av skulderbredde ved ulike hendelser, samt hvordan effekten av å bruke ITS-tiltak ved hendelser kan bøte på eventuelle negative konsekvenser av smalere skulder. Analysen som gjennomføres i denne studien baserer seg dermed på å teste ut ulike hendelser ved ulike skulderbredder med og uten ITS-tiltak, og sammenligne definerte ytelsesparametre for de ulike scenarioene. Det er ikke funnet noen metode i litteraturen som kan brukes til å simulere hendelser som blokkerer skulder og kjørefelt delvis når man ikke har ekte data å basere undersøkelsene på. Dermed er det nødvendig å utvikle en metode basert på litteratur om trafikkteori, samt kunnskap om trafikksimuleringsprogrammer og funksjoner og begrensinger knyttet til disse. Trafikk-simuleringer på mikronivå baserer seg på at flere av de mange variablene knyttet til føreropphør er tilfeldige, og det er derfor ikke nødvendigvis slik at enkle formler fra teorien, som gjerne beskriver trafikken på makronivå, kan direkte sammenlignes med resultater fra trafikksimuleringer. Det må derfor gjøres ulike antakelser omkring trafikksimuleringenes kobling til teoretiske prinsipper for hva som skjer med trafikken ved en hendelse.

Figur 3.1 viser et flytdiagram for den brukte metoden. De ulike delene av metoden er beskrevet i dette kapitlet. I tillegg kommer det fram hvordan denne metoden er blitt utviklet.



Figur 3.1 Flytdiagram for metoden

### 3.1 Bakgrunn for metodevalg

Trafikksimulering er valgt som metode for å besvare forskningsspørsmålene ettersom trafikksimuleringsmodeller gir muligheten til å variere mange ulike parametre både knyttet til den geometriske utformingen til nettverket og oppførselsparametre knyttet til førerne (TRB, 2000). Trafikkmålinger fra virkeligheten ville ha gjort det vanskelig å sammenligne ulike skulderbredder, da dette ville ha krevd at man ser på ulike veger som da har andre parametre som også varierer. I tillegg er det utfordrende å finne relevante vegstrekninger i dagen som benytter automatisk hendelsesdeteksjon og variable skilt ved hendelser. Trafikkmålinger fra virkeligheten ville også vært en utfordring med tanke på HMS ettersom man også ser på hendelser i trafikken. Det vil være vanskelig å samle nok data om ulike hendelser ettersom man ikke kan konstruere disse hendelsene uten at dette går utover sikkerheten til de som utfører forsøket og trafikken ellers.

Ved bruk av et trafikksimuleringsprogram må det også tas i betraktning hvilket nivå det er nødvendig å simulere på. Ifølge en norsk veileder for bruk av Aimsun utviklet av Asplan Viak (Persson *et al.*, 2019) baserer man gjerne valg av makro, meso- eller mikrosimulering på størrelsen på nettverket som skal simuleres og tidshorizonten til simuleringene. Ettersom det her er ønskelig å se på en enkeltstående strekning på et operasjonelt nivå kan man si at størrelsen på nettverket er lite og tidshorizonten er kort. Mikrosimulering blir dermed det naturlige valget. Det er også oppgitt i veilederen at for å simulere effekten av ITS-tiltak er det nødvendig å gjøre det med en detaljeringsgrad som kun er oppnåelig ved hjelp av mikrosimulering (Persson *et al.*, 2019).

Valg av programvaren Aimsun Next 20 ble tatt på bakgrunn av noe kjennskap til programmet fra tidligere, tilgjengelighet av lisens og at programvaren inneholder en god del av de nødvendige funksjonene for å gjennomføre den tenkte simuleringen. I tillegg er programvaren anerkjent i fagmiljøet, og tilgjengelig hjelpemateriale er oversiktlig. Aimsun har også blitt brukt i flere tidligere studier funnet i litteraturstudiet, noe som gav en viss klarhet i hva som er mulighetene i programmet.

## 3.2 Utvikling av metode

Ved utvikling av modellen i Aimsun er det nødvendig å først få klarhet i hvilke muligheter man har for å legge inn ulike hendelser og ITS-tiltak. Som beskrevet i delkapittel 2.4 finnes det en rekke muligheter for trafikkstyring i programvaren, men ulike hendelsestyper viser seg å være mer utfordrende da man kun kan opprette hendelser som blokkerer et eller flere kjørefelt. Delvis blokkering av kjørefelt eller stopp kun på skulder er ikke mulig. I startfasen av utviklingen av Aimsun-modellen ble det derfor forsøkt å blant annet legge inn objekter på skulder og endre geometrien til vegen slik at kjørefeltene var smalere på en del av strekningen for å se hvilken effekt dette hadde på kjøretøyene. Kjøretøyene ble stort sett ikke påvirket av slike endringer på grunn av begrensede oppførselsparametre knyttet til hva som skjer ved siden av kjøretøyene, og det ble klart at det var nødvendig å simulere hendelser på andre måter. Det ble også sett på om det var muligheter for å kode egne hendelser ved hjelp av API som kunne overstyre blant annet oppførselsparametre for kjøretøyene. Dette viste seg også å være utfordrende å få til uten å miste kontrollen over andre sentrale funksjonaliteter i Aimsun.

Gjennom mailkorrespondanse med *UK managing director* i Aimsun Ltd., Gavin Jackman (personlig kommunikasjon, 11.02.2021) ble det klart at den beste måten å se effekten av ulike hendelser sannsynligvis er å forsøke å imitere hva som skjer med kapasiteten til vegen når hendelsen oppstår. Ifølge Jackman er det mest praktisk å imitere redusert kapasitet i Aimsun ved å legge inn fartsreduksjon på en del av strekningen. *Hadi, Sinha og Wang* har i sine undersøkelser også kommet fram til at hastighet er den mest gunstige parameteren å endre på for å kunne simulere ulike reduksjoner i kapasitet (Hadi, Sinha og Wang, 2007). For å kunne gjøre dette må man først gjøre en vurdering av hvor stor kapasitetsreduksjonen er ved ulike hendelser.

I HCM er det kun noen få ulike hendelsestyper det oppgis kapasitetsreduksjonen for (se Tabell 2.1). Ettersom det er ønskelig se på ulike grader av blokkering av skulder og kjøre-

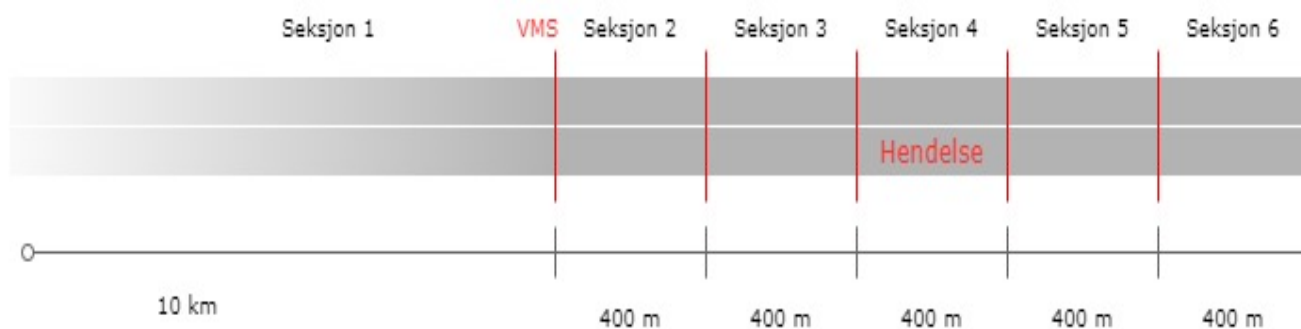


felt må en vurdering av kapasitetsreduksjon gjøres for hvert scenario som skal brukes i analysen. Denne vurderingen baserer seg på verdiene i Tabell 2.1, andel av kjørefeltet og skulder som blir blokkert, nødvendig spillrom for kjøretøyene, samt en antatt *rubbernecking*-effekt for ulike hendelsestyper. Beskrivelsen av hvordan man kom fram til de ulike antatte kapasitetsreduksjonene kan sees i kapittel 3.4 Scenarioer.

Når man skal kjøre simuleringer av modellen hvor målet er å justere kapasiteten på en del av strekningen må man først finne ut hvilken kapasitet man har på vegstrekningen ved normal situasjon. Modellen må kalibreres slik at den gir en kapasitet som stemmer med norske forhold. Denne kalibreringsprosessen beskrives i kapittel 3.5 Kalibrering av basismodellen. Etter dette er det nødvendig å finne ut hvilken hastighet kjøretøyene vil holde ved en gitt kapasitetsreduksjon slik at man kan legge inn en fornuftig hastighetsreduksjon ved hendelsene. Estimeringen av hastigheter ved kapasitetsreduksjon er en omfattende prosess, ettersom man må finne ut hvordan man justerer forholdet mellom hastighet og trafikkvolumet ved en ny kapasitet. Denne prosessen beskrives i kapittel 3.6 Estimering av hastigheter ved kapasitetsreduksjon.

### 3.3 Nettverket

Nettverket som brukes til simuleringer består av en rett strekning på 12 km med tverrprofilen til en H3 veg (se Figur 1.1) i én kjøreretning. Ettersom skulderbredden man legger inn i den geometriske modellen ikke har noen effekt på simuleringene, trenger man ikke å endre noe ved geometrien for de ulike scenarioene. Smalere skulderbredde tas i betraktningen gjennom reduksjonen i kapasitet ved ulike hendelsestyper. Figur 3.2 viser en illustrasjon (ikke skalert) av nettverket.



Figur 3.2 Illustrasjon av nettverket

Vegen har ikke avkjørsler eller påkjørsler, ettersom det er ønskelig at det ikke tas hensyn til kjøretøy som velger å ta en annen rute ved en hendelse på vegen. Hele strekningen er delt inn i 6 seksjoner. Den første seksjonen er 10 km lang, og tenkes på som en «påslippseksjon» for kjøretøy. I startfasen av analysen viste dette seg å være nødvendig ettersom man i noen tilfeller fikk køer som var så lange at de strakk seg utenfor nettverket dermed bygde opp virtuelle køer. Opphopning av kjøretøy utenfor nettverket kan føre til feilaktige

slutninger om ytelsen ved de ulike scenarioene, da disse kjøretøyene ikke blir en del av de aktuelle resultatene for simuleringen (Dowling, Skabardonis og Alexiadis, 2004).

Hver av de neste 5 seksjonene er 400 meter lange, og har variable skilte i starten for å kunne varsle kjøretøy om hendelser. 400 meter mellom snitt med variable skilte er oppgitt avstand i Statens Vegvesens *Håndbok R311 Trafikkstyringssystemer på veg* (Statens Vegvesen, 2017), og vil i den videre analysen gi føringer for hvor stor del av den totale strekningen som er stengt eller har nedsatt fart.

Noen antakelser knyttet til føreroppførselen er lagt inn som en del av basismodellen, enten som en del av beskrivelsen av kjøretøy eller vegstrekning, for at modellen skal være mest mulig virkelighetstro. Tidlige kjøring av modellen viste at kjøretøyene så ut til å oppføre seg for «fint», uten brå bevegelser eller uoppmerksomhet. For å kunne ligne en virkelig trafikksituasjon antas det dermed at noen av kjøretøyene skifter felt uten å ta hensyn til om det blir ustabilitet i trafikkflyten, da det antas at dette kan skje i trafikken på grunn av menneskelige feil og fordi det kan være vanskelig å bedømme trygge luker. I tillegg antas det at 10% av kjøretøyene som passerer et kjøretøy ved å bruke venstre felt forblir i dette feltet til det må skifte felt igjen for å nå en avkjørsel. Det antas også at 95% av førerne kan samarbeide om å slippe hverandre inn i luker dersom et kjøretøy prøver å skifte felt. 10% aggressivitet i feltskiftmodellen legges også til, ettersom at man antar at sensitiviteten til hvordan føreren foran akselererer eller deselererer ikke nødvendigvis er 100% for alle kjøretøy.

I modellen benyttes kun personbiler, da det er ønskelig å forenkle analysen til å kun gjelde personbilenheter, pbe. Dersom man ønsker å se på hvordan ulike andeler tungtrafikk påvirker resultatene vil dette kreve videre analyse.

Det bygde nettverket verifiseres ved å se på animeringene og hovedresultatene for å se om man har tydelige avvik i modellen. Avvik kan for eksempel være at kjøretøyene ikke ser ut til å skifte felt når dette er naturlig, at de ikke genereres korrekt eller at de har problemer med å holde fartsgrensen.

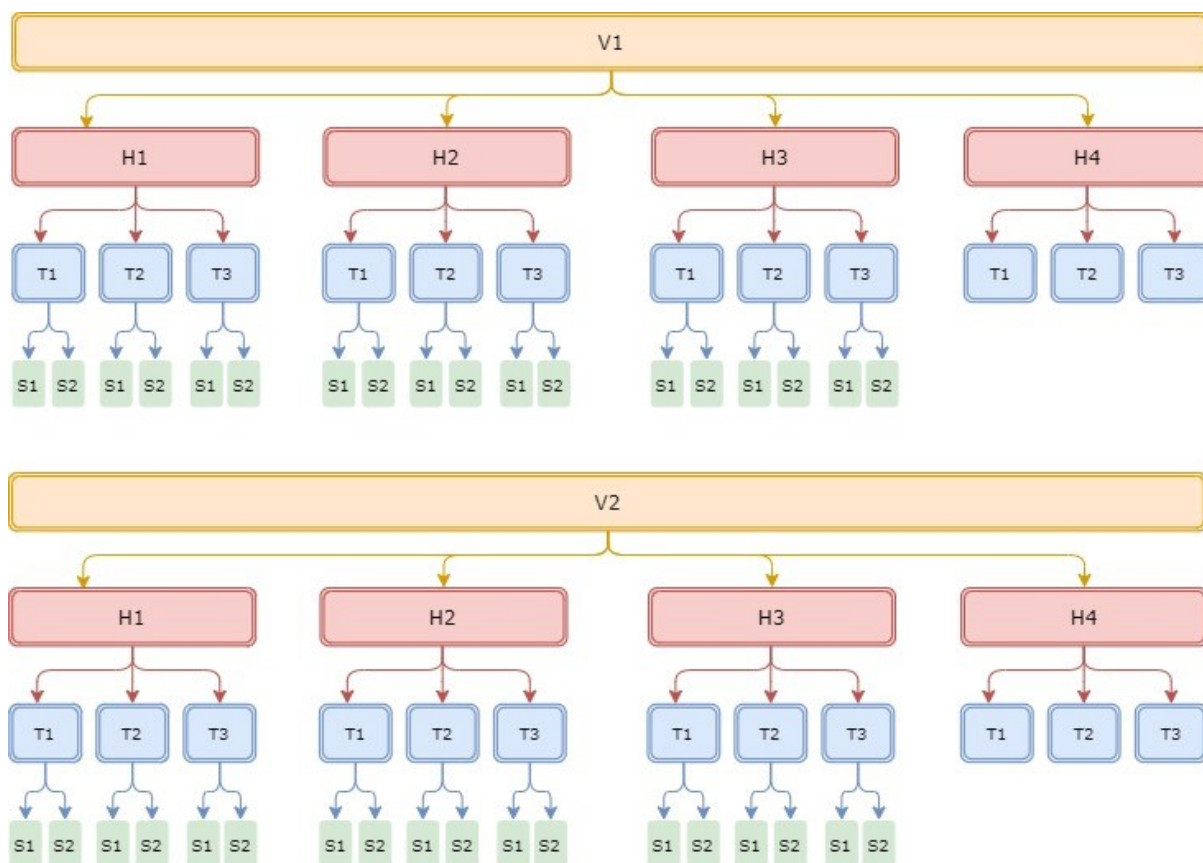
## **3.4 Scenarioer**

### **3.4.1 Generelt**

Selve forsøket består av ulike scenarioer der man varierer trafikketerspørsel, skulderbredde, hendelsestype, hendelsesvarighet og om man har ITS-tiltak eller ikke. Alle scenarioene har en simuleringsperiode på 3 timer, hvor hvert simuleringstrinn er på 1 sekund. Statistikk om modellen samles inn for 5-minuttersintervaller. For hvert scenario kjøres hele simuleringen som 10 replikasjoner ettersom man vil få noen tilfeldige variasjoner i en slik dynamisk mikrosimulering og ønsker å begrense usikkerheten knyttet til tilfeldig variasjon av parametre. 10 replikasjoner ansees som tilstrekkelig antall for denne modellen, ettersom kjøretøyene ikke gjennomfører valg av rute og derfor ikke påvirkes av tilfeldigheter knyttet til rutevalg (Department of Planning, Transport and Infrastructure, 2019). Gjennomsnittet av disse 10 replikasjonene beregnes i Aimsun, og ansees som resultatet for scenarioet.

Alle hendelsene skjer på seksjon 4 i nettverket, og alle er anslått å ha samme effekt på kapasiteten på vegen over hele seksjonen, altså i 400 meter. Kjøretøyene oppfører seg altså som om den aktuelle delen av kjørefeltet er blokkert og som om de er påført en *rubbernecking*-effekt gjennom hele seksjonen.

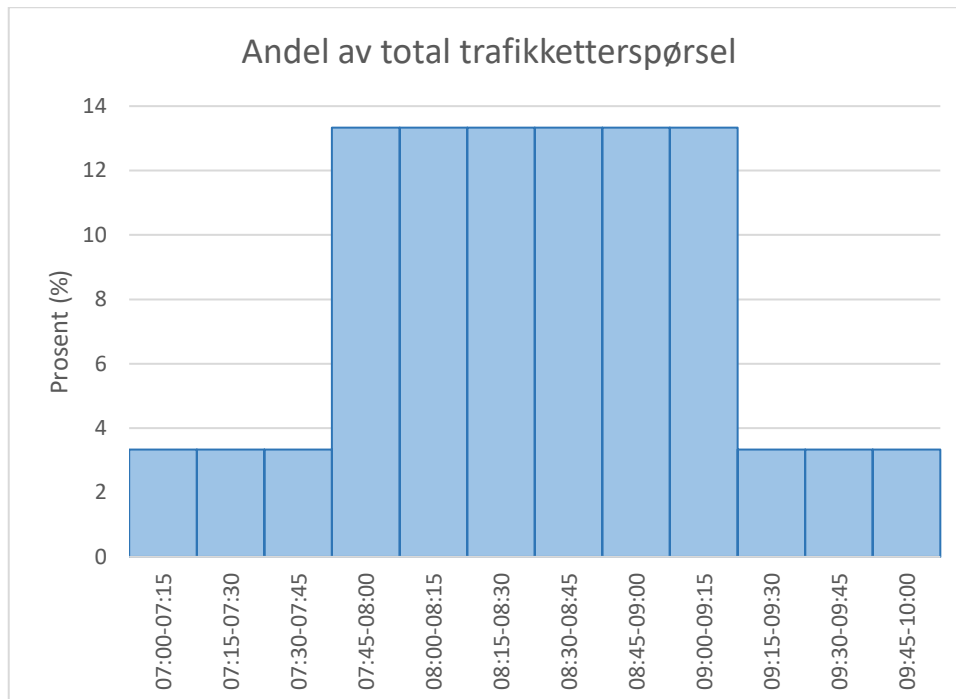
Figur 3.3 viser hvordan scenarioene er bygget opp. De ulike varighetene uttrykkes med V1-V2, de ulike hendelsestypene uttrykkes med H1-H4, de ulike trafikketterspørslene med T1-T3 og de ulike skulderbreddene med S1-S2. H4 er antatt ikke avhengig av skulderbredde, og varieres dermed kun med ulike varigheter og trafikketterspørsler. Dette forklares nærmere i delkapittel 3.4.5 Hendelse. Alle kombinasjoner av varighet og trafikketterspørsler kjøres også med ITS-tiltak, da det antas at skulderbredde og hendelsestype ikke påvirker effekten av ITS-tiltaket. Totalt simuleres 48 ulike scenarioer. I det videre forklares de ulike trafikketterspørslene, varighetene, skulderbreddene og hendelsene, samt ITS-tiltaket.



Figur 3.3 Scenarioer

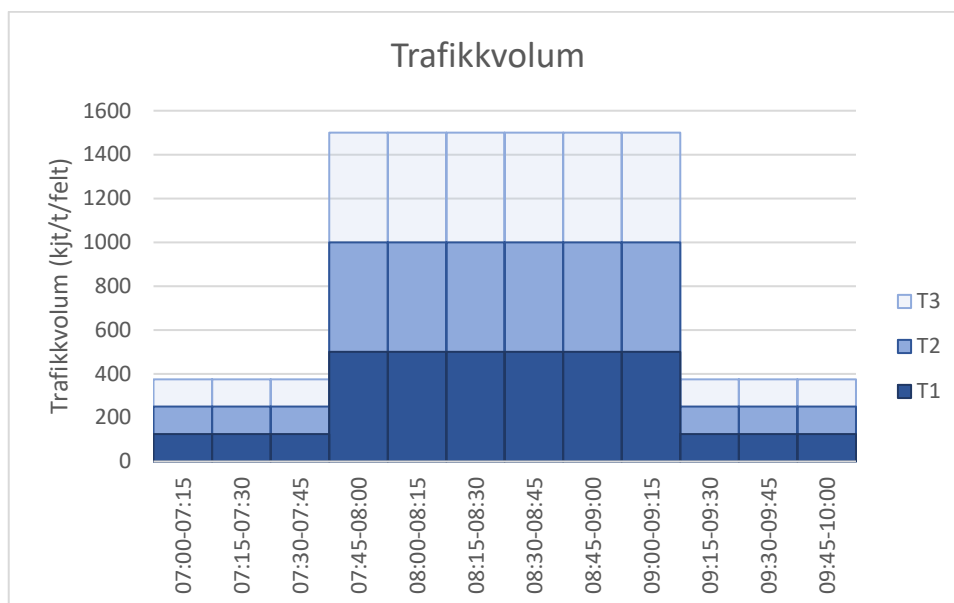
### 3.4.2 Trafikketterspørsel

Fordi kapasitetsreduksjon forventes å ha stor effekt ved trafikketterspørsel opp mot denne nye kapasiteten, men mindre effekt ved lavere trafikketterspørsel, velges det i forsøkene å se på tre ulike trafikketterspørsler. Disse tre trafikketterspørslene kalles T1, T2 og T3, og baserer seg på samme trafikkprofil. I løpet av simuleringsperioden på tre timer genererer T1 1875 kjøretøy til vegstrekningen, mens T2 generer 3750 og T3 generer 5625 kjøretøy. Et trafikkprofil distribuerer det totale antallet kjøretøy på 15 minutters intervaller basert på en prosentandel man har angitt for hvert intervall. Trafikkprofilet som brukes i simuleringene vises i Figur 3.4, og trafikkvolumene dette resulterer i vises i Figur 3.5.



Figur 3.4 Trafikkprofil for simuleringsperioden

For å kunne se effekten av hendelsene begynner simuleringsperioden med lav trafikketterspørsel de første 45 minuttene, høyere trafikketterspørsel i midten av simuleringsperioden, mens man har samme lave verdier som i starten de siste 45 minuttene. Dette gjøres for at man skal kunne se hvordan eventuell kø utvikler seg når trafikketterspørsel øker, og for at man ikke skal ha en veg som allerede er «mettet» når simuleringsperioden starter i de scenarioene der man har maksimal trafikketterspørsel opp mot kapasitet. Trafikketterspørselen er lav igjen ved slutten av simuleringsperioden for at man skal kunne fange opp hvordan eventuell kø oppløses når man igjen har mindre trafikk som slippes inn på nettverket. I virkeligheten vil man ikke ha så store sprang mellom trafikkvolumer i løpet av 15 minutter som man har her, og man vil naturligvis ha mye mer variasjon mellom de ulike intervallene. Et slikt profil er dermed ikke realistisk, men brukes for å tydeligere kunne utforske hvordan trafikketterspørselen påvirker de ulike effektene man ser på. Figur 3.5 viser hvilke trafikkvolumer man slipper på strekningen ved de ulike trafikketterspørslene.



Figur 3.5 Trafikkvolum ved T1, T2 og T3

I tillegg til de ulike hendessscenarierne simuleres situasjonen der man ikke har en hendelse ved de ulike trafikketerspørslene. Disse simuleringene kalles Basis T1, Basis T2 og Basis T3 og har hhv. trafikketerspørsmål T1, T2 og T3. Dette gjøres for å kunne se forskjeller mellom resultatene fra hendelser og hvordan situasjonen er når trafikken flyter som normalt.

### 3.4.3 Varighet

I studien sees det på to ulike varigheter, V1 og V2. V1 har en varighet som er lengre enn simuleringsperioden. Trafikken er altså påvirket av kapasitetsreduksjonen på grunn av hendelsen eller ITS-tiltaket gjennom hele simuleringen. Man vil på denne måten kunne se hva som skjer ved de hendelsene som påvirker trafikkavvikling og trafikksikkerhet over lang tid. V2 er basert på den gjennomsnittlige hendelsesvarigheten funnet ved observerte data av *Giuliano* (1989), som diskutert i kapittel 2.3.2, og er satt til å være 37 minutter fra klokken 08:15. Altså 1 time og 15 minutter inn i simuleringsperioden. Hele hendelsen skjer dermed når man har størst trafikketerspørsmål ifølge trafikkprofilen.

### 3.4.4 Skulderbredde

De to ulike skulderbreddene som brukes i analysen kalles S1 og S2 og er på hhv. 2,75 meter og 1,50 meter. Det vil dermed være mulig å se effekten av bruk av dagens standard for 4-felts motorveg med fartsgrense 110 km/t (H3) og eksempelet på smal 4-felts motorveg presentert i Statens Vegvesens *Utredning av smal 4-felts veg og standarder på veger med ÅDT 6000-20 000* (Statens Vegvesen, 2019a).

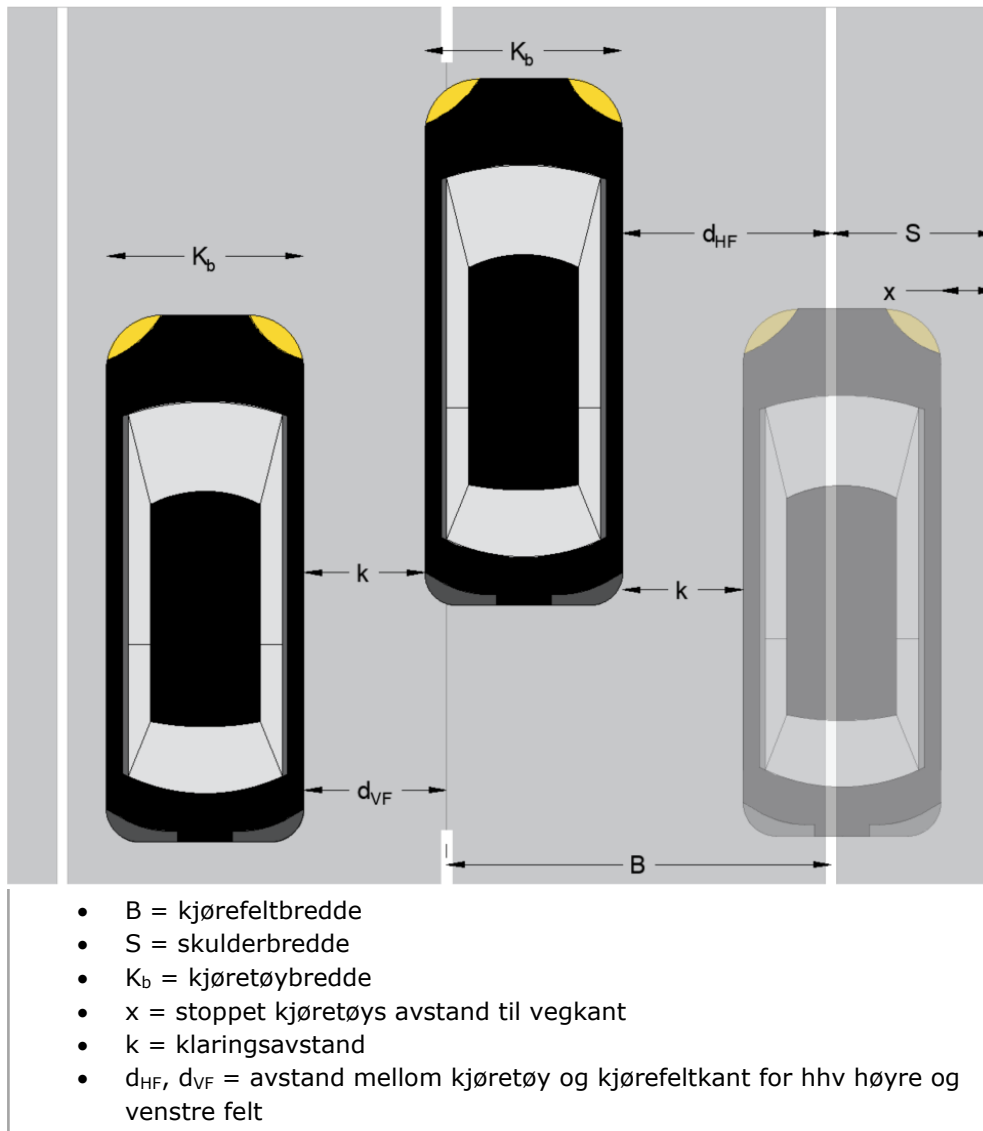
### 3.4.5 Hendelse

#### Estimat av kapasitetsreduksjon

Det er i denne analysen ønskelig å kunne si noe om effekten av skulderbredde og avbøtende tiltak ved ulike hendelser. Det er derfor valgt å bruke fire ulike hendelsestyper i simuleringene, H1, H2, H3 og H4. For hver hendelse gjøres det et estimat av kapasitetsreduksjonen dette vil medføre basert på verdier fra Highway Capacity Manual (HCM) (TRB, 2000) og basert på en vurdering av hvor mye trafikken hindres i tilfeller der HCM ikke er tilstrekkelig detaljert. Kapasitetsreduksjonsfaktoren ved ulykke som blokkerer et felt er oppgitt eksplisitt i HCM og brukes dermed direkte, mens andre typer hendelser må estimeres på en annen måte.

Hver av hendelse-skulderbredde kombinasjonene er tegnet opp i Autocad for å bedre visualisere hva som skjer ved hendelsen, og for å kunne ha kontroll på ulike mål som kjøretøyets bredde, klaringsavstand og andel av kjørefelt fysisk blokkert. Ifølge vegnormalene har personbiler en dimensjonerende bredde på 1,80 meter (Statens Vegvesen, 2019b). Det kan diskuteres om denne dimensjonerende bredden er reell med tanke på de siste årenes endringer i kjøretøyparken, og endringer som kan komme i framtiden. Nyere personbiler er gjerne bredere enn den dimensjonerende bredden fordi kravene til sikkerhetsutstyr man må ha plass til, og ønsket om bedre komfort i bilen øker (Solberg, 2016). Ifølge et notat utarbeidet av Multiconsult i forbindelse med vurderingen av tverrsnitt på 4-felts motorveg, kan man anta at sideveis klaring til objekter for personbiler på motorveg må være minst 1,10 meter (Multiconsult, 2019). Klaringsavstanden og kjøretøybredden til det stoppede kjøretøyet bestemmer hvor mye av kjørefeltet som fortsatt kan brukes når et kjøretøy står henstilt helt eller delvis på skulder. Dette kan gjerne sees på som en gjenstående effektiv bredde av kjørefeltet.

Figur 3.6 viser en skisse av hvordan situasjonen kan se ut når et kjøretøy er stoppet på skulder.



Figur 3.6 Illustrasjon av posisjonering av kjøretøy ved nødstopp på veg, med aktuelle mål

For å kunne gjøre antakelser om redusert kapasitet på en systematisk måte, er det her antatt at andelen av et kjørefelt som er blokkert gjenspeiles av hvor mye kjøretøyene må justere sidevegsposisjonen sin i kjørefeltet for å kunne ha minst 1,10 meter fra et kjøretøy som er stoppet. Det antas også at det er en direkte sammenheng mellom hvor mye av kjørefeltet som er blokkert og hvor mye kapasiteten reduseres på grunn av den fysiske hindringen. Et estimat av gjenstående kapasitet (kapasitetsreduksjonsfaktoren) på grunn av den fysiske hindringen foreslås dermed å kunne beskrives ved Formel 3.

Formel 3

$$CAF_{h,i} = 1 - \frac{d_i - d_0}{\frac{B}{2}} \rightarrow 1 - \frac{2d_i - 2d_0}{B}$$

Hvor:

- $CAF_h$  = Kapasitetsreduksjonsfaktor på grunn av fysisk hindring. i = HF (høyre felt), VF (venstre felt)

- $d_i$  = avstand mellom kjøretøy og kjørefeltkant (m).  $i = HF, VF$ .
- $d_0$  = avstand mellom kjøretøy og kjørefeltkant når kjøretøy er midt i kjørefeltet (m)
- $B$  = kjørefeltbredde (m)

Avstanden mellom kjøretøy og kjørefeltkant når kjøretøyet er midt i kjørefeltet,  $d_0$ , og avstanden mellom kjøretøy og kjørefeltkant,  $d_{HF}$  og  $d_{VF}$ , kan uttrykkes ved de geometriske sammenhengene gitt i Formel 4, Formel 5 og Formel 6.

Formel 4

$$d_0 = \frac{B - K_b}{2}$$

Formel 5

Hvis  $d_0 < K_b - (S - x) + k$

$$d_{HF} = K_b - (S - x) + k$$

ellers

$$d_{HF} = d_0$$

Formel 6

Hvis  $d_{HF} > B - K_b - k + d_0$

$$d_{VF} = d_{HF} + K_b + k - B$$

ellers

$$d_{VF} = d_0$$

Hvor:

- $K_b$  = dimensjonerende bredde av kjøretøy (m)
- $S$  = skulderbredde (m)
- $x$  = stoppet kjøretøys avstand til vegkant (m)
- $k$  = klaringsavstand (m)

I tillegg til denne kapasitetsreduksjonen på grunn av fysisk hindring har man en kapasitetsreduksjon på grunn av den tidligere omtalte *rubbernecking*-effekten. Denne delen av kapasitetsreduksjonen kalles i det videre  $CAF_r$ . På bakgrunn av HCM sitt estimat av kapasitetsreduksjon ved blokkering av skulder (*shoulder disablement* i Tabell 2.1) antas det at man har 5% kapasitetsreduksjon på grunn av rubbernecking ved nødstop (  $CAF_r = 0.95$ ). Den totale kapasitetsreduksjonsfaktoren er antatt å være mulig å estimere ved hjelp av Formel 7.

Formel 7

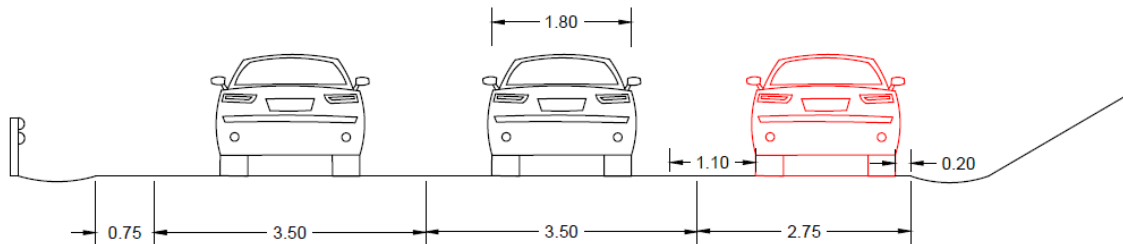
$$CAF = CAF_h * CAF_r$$

I det videre beskrives de ulike hendelsestypene. Resultatene fra antakelsene av kapasitetsreduksjoner vises som en del av kapittel 4 Resultater.



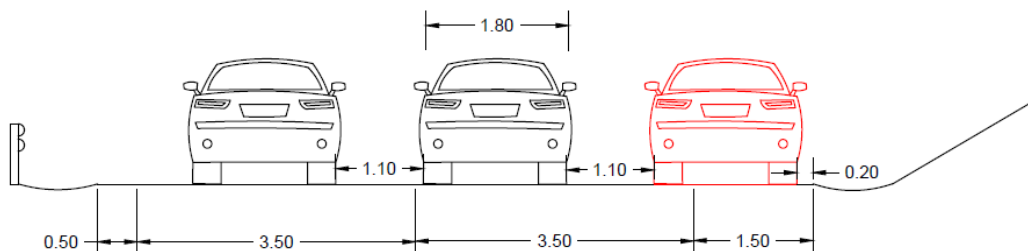
### Hendelse 1 (H1)

Hendelsestype 1 er definert som stopp på skulder på motorveg uten ytre rekkverk. Det antas for denne hendelsen at føreren har hatt mulighet til å manøvrere kjøretøyet slik at det plasseres svært nært grøfttekanten; 20 cm. Figur 3.7 og Figur 3.8 viser illustrasjoner av hvordan dette blir seende ut for hhv. skulderbredde 2,75 m og 1,5 m.



Figur 3.7 Illustrasjon av H1\_S1

Når denne typen hendelse skjer på en motorveg etter dagens standard, H3, ser man at det stoppede kjøretøyet har god nok avstand til det høyre kjørefeltet til at kjøretøyene der ikke blir fysisk hindret verken av det stoppede kjøretøyet eller klaringsavstanden. Kapasitetsreduksjonsfaktoren for fysisk hindring antas derfor å utgå, og kapasitetsreduksjonen er kun påvirket av *rubbernecking*-effekten. Denne effekten påvirker begge kjørefelt.

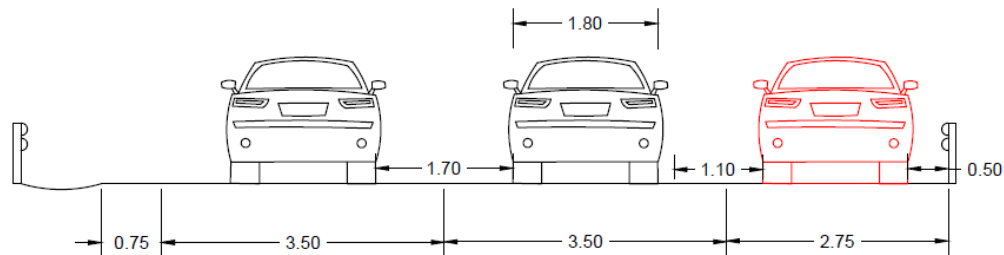


Figur 3.8 Illustrasjon av H1\_S2

Når hendelsestype 1 derimot oppstår på en smal, 4-felts motorveg etter standarden til H8 fra 2013 ser man at kjøretøyet står delvis i kjørebanelen. Kjøretøyene i høyre felt vil dermed måtte justere seg sideveis, slik at man får et avvik fra normalsituasjonen hvor kjøretøyene i utgangspunktet ligger midt i kjørefeltet ( $d_0$ ). Kjøretøyene i venstre kjørefelt antas å bli noe påvirket av at kjøretøyene i høyre kjørefelt legger seg nærmere dem, og på grunn av klaringsavstanden til kjøretøyene i høyre kjørefelt vil kjøretøyene i venstre kjørefelt dermed også avvike litt fra midten av kjørefeltet. *Rubbernecking*-faktoren på 5% gjelder i tillegg for begge kjørefeltene.

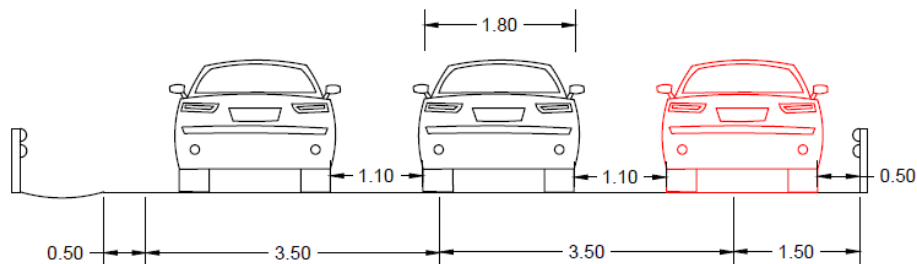
## Hendelse 2 (H2)

Hendelsestype 2 er definert som stopp på skulder med ytre rekkverk. Dette vil gjøre at kjøretøyene ikke kan stille seg like nært vegkanten dersom det fortsatt skal være mulig å komme seg ut ved bruk av dør på passasjersiden. Det antas at føreren plasserer kjøretøyet 50 cm fra rekkverket. Figur 3.9 og Figur 3.10 viser illustrasjoner av hendelsen for hhv. skulderbredde S1 og S2.



Figur 3.9 Illustrasjon av H2\_S1

Også ved denne hendelsestypen fører ikke det stoppede kjøretøyet til en fysisk hindring for de andre kjøretøyene når skulderbredden er 2,75 meter. Estimert kapasitetsreduksjonsfaktor er dermed lik som for H1\_S1.

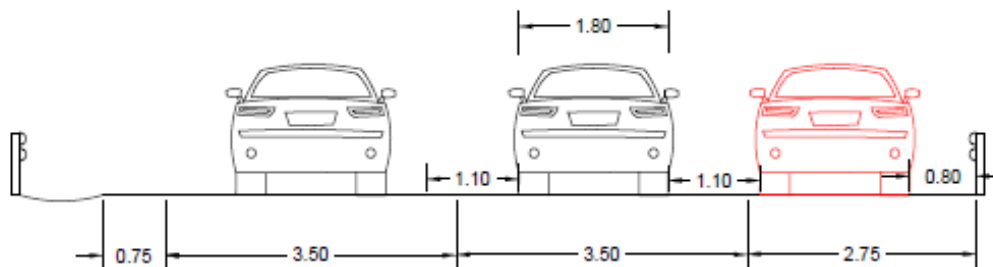


Figur 3.10 Illustrasjon av H2\_S2

Ved S2 fører hendelsen til at det stansede kjøretøyet blokkerer noe mer av høyre kjørefelt enn ved H1\_S2, noe som igjen fører til at kjøretøyene i venstre felt også må avvike en god del fra posisjonen ved normal situasjon.

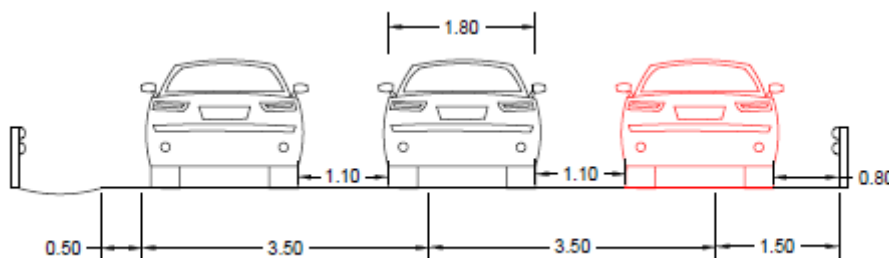
### Hendelse 3 (H3)

Hendelsestype 3 er antatt å være en situasjon der kjøretøyet er oppstilt 0,8 meter fra rekkverket. Dette kan være tilfelle dersom man har behov for god plass til å komme seg ut av kjøretøyet på passasjersiden, eller dersom det er behov for god plass til å komme til den som sitter der, for eksempel dersom passasjeren får et illebefinnende. Nødstoppet kan også ha vært så akutt at føreren ikke har klart å komme seg lenger ut mot rekkverket. Figur 3.11 viser hvordan dette blir seende ut med skulderbredde S1. I dette tilfellet påvirker klaringsavstanden kjøretøyene i høyre kjørefelt noe, mens kjøretøyene i venstre kjørefelt fortsatt kun er påvirket av *rubbernecking*-effekten.



Figur 3.11 Illustrasjon av H3\_S1

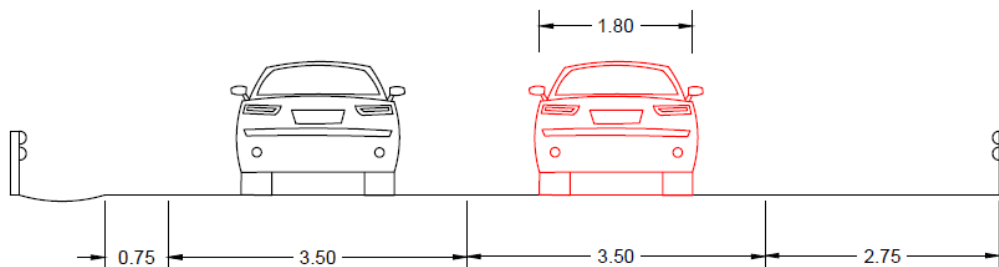
Figur 3.12 viser hendelsestypen ved S2. Som man ser fra figuren påvirkes nå høyre kjørefelt så mye at dersom kjøretøyene fortsatt skal bruke høyre kjørefelt vil en del av kjøretøyet være over i venstre kjørefelt. Det kan diskuteres om det er reelt at høyre kjørefelt fortsatt brukes ved en så stor blokkering, eller om det i praksis vil oppleves som helt blokkert. For analysens skyld velges det å anta at begge kjørefelt er i bruk, men dette vil naturligvis påvirke kapasiteten mye.



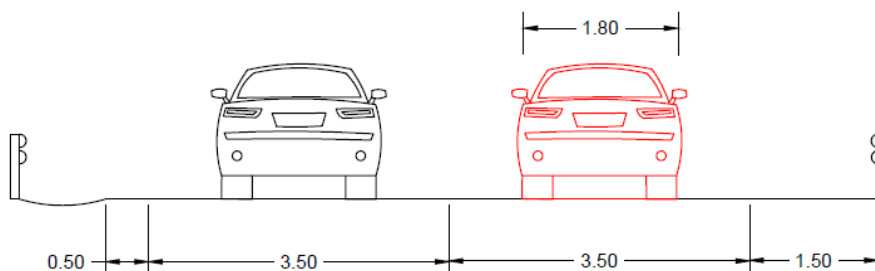
Figur 3.12 Illustrasjon av H3\_S2

#### Hendelse 4 (H4)

Hendelsestype 4 er definert som ulykke i høyre kjørefelt som blokkerer hele feltet. Denne hendelsen vil trolig ikke være påvirket av skulderbredde, men er interessant å se på med tanke på effekten av ITS-tiltak. Kapasitetsreduksjonsfaktoren for denne hendelsestypen er anslått i HCM til å være 0,35 (Exhibit 22-6, TRB, 2000, s. 22-11).



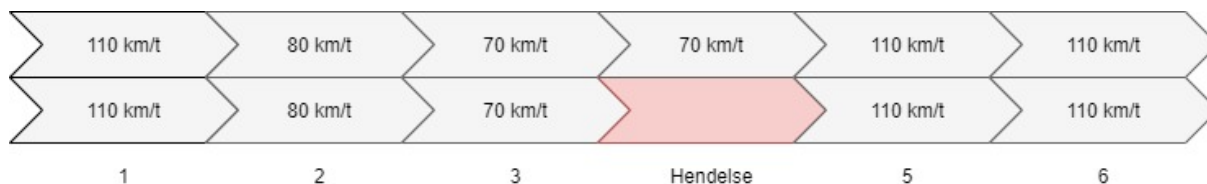
Figur 3.13 Illustrasjon av H4\_S1



Figur 3.14 Illustrasjon av H4\_S2

#### 3.4.6 Tiltak

ITS-tiltaket som det er ønskelig å se effekten av i forhold til de ulike hendelsene er basert på retningslinjene for trafikkstyringssystemer omtalt i delkapittel 2.3.4. Tiltaket medfører at høyre kjørefelt stenges fra skiltsnittet før hendelsen, samt at fartsgrensen nedskrives fra 110 km/t til 70 km/t for hendelsesseksjonen. I tillegg nedskrives fartsgrensen i snittet før dette igjen, slik at seksjonen før hendelsesseksjonen også har 70 km/t som fartsgrense. Seksjonen før dette igjen settes til 80 km/t. Dette er illustrert i Figur 3.15.



Figur 3.15 Illustrasjon av ITS-tiltak

Det antas at førerne ikke er nevneverdig påvirket av *rubbernecking*-effekten ved ITS-tiltak ettersom de blir varslet om hendelsen en stund før de ser den. Det antas dermed at det ikke forekommer ytterligere kapasitetsreduksjon enn den som oppstår på grunn av stengt kjørefelt og lavere fartsgrense.

Effekten av ITS-tiltak vil ikke påvirkes av verken skulderbredde eller hendelsestype ettersom hele feltet er stengt, og man dermed ikke har noen fysisk hindring for kjøretøyene som dirigeres over til venstre kjørefelt. Dette gjør at man kun trenger å simulere seks ulike scenarioer for ITS-tiltaket, nemlig for de ulike kombinasjonene av trafikketterspørsel og varighet. Resultatene for disse tre scenarioene kan deretter sammenlignes med de ulike kombinasjonene av varighet, trafikketterspørsel, hendelse og skulderbredde.

Den valgte metoden gjør det tidkrevende og utfordrende å ta i betraktning deteksjonstiden. Aimsun samler inn data om trafikken for 5-minuttersintervaller, og kortere variasjoner i kapasitet vil da være vanskelige å fange opp. Samtidig vil det kreve flere endringer av hastigheter for hendelsesseksjonen i løpet av simuleringsperioden, noe som medfører enda mer usikkerhet. ITS-tiltaket aktiveres dermed samtidig som hendelsen og den mulige effekten av deteksjonstid finnes dermed ikke i analysen, men diskuteres i sammenheng med diskusjonen av resultatene.

### 3.5 Kalibrering av basismodellen

For å kunne sammenligne resultatene fra trafikksimuleringene med virkelige forhold er det nødvendig å kalibrere basismodellen slik at den reflekterer det virkelige trafikkbildet i Norge best mulig. Ifølge Hadi, Sinha og Wang (2007) er målet med kalibrering av en trafikksimuleringsmodell at vegstrekningen i modellen skal ha kapasitet som samsvarer med den faktiske vegstrekningen. Ettersom det i analysen kun sees på en generisk vegstrekning, og man dermed ikke har faktiske kapasitetsdata å kalibrere mot, kalibreres det her mot verdier oppgitt i Asplan Viaks *Veileder for Aimsun* (Persson et al., 2019), utviklet på oppdrag fra Statens Vegvesen Vegdirektoratet. Veilederen oppgir at man i Norge vanligvis regner med at kapasitet på flerfeltsveger er omtrent 2000 kjøretøy per time per felt (kjt/t/felt).

Kapasitet er ikke en parameter man kan benytte seg av i Aimsun, og man må dermed variere andre kalibreringsparametre for å nå den ønskede verdien for kapasitet. Hadi, Sinha og Wang (2007) bruker reaksjonstid som kalibreringsparameter for basismodellen. *Veileder for Aimsun* (Persson et al., 2019) beskriver også reaksjonstid som den viktigste kalibreringsparameteren i Aimsun-modellen. Reaksjonstid er definert som «(...) the time it takes for the driver to react to a change in speed of the preceding vehicle.» (Hadi, Sinha og Wang, 2007, s. 64). Ifølge Persson et al. (2019) er ikke målet med kalibreringen med reaksjonstid å sette reaksjonstiden lik den man ville observert i felt, men heller å oppnå en kapasitet som stemmer med virkeligheten. Veilederen for Aimsun (Persson et al., 2019) oppgir anbefalte verdier og reaksjonstid, og oppgir i tillegg anbefalte verdier knyttet til kjøretøy og vegtype. Spesiell vekt legges det på at kjøretøyslengde og minsteavstand mellom kjøretøy i kø bør endres fra standardverdien i Aimsun, da man har funnet verdier som er mer typiske for den norske kjøretøyparken og oppførsel i trafikken i Norge. Tabell 3.1 viser standardverdier i Aimsun og verdier som er brukt i stedet for i modellen, basert på verdier fra *Veileder for Aimsun*. Maksimum ønsket hastighet som er brukt er ikke en av verdiene som er anbefalt endret i veilederen, men ettersom kjøretøyene i viser seg å holde en hastighet mye lavere enn fartsgrensen ved fri flyt når denne er satt til 110 km/t endres den til 120 slik at friflythastigheten er nærmere fartsgrensen. Gjennomsnittlig maksimum

ønsket hastighet overstyres av fartsgrensen på vegen. Den brukte verdien gjør dermed ikke at kjøretøyene forsøker å holde 120 km/t, men heller at hastigheten reguleres av aksepten av fartsgrensen (Persson *et al.*, 2019).

Tabell 3.1 Parametre for kjøretøy endret fra standard verdi

Parameter	Standard verdi	Brukt verdi
Gjennomsnittlig kjøretøylengde	4.0 m	4.5 m
Gjennomsnittlig minimumavstand i kø	1 m	2 m
Gjennomsnittlig aksept av fartsgrense	1.1	1
Gjennomsnittlig maksimum ønsket hastighet	110 km/t	120 km/t

Ifølge Hadi, Sinha og Wang (Hadi, Sinha og Wang, 2007) finner man kapasiteten til en vegstrekning ved å først kjøre modellen med en konstant trafikketerspørsel på vegen, for så å notere seg den aggregerte verdien for trafikkvolumet (i kjt/t) målt av en detektor ved slutten av strekningen. Dette er gjennomstrømningen av trafikk på strekningen. Deretter øker man trafikketerspørselen og noterer samme verdi for denne trafikketerspørselen. Dette gjøres videre til verdien ikke lenger øker, og man dermed har nådd en maksimal gjennomstrømning. Den maksimale gjennomstrømningen som oppnås ved å følge denne framgangsmåten antas å være kapasiteten til vegstrekningen. Dersom denne kapasiteten ikke samsvarer med den ønskelige, endres reaksjonstiden og prosessen gjentas til kapasiteten man kalibrerer mot er nådd. Verdiene for reaksjonstid og observert kapasitet som ble resultatet av kalibreringen er vist i Tabell 3.2.

Tabell 3.2 Reaksjonstider og observert kapasitet ved kalibrering

Reaksjonstid	Kapasitet
0,9	2250 kjt/t/felt
0,95	2160 kjt/t/felt
1,0	2070 kjt/t/felt

Kapasiteten ansees å være tilstrekkelig nærme 2000 kjt/t/felt når man bruker reaksjonstid på 1,0 sekund (2070 kjt/t/felt), og ettersom det ikke er anbefalt å bruke reaksjonstid større enn 1,0 (Persson *et al.*, 2019) forsøkes det heller ikke å få kapasiteten mindre enn dette.

## 3.6 Estimering av hastigheter ved kapasitetsreduksjon

### 3.6.1 Uttrykk for justering av speed-flow-forholdet

Når modellen er kalibrert til ønsket kapasitet ved normale trafikkforhold, er det nødvendig å forsøke å estimere hvilke fartsreduksjoner man må legge inn i modellen for å imitere kapasitetsreduksjon ved hendelse. Hastigheten til kjøretøyene, både i normal situasjon og ved hendelse, vil være avhengig av hvor høyt trafikkvolumet på strekningen er. Ettersom man i analysen skal bruke tre ulike trafikketterspørslers, som i tillegg ikke er jevnt fordelte utover simuleringsperioden, blir det nødvendig å finne en måte å anslå forholdet mellom hastighet og trafikkvolumet på strekningen og å finne et uttrykk for hvordan dette forholdet endrer seg når man har redusert kapasitet. Dette er nødvendig for å kunne anslå hvilken fartsgrensenedskrivning man må sette på hendelsesseksjonen i de ulike scenarioene. Forholdet mellom trafikkvolum og hastighet omtales videre som *speed-flow*-forholdet. Ifølge *Highway Capacity Manual* vil *speed-flow*-kurven være en kurve som begynner ved hastigheten ved fri flyt på vegen før den krummer mer og mer nedover mot lavere hastigheter jo nærmere trafikkvolumet er kapasiteten (TRB, 2000).

Dersom man kun skulle ha sett på fartsreduksjonen ved et trafikkvolum som er likt den reduserte kapasiteten, hadde dette vært enkelt å finne ved å legge inn fartsreduksjon på hendelsesseksjonen og finne maksimal gjennomstrømning gjennom seksjonen på samme måte som ved kalibrering av basismodellen. Deretter kunne man ha notert seg hastigheten til kjøretøyene på denne hendelsesseksjonen. Når man i flere tilfeller derimot har lavere trafikkvolum, er det nødvendig å finne ut hvilken hastighet som vil holdes ved kapasitetsreduksjonen slik at man korrekt kan gjenspeile at det er redusert kapasitet på vegen selv ved lavere trafikketterspørslers.

*Highway Capacity Manual* oppgir en formel (Formel 8) for justering av *speed-flow*-forholdet når man har redusert kapasitet, men oppgir også at det finnes lite studier som beskriver hvilken effekt kapasitetsreduksjon har på hastigheten. Det blir ifølge HCM derfor opp til den som skal modellere en kapasitetsreduksjon å finne en måte å gjøre dette på som vil gjenspeile virkeligheten i størst mulig grad, og det foreslås å forsøke en form for nedjusterte *speed-flow*-kurver slik som Formel 8 legger opp til (TRB, 2000). Formel 8 sees derfor på som et nyttig grunnlag for å kunne si noe om hvilke fartsreduksjoner man må bruke i Aimsun, og brukes som et utgangspunkt for estimeringen av hastigheter ved redusert kapasitet.

Formel 8

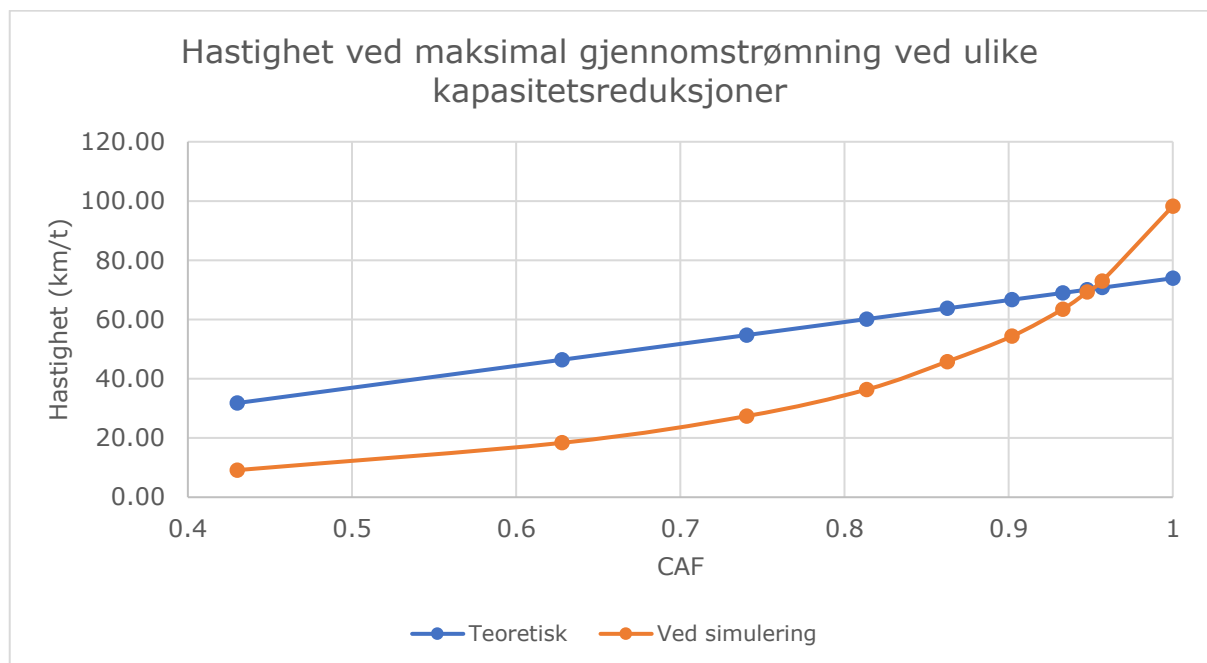
$$S = FFS + \left[ 1 - e^{\ln\left(\left(FFS+1 - \frac{C*CAF}{28}\right) * \frac{v_p}{C*CAF}\right)} \right] \quad (A22-1, TRB, 2000, s. 22-48)$$

Hvor:

- S = seksjonshastighet (km/t)
- FFS = hastighet ved fri flyt (km/t)
- C = kapasitet (kjt/t/felt)
- CAF = kapasitetsreduksjonsfaktor
- $V_p$  = trafikkvolum (kjt/time/felt)

Farten ved fri flyt på strekingen er funnet ved å kjøre en simulering av modellen med veldig lav trafikketerspørsel (10 kjt/t/felt). Den gjennomsnittlige farten ved fri flyt ser ut til å være omtrent 110 km/t i høyre kjørefelt og omtrent 116 km/t i venstre felt.

For å først danne et bilde av hvordan modellen oppfører seg i forhold til Formel 8, kjøres simuleringer med konstante trafikketerspørsler og ulike nedskrivninger av fartsgrense på hendelsesseksjonen for å finne maksimal gjennomstrømningen gjennom seksjonen ved denne fartsgrensen. Den maksimale gjennomstrømningen ansees som den nye kapasiteten, og man kan dermed fastsette hvilken kapasitetsreduksjon man har ved de ulike fartsgrensenedskrivningene. Den simulerte gjennomsnittlige hastigheten på hendelsesseksjonen ved maksimal gjennomstrømning noteres også. Ved å sette inn kapasitetsreduksjonen (CAF) og trafikkvolum ( $v_p$ ) lik ny kapasitet i formel får man ut den teoretiske hastigheten ved nådd kapasitet. Disse verdiene noteres og regnes ut for 10 ulike fartsgrensenedskrivninger. Figur 3.16 viser resultatene av dette. Verdiene som figuren baserer seg på kan sees i Vedlegg A1. Man ser da at simuleringene avviker en god del fra teorien, og det er ønskelig å finne ut hvorfor dette skjer.

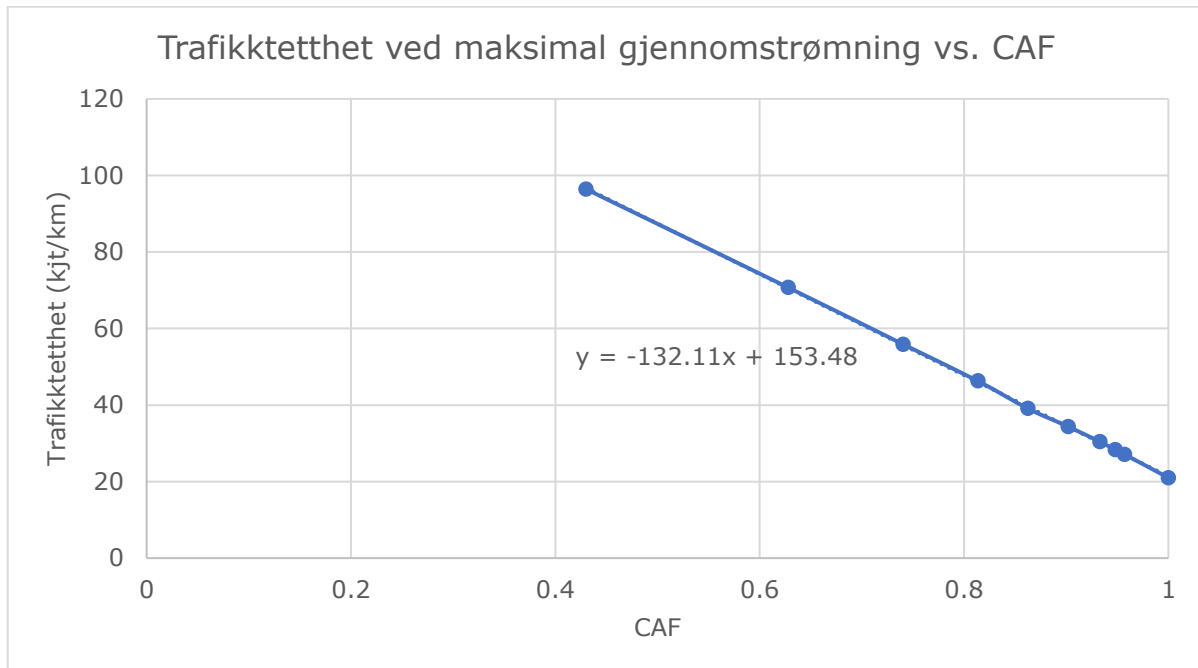


Figur 3.16 Hastighet ved maksimal gjennomstrømning ved ulike CAF

Dersom man noterer seg trafikk tettheten på hendelsesseksjonen i de ulike simuleringene med maksimal gjennomstrømning ser man at den øker ettersom kapasiteten reduseres. Dette kan forklare hvorfor man får store avvik fra teorien og simuleringene. Formel 8 skal nemlig sikre at man har en konstant trafikk tetthet på 28 kjt/t/felt, mens simuleringen vil forsøke å oppnå det som blir maksimal trafikk tetthet ved den hastigheten kjøretøyene holder gjennom hendelsesseksjonen. Det er naturlig at det vil være slik i virkeligheten, ettersom kjøretøyene vil tillate seg å kjøre nærmere og nærmere hverandre etter hvert som hastigheten deres reduseres. Dersom man bytter ut 28 i Formel 8 med den trafikk tettheten som kommer ut av simuleringene ved nådd kapasitet ser man at avviket mellom teoretisk og simulert fart er tilnærmet lik 0. Dette kan også sees i Vedlegg A1. Dersom



man ser på hvordan trafikk tettheten fra simuleringene endrer seg med endret kapasitet (fortsett maksimal gjennomstrømning), er det tydelig at forholdet er lineært. Dette vises i Figur 3.17. Denne lineariteten betyr sannsynligvis at Aimsun Next baserer seg på den forenklete, lineære sammenhengen mellom trafikkvolum, gjennomsnittlig strekningshastighet og tetthet som sier at trafikkvolum er gjennomsnittlig strekningshastighet multiplisert med tettheten.



Figur 3.17 Trafikktetthet ved maksimal gjennomstrømning vs. CAF

Det virker logisk at dersom man bruker forholdet mellom trafikk tetthet ved maksimal gjennomstrømning og CAF i stedet for 28 i formelen, vil man få ut verdier som bedre reflekterer hvordan trafikken vil flyte ved trafikkvolum lik kapasitet. Dersom man ser på endringene som er gjort i HCM2016 (TRB, 2016) i forhold til HCM2000 er denne antakelsen om at en kapasitet på 28 kjt/t/felt opprettholdes ved redusert kapasitet fjernet, noe som underbygger antakelsen om at den konstante tettheten må justeres i formelen. Formelen man har nå kan brukes til å finne hvilken hastighet man skal tilstrebe å ha på hendelses-seksjonen ved maksimal gjennomstrømning for alle de ulike kapasitetsreduksjonene man trenger videre i analysen.

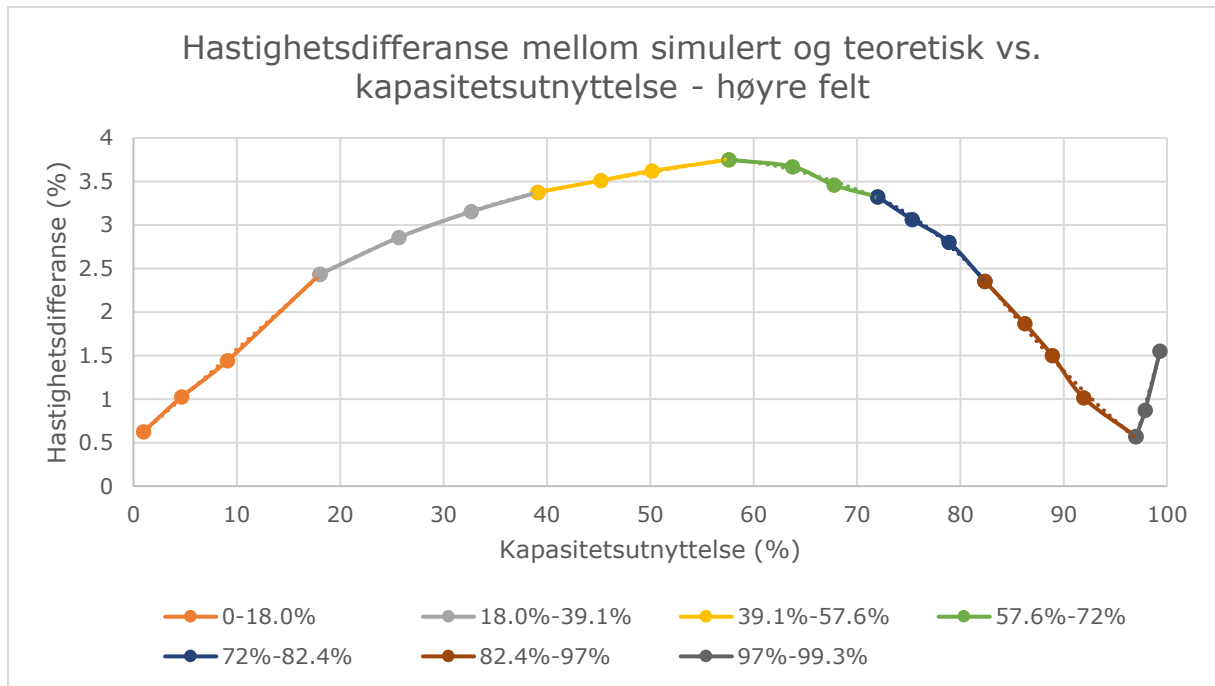
Formel 9

For  $v_p = C * CAF$ ,

$$S = FFS + \left[ 1 - e^{\ln\left(\left(FFS+1 - \frac{C*CAF}{-132.11*CAF+153.48}\right) * \frac{v_p}{C*CAF}\right)} \right]$$

Ved trafikkvolum,  $V_p$ , lavere enn  $C*CAF$  må man så sjekke om simuleringene vil avvike fra Formel 9. Dette gjøres ved å først kjøre modellen med ulike trafikketterspørsler og uten kapasitetsreduksjon, og notere seg gjennomsnittlig hastighet i både høyre kjørefelt og venstre kjørefelt. Denne hastigheten sammenlignes med den man får ved å bruke Formel 9 med  $V_p$  lik trafikkvolumet man har på strekningen. Verdiene man får ved å gjøre dette

vises i Vedlegg A2 og Vedlegg A3 for hhv. høyre og venstre kjørefelt. Forskjellen i hastighet mellom teorien og simulerte verdier som en funksjon av kapasitetsutnyttelsen,  $V_p/C$ , vises for høyre kjørefelt i Figur 3.18.



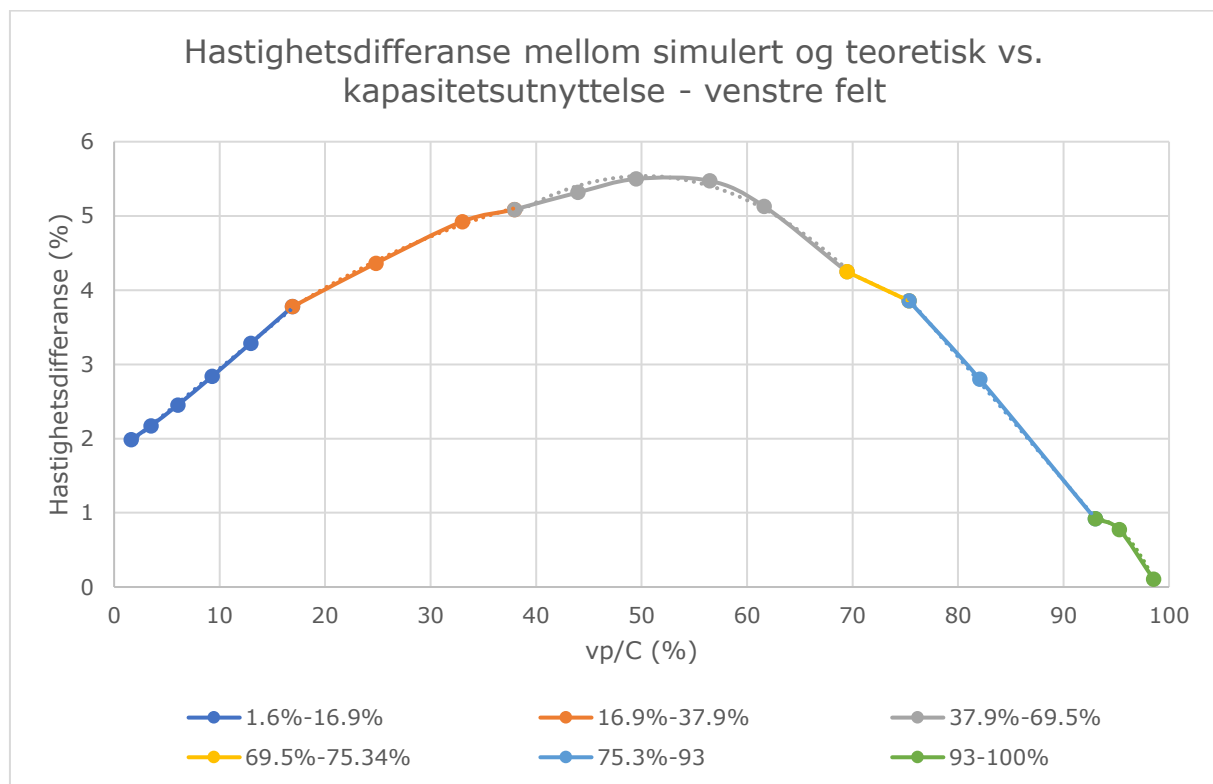
Figur 3.18 Hastighetsdifferanse mellom simulert og teoretisk vs. kapasitetsutnyttelse - høyre kjørefelt

Som man ser varierer differansen mellom den simulerte hastigheten og den teoretiske fra omtrent 0,6% på det minste til omtrent 3,75% på det meste. Det antas at den simulerte hastigheten stemmer bedre med virkeligheten enn den teoretiske, ettersom man har mange ulike oppførselsparametre i en slik modell som ikke fanges opp av en enkel formel. Det antas videre at man vil få samme forhold mellom avvik fra Formel 9 og kapasitetsutnyttelsen ved kapasitetsreduksjoner, og at man dermed kan justere alle verdier med dette. For å kunne nytte seg av dette forholdet for ulike kapasitetsreduksjoner er det ønskelig å lage en justering av Formel 9 som vil fange opp dette avviket. Ettersom avviket ikke er konsistent, forsøkes det å finne en trend i avviket. Dette viser seg å være vanskelig å gjøre for hele spennet av kapasitetsutnyttelser, og dermed bestemmes det at kapasitetsutnyttelsene deles opp i mindre intervaller som har enklere trendlinjer med stor nok korrelasjon (målt ved  $R^2$ ) til at det skal kunne være sammenlignbart med det faktiske avviket.  $R^2$  større enn 0.95 regnes her som godt nok. Tabell 3.3 viser de ulike trendlinjene som er brukt for de ulike intervallene av kapasitetsutnyttelse ( $V_p/C$ ).

Tabell 3.3 Trendlinjer for ulike intervaller av kapasitetsutnyttelse – høyre kjørefelt

$V_p/C$ (%)	Trendlinje	$R^2$
<b>0,00-18,0</b>	$y = 0,1055x + 0,5168$	0,999
<b>18,0-39,1</b>	$y = -0,0008x^2 + 0,0875x + 1,1014$	0,9999
<b>39,1-57,6</b>	$y = 0,0203x + 2,59$	0,9954
<b>57,6-72,0</b>	$y = -0,0014x^2 + 0,1454x - 0,0987$	0,9722
<b>72,0-82,4</b>	$y = -0,0037x^2 + 0,4773x - 11,953$	0,9955
<b>82,4-97,0</b>	$y = 0,0018x^2 - 0,4547x + 27,38$	0,9946
<b>97,0-99,3</b>	$y = 0,4272x - 40,898$	0,9929

Ettersom man har funnet at det holdes en høyere fart ved fri flyt i venstre kjørefelt enn høyre kjørefelt, vil det være naturlig at man får andre hastigheter her ved kapasitetsreduksjon enn man gjør i høyre kjørefelt. Av den grunn finnes trendlinjer for mindre intervaller av kapasitetsutnyttelse for venstre kjørefelt også. Hastighetsdifferansen mellom simulert og teoretisk (FFS = 116) vs. kapasitetsutnyttelse i venstre felt vises i Figur 3.19. Trendlinjene som skal brukes til å justere for avviket mellom simulering og teori er vist i Tabell 3.4.



Figur 3.19 Hastighetsdifferanse mellom simulert og teoretisk vs. kapasitetsutnyttelse - venstre felt

Tabell 3.4 Trendlinjer for ulike intervaller av kapasitetsutnyttelse - venstre kjørefelt

Vp/C (%)	Trendlinje	R <sup>2</sup>
1,60-16,9	$y = 0,1177x + 1,765$	0,9989
16,9-37,9	$y = -0,0012x^2 + 0,1283x + 1,9357$	0,9973
37,9-69,5	$y = -0,0034x^2 + 0,3409x - 3,021$	0,9816
69,5-75,3	$y = -0,0667x + 8,8791$	1
75,3-93,0	$y = -0,1669x + 16,455$	0,9995
93,0-100	$y = -0,0256x^2 + 4,7584x - 220,09$	1

Trendlinjene kalles videre justeringsfaktorer,  $J_f$ . Ut fra dette er det videre antatt at hastigheten ved kapasitetsreduksjon kan beskrives ved følgende formel:

Formel 10

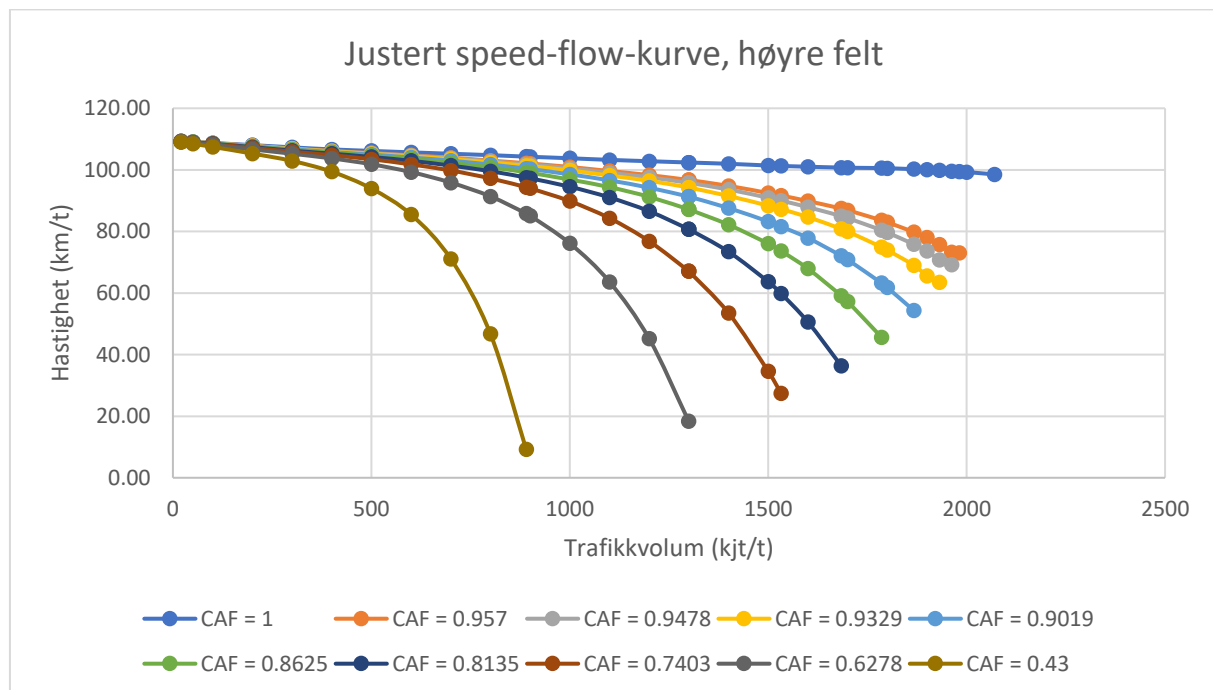
For  $v_p = C * CAF$

$$S = FFS + \left[ 1 - e^{\ln\left(\left(FFS+1 - \frac{C*CAF}{-132.11*CAF+153.48}\right) * \frac{v_p}{C*CAF}\right)} \right]$$

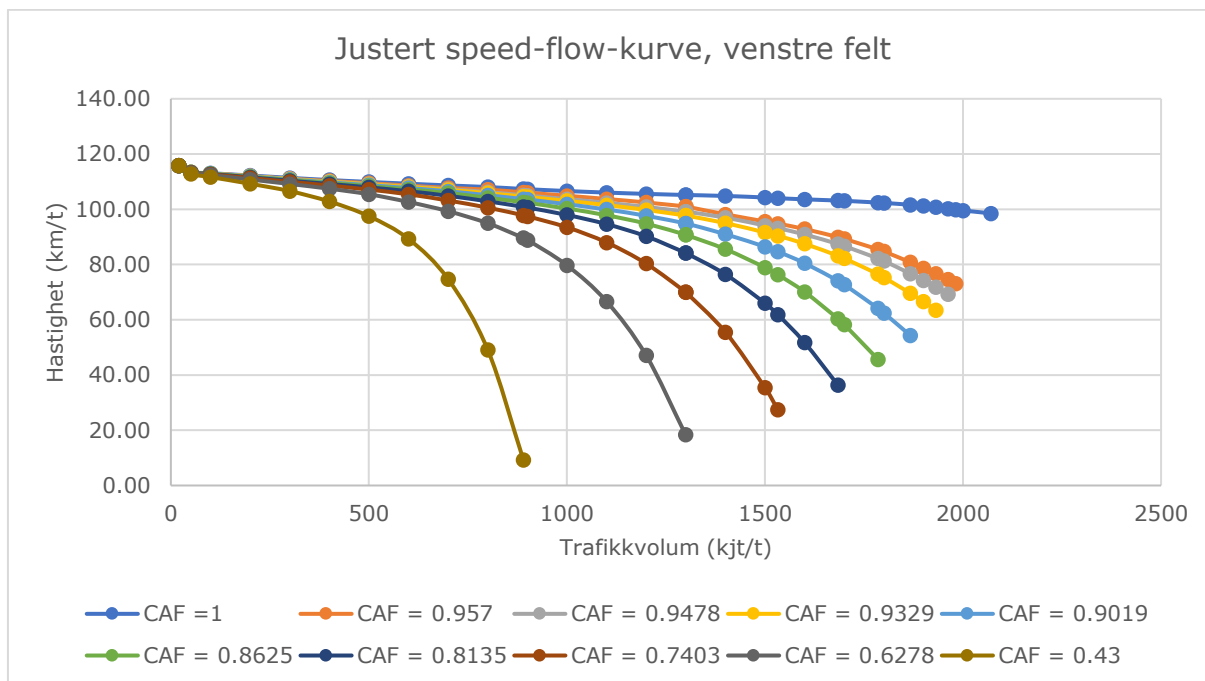
For  $v_p < C * CAF$

$$S = \left( FFS + \left[ 1 - e^{\ln\left(\left(FFS+1 - \frac{C*CAF}{-132.11*CAF+153.48}\right) * \frac{v_p}{C*CAF}\right)} \right] \right) * (1 - J_f/100)$$

Verdiene som fås ved å bruke Formel 10 med de 10 kapasitetsreduksjonene som ble brukt i starten av dette delkapittelet kan sees Vedlegg A4 og Vedlegg A5 for hhv. høyre og venstre kjørefelt. Figur 3.20 og Figur 3.21 viser hvordan grafene blir sende ut.



Figur 3.20 Justert speed-flow-kurve, høyre kjørefelt

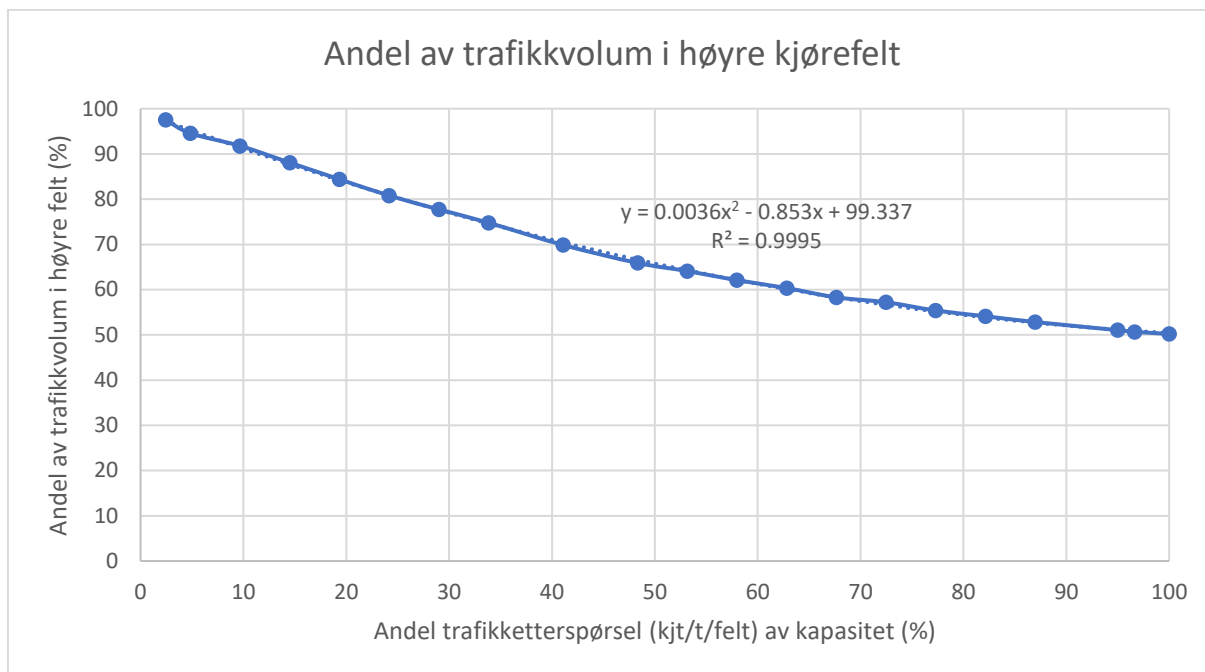


Figur 3.21 Justert speed-flow-kurve, venstre kjørefelt

Som man ser fra *speed-flow*-kurvene i Figur 3.20 og Figur 3.21, får kurven mer krumning jo mer kapasiteten er redusert. Dette gir mening ettersom man har større og større forskjeller mellom hastigheten ved fri flyt, som fortsatt er opp mot 110 km/t og 116 km/t ettersom fartsgrensen ikke endres, og hastigheten det er mulig å holde ved trafikkvolum lik kapasitet.

Når man nå har et uttrykk for justert speed-flow-forhold kan man finne ut hvilken hastighet som vil tilsvare den kapasitetsreduksjonen man har estimert for hvert scenario. For hvert scenario har hvert felt blitt gitt en kapasitetsreduksjonsfaktor. Ettersom hastigheten er avhengig av trafikkvolumet, blir det nødvendig å fastsette fire hastigheter for hvert scenario (to ulike kjørefelt og to ulike trafikkmengder per trafikketterspørsel). For å kunne gjøre dette er det nødvendig å estimere hvordan kjøretøyene fordeler seg på de to kjørefeltene ved ulike trafikketterspørslar.

Når hastighetsdifferansen mellom simulering og teorien ble funnet (Figur 3.18 og Figur 3.19) ble modellen kjørt med ulike trafikketterspørslar, og trafikkvolum, hastighet og tetthet ble registrert for hvert felt. Ved å se på trafikkvolumet i de ulike feltene og det korresponderende trafikketterspørsel-kapasitet forholdet, viser det seg at det er en klar trend mellom dem. Figur 3.22 viser denne sammenhengen, og verdiene kan sees i Vedlegg A6. Som man ser fra kurven vil nesten alle kjøretøyene i simuleringen holde seg i høyre felt dersom trafikketterspørselen er mye mindre enn kapasiteten, mens når man har oppnådd kapasitet på vegen vil det totale trafikkvolumet fordele seg ganske likt mellom de to feltene.



Figur 3.22 Andel av trafikkvolum i høyre kjørefelt

I virkeligheten vil distribusjonen av trafikkvolumet mellom feltene variere på bakgrunn av blant annet andelen tungtrafikk, parametre knyttet til føreropphørsel, av- og påkjøringsramper og gjerne også basert på hvor i verden vegstrekningen er lokalisert (Pompigna og Rupi, 2017). For en så enkel strekning uten av- og påkjørsler antas det likevel at den simulerte distribusjonen av trafikkvolumet kan sammenlignes med virkeligheten. Trendlinjen vist i Figur 3.22 har en tydelig korrelasjon med datapunktene, og det antas dermed at formelen for denne kan brukes til å estimere hvordan kjøretøyene fordeler seg mellom de to kjørefeltene ved ulike forhold mellom trafikketterspørsel og kapasitet. Først finnes andelen av trafikketterspørselen som vil bruke høyre kjørefelt ved hjelp av Formel 11, og andelen i venstre kjørefelt er naturligvis den gjenstående andelen.

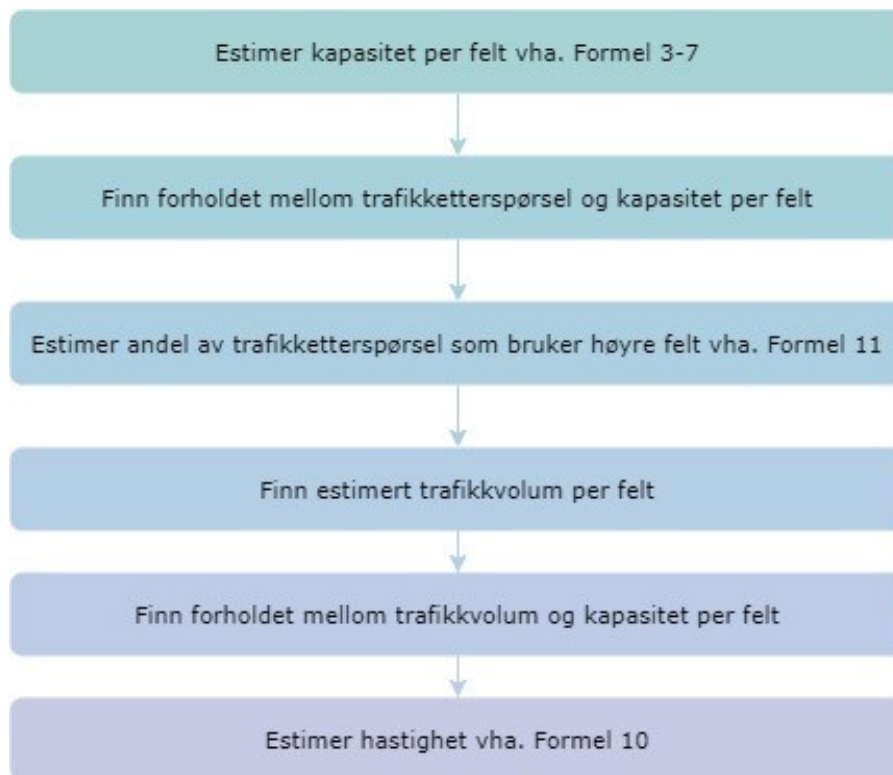
Formel 11

$$\%T_{HF} = 0,0036 * A_{HF} - 0,853 * A_{HF} + 99,337$$

Hvor:

- $\%T_{HF}$  = Andel av trafikketterspørsel som bruker høyre kjørefelt (%)
- $A_{HF}$  = Trafikketterspørsel (kjt/t/felt) / kapasitet, høyre kjørefelt (%)

Når man nå kan finne trafikkvolumet per felt for de ulike trafikketterspørslene kan man bruke Formel 10 til å estimere hastigheter ved redusert kapasitet for de ulike scenarioene. Flytdiagram for metoden som er utviklet for å estimere hastigheter ved kapasitetsreduksjoner vises i Figur 3.23.



Figur 3.23 Flytskjema for estimering av hastigheter

### 3.6.2 Oppsett av scenarier i Aimsun

For å kunne imitere kapasitetsreduksjon ved hjelp av hastighetsreduksjon, brukes trafikkstyringsfunksjonen «Speed reduction» i Aimsun. For hvert scenario med varighet V1 legges det inn en fartsreduksjon som gjelder for hele simuleringsperioden som skal gi hastigheten i starten, og eventuelt slutten, av simuleringsperioden. Dette gjøres fordi det er lavere trafikketerspørsel de første og siste 45 minuttene av simuleringsperioden enn i den midtre delen, men man har fortsatt redusert kapasitet. Deretter legges det inn en fartsreduksjon hvor man har nye hastigheter i høyre og venstre felt for den delen av simuleringsperioden hvor man har høyest trafikketerspørsel. Ettersom kjøretøyene vil ha en viss reisetid fra der de entrer nettverket til hendelsesseksjonen, og man dermed ikke får effekten av endret etterspørsel med en gang, legger man inn en trigger som skal sette i gang fartsgrensereduksjonen. Fartsgrensereduksjonen trigges dersom trafikkvolumet i en detektor rett før hendelsesseksjonen når over en definert verdi, og fjernes når den går under denne verdien igjen. Dette kan gjøres fordi det er så tydelige forskjeller i trafikkprofilen, og man derfor får et tydelig skille mellom når man er inne i den ene eller den andre fasen av trafikketerspørselen. Det at en trigger slår av fartsgrensereduksjonen også gjør at man beholder redusert hastighet i de tilfellene der trafikketerspørselen er lavere igjen, men man ikke har fått avvirket trafikken forbi hendelsesseksjonen og dermed fortsatt har trafikkvolum opp mot kapasiteten.

Ved varighet V2 varer hendelsen 37 minutter fra 08:15, og man legger da inn en fartsgrensereduksjon som varer i denne perioden og som svarer til den største delen av den profilerte trafikketerspørselen ettersom det er denne som er gjeldende under hendelsen.

Fartsreduksjonene som legges inn er ikke nødvendigvis lik den hastigheten som holdes av kjøretøyene på grunn av ulike oppførselsparametre. Ettersom det er ønskelig at gjennomsnittlig hastighet er den som er estimert, for å få et godt bilde av kapasitetsreduksjonen, må man prøve og feile litt med den fartsgrensenedskrivningen man setter på hendelsesseksjonen. Ved de scenarioene hvor man overgår kapasitet settes fartsgrensenedskrivningen til den den estimerte hastigheten ved nådd kapasitet, og dersom hastigheten ved simuleringen viser seg å være mindre enn denne hastigheten igjen så er det fordi vegen strekningen er overbelastet og kjøretøyene er tvunget til å kjøre enda saktere.

### 3.7 Ytelsesparametre

Effekten av skulderbredde og ytelsen av ITS-tiltaket vurderes basert på trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser. *Farrag et al.* (2020b) omtaler i sin artikkel ulike parametre som kan være effektive for å beskrive disse forholdene, og som man kan få som resultater i mikrosimuleringsmodeller. For trafiksikkerhet ved hendelser er disse parameterne antall stopp, da dette kan representere stopp-og-kjør sjokkbølger som øker faren for sekundær kollisjon, og gjennomsnittlig forsinkelse på grunn av stopp, da stopp på vegen ved en flaskehals vil medføre en risiko for sekundære hendelser. Disse parameterne reflekterer altså noe av det som er beskrevet i det teoretiske grunnlaget når det gjelder risikoen for sekundære hendelser, ettersom de sier noe om forutsigbarheten i trafikkflyten. For trafikkavvikling beskriver *Farrag et al.* blant annet gjennomstrømning gjennom flaskehalsen og gjennomsnittlig forsinkelse for kjøretøy som nyttige ytelsesparametre (*Farrag et al.*, 2020b).

I tillegg til disse velges det å bruke kølengder og tiden det tar før køen oppløses som parametre for å beskrive avviklingskvaliteten. I forbindelse med trafiksikkerhet sees det også på antall feltskifter i simuleringsperioden, da feltskifte gjerne forbindes med en risiko, særlig når man har høy hastighet eller stor hastighetsdifferanse mellom kjørefeltene. Ytelsesparameterne som brukes til å vurdere effekten av skulderbredde og ITS-tiltak er dermed:

#### Trafikkavvikling

- Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen.
- Gjennomsnittlig forsinkelse for kjøretøy
- Kø

#### Trafiksikkerhet

- Antall stopp
- Gjennomsnittlig forsinkelse på grunn av stopp
- Antall feltskifter



## 3.8 Dataanalyse

### 3.8.1 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen

Gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen er funnet ved å se på seksjonsstatistikken kalkulert for hendelsesseksjonen for hvert scenario. For hvert statistikkintervall (5 minutter i denne modellen) kalkuleres trafikkvolumet i Aimsun ved hjelp av Formel 12.

Formel 12

$$\text{Trafikkvolum} = \frac{N_{\text{exit}}}{I} * 3600 \quad (\text{Aimsun, 2020})$$

Hvor:

- $N_{\text{exit}}$  = antall kjøretøy som forlater seksjonen i intervallet
- $I$  = Statistikkintervall (sekunder)

Gjennomsnittet av trafikkvolum for hvert statistikkintervall for de ulike replikasjonene sees på som resultatet for scenarioet. Det er interessant å se på både gjennomstrømning gjennom flaskehalsen som en funksjon av tid, og gjennomsnittlig gjennomstrømning i en periode som regnes som den mest kritiske for scenarioet. Ved varighet V1, hvor hendelsen varer gjennom hele simuleringsperioden, regnes 08:00 og 09:00 som denne kritiske perioden, ettersom man da får effekten av høydepunktet i trafikketerspørselsprofilen. Ved varighet V2 regnes den kritiske perioden som hendelsesperioden.

### 3.8.2 Gjennomsnittlig forsinkelse for kjøretøy

Gjennomsnittet av forsinkelsesverdiene fra de ti replikasjonene for hvert scenario er oppgitt som gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy per kilometer for hvert statistikkintervall. Forsinkelsen er beregnet som den gjennomsnittlige forskjellen mellom et kjøretøys forventede reisetid per km i 5-minuttersintervallet og den faktiske reisetiden per km i 5-minuttersintervallet. Aimsun oppgir også en aggregert verdi for hvert scenario, som er gjennomsnittet av forsinkelsestidene funnet for hvert 5-minuttersintervall vektet med tanke på antall kjøretøy som har forlater nettverket i løpet av intervallet. Dette vektete gjennomsnittet registreres for hvert scenario og ganges opp med antall km nettverket består av for å se på hvordan de ulike scenarioene yter med tanke på gjennomsnittlig forsinkelsestid per kjøretøy på hele strekningen.

### 3.8.3 Kø

Kølengder finnes for de ulike scenarioene ved å samle inn det som i Aimsun Next 20 kalles *HCM – Queue Length* (oppgitt i antall kjøretøy) for hver seksjon. Dette er kølengde som er basert på *Highway Capacity Manual* sin definisjon av kø på vegen. Et kjøretøy defineres til å være en del av en kø på en vegstrekning dersom:

Avstanden til kjøretøyet foran er mindre enn eller lik 20 fot ( $\approx 6$  m)

OG hastigheten til kjøretøyet er lik eller høyere enn hastigheten til kjøretøyet foran

OG hastigheten til kjøretøyet er mindre enn eller lik 1/3 av kjøretøyetets ønskede hastighet.

Kø lengden for et statistikkintervall er i Aimsun gjennomsnittet av kø lengden for alle simuleringstrinnene i intervallet (Aimsun, 2020). Kø lengdene for hvert tidsintervall er videre funnet ved å legge sammen kø lengden på de ulike seksjonene for det statistikkintervallet. Dette kan gjøres fordi dersom kø på en seksjon i Aimsun strekker seg utenfor denne seksjonen og til seksjonen før, blir kjøretøyene en del av kø lengden på seksjonen før.

To kjøretøy er i denne rapporten definert som minste kø lengde som er av betydning, etter som man gjerne kan få en del verdier mellom 0 og 2 som ansees som resultater av tilfeldigheter i analysen. Tiden det tar før kø er oppløst er funnet ved å se på når antall kjøretøy som står i kø på hele strekningen er mindre enn 2. Dette gjelder kun for de scenarioene der man på et tidspunkt har kø som er lengre enn 2 kjøretøy. Dersom køen ikke blir oppløst i løpet av simuleringperioden er det nyttig å se på hvor mange kjøretøy som står i kø når simuleringperioden er slutt.

### **3.8.4 Stopp**

Et kjøretøy defineres av Aimsun som stoppet når hastigheten er lavere enn hastigheten ved køinntredelse, og regnes som ikke lenger stoppet når hastigheten igjen er hastigheten til et kjøretøy når det forlater køen (Aimsun, 2020). I Aimsun er standardverdien for hastighet som definerer at kjøretøyet er stoppet 1 m/s (hastighet ved køinntredelse), og denne standardverdien er beholdt i modellen. Hastigheten til et kjøretøy som forlater køen er definert som 4 m/s. Et kjøretøy telles altså som stoppet når det senker sin hastighet til under 1 m/s, og registreres som ikke lenger stoppet når det øker sin hastighet igjen til over 4 m/s.

I den videre analysen av ytelsen ved scenarioene sees det på gjennomsnittlig (gjennomsnitt av 10 replikasjoner) totalt antall stopp for hele strekningen i løpet av simuleringperioden.

Stopptiden til et kjøretøy registreres for et kjøretøy fra det får status som stoppet og til hastigheten er over 4 m/s. Den gjennomsnittlige stopptiden for alle kjøretøyene i simuleringperioden regnes som den gjennomsnittlige forsinkelsestiden på grunn av stopp.

### **3.8.5 Feltskifter**

Antall feltskifter er en parameter som finnes for hvert scenario ved å summere hvor mange kjøretøy som forlater sitt kjørefelt i løpet av hvert statistikkintervall. I denne rapporten er det ønskelig å se på antall feltskifter per km. Etersom alle kjøretøyene kjører like langt ville antall feltskifter totalt blitt funnet ved å multiplisere denne parameteren med antall kilometer, men dette gir store og mindre håndterlige tall.

## 3.9 Usikkerhet og feilkilder

### 3.9.1 Generelt

Det er ulike årsaker til at det er usikkerhet knyttet til metoden. Først og fremst er det usikkerhet knyttet til trafikksimuleringer generelt, ettersom det er vanskelig å bruke modeller og tall til å imitere den komplekse menneskelige oppførselen som hele tiden er en del av trafikkbildet. Føreropførsel er vanskelig å tallfeste, og de ulike parameterne knyttet til blant annet *car-following* modellen og *lane-changing* modellen som Aimsun baserer seg på er i virkeligheten preget av variasjon og tilfeldigheter. Resultatene vil dermed basere seg på en viss generalisering av bilførere, selv om tilfeldig variasjon er medtatt i form av at simuleringene er stokastiske.

Kvaliteten av verifisering, kalibrering og vurdering av hvor mye vi kan stole på en trafikksimuleringsmodell er i stor grad avhengig av erfaringsnivå og bruk av skjønn. Ettersom dette er en studentoppgave kan det tenkes at det er usikkerhet knyttet til disse prosessene da erfaringen er begrenset. I tillegg gjør tidsbegrensningen knyttet til oppgaven det så og si umulig å ha kontroll over hva alle parameterne i modellen betyr og gjør, noe som også medfører en usikkerhet som kunne har vært redusert dersom man hadde mer erfaring med Aimsun.

Metoden har også naturligvis usikkerhet knyttet til seg i form av mangel på ekte datasett til å kalibrere og validere modellen opp mot. Modellen har blitt kalibrert opp mot foreslåtte verdier som er basert på erfaringer fra norske veier, men det vil selvsagt forekomme variasjoner fra sted til sted og fra tid til tid. På grunn av mangelen på ekte datasett har man problemer med å validere modellen, men det antas at det allikevel skal være mulig å si noe om effekten av skulderbredde og ITS-tiltak basert på forskjellene mellom de resulterende ytelsesparameterne.

Ettersom vegnettet det sees på er svært enkelt og ikke reelt, kan det diskuteres om det allikevel er tilstrekkelig å basere kalibrering på det lille grunnlaget som finnes av foreslåtte verdier og kapasitet. I modellen har kjøretøyene få oppgaver, og skal ikke bestemme destinasjon, skifte felt for avkjørsel eller stoppe i et kryss. Man har derfor færre parametre som det knyttes usikkerhet til. Resultatene skal ikke brukes til å vurdere tiltak i et faktisk prosjekt, men heller til å si noe om forskjellen mellom ulike tiltak når vegnettet ellers er lite komplisert. Resultatene kan altså gi et bilde av hvordan effekten av skulderbredde og ITS-tiltak er generelt. Dersom man skal vurdere bruken av smal skulderbredde og ITS-tiltak videre, bør det derimot gjøres analyser med ekte datasett for det spesifikke prosjektet.

Ettersom man har en enkel profilering av trafikketterspørselen, og ikke er opptatt av at trafikketterspørsel skal ligne virkeligheten, som har store variasjoner og gjerne baserer seg på stokastiske rutevalg, samt at vegstrekningen er enkel, kan det tenkes at dette reduserer usikkerheten noe i forhold til om man var interessert i å se på effekten på et større og mer komplisert nettverk.

Når det gjelder estimat av kapasitetsreduksjoner og hastigheter ved kapasitetsreduksjoner medfører dette også usikkerheter av den grunn at det er nettopp estimater. Når det gjelder kapasitetsreduksjonene er det gjort en rekke antakelser, selv om man har basert estimatene noe på tall fra HCM og på litteratur om *rubbernecking*. Igjen er det forskjellene mellom de ulike scenarier som er viktigst, og det antas at så lenge kapasitetsestimaterne er gjort systematisk basert hvor mye av kjørefeltet som er blokkert, så har man et bilde på hva som vil være forskjellene ved stopp på smal og bredere skulder.

Estimatene av hastigheter ved kapasitetsreduksjon er gjort på bakgrunn av hvordan simuleringene oppfører seg i forhold til teorien rundt *speed-flow*-forhold ved redusert kapasitet. Denne prosessen er i stor grad basert på antakelser og forsøk på å se trender i simuleringene ved ulike fartsgrensenedskrivninger, for så å justere forholdet for ulike kapasitetsreduksjoner. Usikkerheten knyttet til de justerte *speed-flow*-kurvene er vanskelig å komme til livs, ettersom det finnes lite studier knyttet til dette. Det er mer usikkerhet knyttet til de scenarioene der man ikke overgår kapasiteten ettersom det i tilfellene der man har etterspørsel større en kapasiteten vil være mulig å sjekke hvor stor maksimal gjennomstrømning gjennom flaskehalsen er og dermed fastslå at man har en hastighet som reflekterer den reduserte kapasiteten i modellen.

### 3.9.2 Usikkerhet knyttet til stokastiske modeller

For å vurdere usikkerheten knyttet til det faktum at man i en mikrosimuleringsmodell har flere parametre som er stokastiske, altså som velges tilfeldig ut fra et utvalg av verdier, velges det å bruke en ensidig Students t-test. Ved denne metoden kan man finne konfidensintervallet for den gjennomsnittlige verdien av de 10 ulike replikasjonene for en parameter som er resultatet av et scenario. Man kan altså si noe om med hvilken sikkerhet man kan si at for eksempel gjennomsnittlig forsinkelsestid er innenfor et intervall av verdier (Aakre, 2020). Det er ønskelig at sikkerheten er stor, og at intervallet er minst mulig. Ettersom hver av de ulike replikasjonen vil variere, er det nyttig å sjekke om denne variasjonen er liten nok til at man faktisk kan konkludere med en gjennomsnittsverdi med en hvis sikkerhet eller om resultatet er helt tilfeldig generert. Avviket fra gjennomsnittsverdien, som vil utgjøre konfidensintervallet, er funnet ved Formel 13.

Formel 13

$$d = \frac{s}{\sqrt{n}} * t_{1-\alpha/2, n-1} \quad (\text{Aakre, 2020})$$

Hvor:

- $d$  = avvik fra gjennomsnittsverdien ved konfidensintervallet
- $s$  = standardavvik for settet
- $n$  = antall replikasjoner
- $t$  = t-verdien fra t-distribusjonen med sannsynlighet  $(1 - \alpha/2)$
- $\alpha$  = signifikansnivå.

Et  $(1 - \alpha)$  konfidensintervall vil dermed kunne beskrives med Formel 14, hvor  $\bar{X}$  er gjennomsnittsverdien.

$$\bar{X} \mp d$$

(Aakre, 2020)

95% konfidensintervallene for forsinkelsestiden ved de ulike scenarioene er funnet for å vurdere hvor mye de ulike replikasjonene varierer. Det antas at konfidensintervallet knyttet til forsinkelsestiden kan si noe om usikkerheten i *Average*-simuleringen generelt. Tabell 3.5 viser avviket,  $d$ , i konfidensintervallet som prosentandel av gjennomsnittsverdien  $\bar{X}$ , for å kunne vurdere hvor mye det er snakk om at forsinkelsestiden kan variere ved 95% konfidensintervall.

Tabell 3.5 Avvik ( $d$ ) i % ved 95% konfidensintervallet

Varighet V1				Varighet V2			
Scenario	S1	S2	ITS	Scenario	S1	S2	ITS
H1_T1	3.1	2.3	0.8	H1_T1	2.9	2.1	1.9
H1_T2	2.0	1.3	19.6	H1_T2	2.0	1.7	13.0
H1_T3	1.9	12.5	2.0	H1_T3	1.8	6.5	5.3
H2_T1	2.5	1.5	0.8	H2_T1	3.0	2.2	1.9
H2_T2	1.3	0.7	19.6	H2_T2	1.8	2.0	13.0
H2_T3	1.4	2.0	2.0	H2_T3	1.6	5.6	5.3
H3_T1	2.7	0.8	0.8	H3_T1	2.7	1.4	1.9
H3_T2	2.2	5.1	19.6	H3_T2	2.3	5.0	13.0
H3_T3	1.9	1.1	2.0	H3_T3	1.4	3.2	5.3
H4_T1		1.6	0.8	H4_T1		2.3	1.9
H4_T2		4.6	19.6	H4_T2		7.4	13.0
H4_T3		1.1	2.0	H4_T3		2.2	5.3

Som man ser fra tabellen er avvikene stort sett under 10%, med unntak av trafikk- etterspørsel T2 med ITS-tiltak (V#\_T2\_ITS) og V1\_H1\_T3\_S2. Resultatene fra disse scenarioene må vurderes ekstra med tanke på deres usikkerhet.

# 4 Resultater

## Kapittel 4

### 4.1 Estimat av kapasitet og hastigheter

I forbindelse med forskningsspørsmål 1 er det funnet at den mest hensiktsmessige måten å modellere hendelser som blokkerer kjørefelt helt eller delvis på er å finne en måte å imitere den reduserte kapasiteten som følger av hendelsen. Faktoren for den gjenstående kapasiteten (CAF) er estimert på bakgrunn av hvor mye kjøretøyene i de ulike feltene må avvike fra senter av kjørefeltet for å kunne opprettholde sitt nødvendige bevegelsesrom, samt en *rubbernecking*-faktor som beskrevet ved formlene i kapittel 3.4.5. Resultatet av disse estimatene er vist i Tabell 4.1. En tabell som viser verdiene av de ulike parameterne som inngår i estimatene kan sees i Vedlegg B.

Tabell 4.1 Estimerte kapasiteter

	H1				H2				H3				H4			
	S1		S2		S1		S2		S1		S2		S1/S2		S1/S2	
<b>Total CAF</b>	0.95		0.71		0.95		0.54		0.92		0.38		0.35		0.35	
<b>Kjørefelt</b>	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF
<b>CAF</b>	0.95	0.95	0.87	0.54	0.95	0.95	0.71	0.38	0.95	0.9	0.54	0.22	0.7	0	0.7	0

Som man ser fra tabellen er det antatt at H1\_S1 og H2\_S1 har samme gjenstående kapasitet, da ingen av hendelsene fører til at bevegelsesrommet til kjøretøyene i høyre kjørefelt forstyrres. Kapasiteten ved disse scenarioene er dermed kun påvirket av en *rubbernecking*-faktor på 5%. H1, H2 og H3 med skulderbredde S2 er derimot betydelig påvirket av hendelsen, ettersom det er mindre plass på skulderen til plassering av kjøretøy. Ved H3 med smal skulder er kapasiteten nesten like begrenset som ved H4, hvor hendelsen blokkerer hele kjørefeltet, mens H3\_S1 er estimert til å ha over 90% gjenstående kapasitet.

Videre besvarelse av forskningsspørsmål 1 har ført til at det er nødvendig å estimere hvilke hastigheter det forventes at kjøretøyene holder forbi hendelsen ved det trafikkvolumet som er på vegen. Ettersom trafikketterspørslene T1, T2 og T3 er profilerte slik at én andel av den totale etterspørselen slippes på strekningen i perioden 07:00-07:45 og 09:15-10:00 og en annen, større andel slippes på mellom 07:45 og 09:15, er det estimert ulike hastigheter for disse ulike tidsperiodene. Tabell 4.2 viser hvordan Excel-arket for estimering av hastighetene ved H1 er satt opp. De fullstendige tabellene for de andre hendelsetypene kan sees i Vedlegg C.

Tabell 4.2 Estimering av hastigheter, H1

		H1											
		T1				T2				T3			
		S1		S2		S1		S2		S1		S2	
CAF		0.95		0.71		0.95		0.71		0.95		0.71	
Kapasitet (C)	[kjt/t]	3933		2939		3933		2939		3933		2939	
Kjørefelt		VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF
CAF		0.95	0.95	0.87	0.54	0.95	0.95	0.87	0.54	0.95	0.95	0.87	0.54
Kapasitet (C)	[kjt/t]	1967	1967	1801	1118	1967	1967	1801	1118	1967	1967	1801	1118
Ved trafikketterspørsel 07:00-07:45 og 09:15-10:00													
Trafikkvolum (Vp)	[kjt/t/felt]	125				250				375			
Vp/C	[%]	6	6	7	11	13	13	14	22	19	19	21	34
Andel av Vp i felt	[%]	6	94	10	90	11	89	18	82	16	84	25	75
Vp i felt	[kjt/t]	15	235	24	226	55	445	90	410	117	633	189	561
Vp/C i felt	[%]	1	12	1	20	3	23	5	37	6	32	11	50
Tetthet	[kjt/km]	0	2	0	4	0	5	1	7	1	6	2	10
Hastighet	[km/t]	114	107	114	106	113	106	113	102	113	104	112	97
Ved trafikketterspørsel 07:45-09:15													
Trafikkvolum (Vp)	[kjt/t/felt]	500				1000				1500			
Vp/C	[%]	25	25	28	45	51	51	56	89	76	76	101	101
Andel av Vp i felt	[%]	20	80	32	68	35	65	48	52	45	55	62	38
Vp i felt	[kjt/t]	200	800	316	684	695	1305	963	1037	1343	1657	1871	1129
Vp/C i felt	[%]	10	41	18	61	35	66	53	93	68	84	104	101
Tetthet	[kjt/km]	2	8	3	13	7	14	11	19	14	17	39	82
Hastighet	[km/t]	112	103	110	91	107	96	101	41	99	87	47	14

Tabellen viser et estimat av hvordan trafikkvolumet fordeler seg på de ulike kjørefeltene ved ulike trafikketterspørsler, som igjen fører til estimatet av hastighet basert på Formel 10. Når cellene er gule har man trafikkvolum større enn eller lik kapasiteten i kjørefeltet. Hastigheten som er oppgitt i disse cellene er hastigheten ved kapasitet. Ettersom gjennomstrømningen synker igjen når man overgår kapasiteten, som omtalt i delkapittel 2.2.4, og hastigheten synker med økt tetthet, vil den faktiske hastigheten ved disse scenarioene være lavere enn den oppgitt i tabellen. Når fartsgrensen i Aimsun settes til hastigheten vist i tabellen vil modellen selv sørge for at kjøretøyene holder en lavere hastighet, og at gjennomstrømningen er mindre og trafikk tettheten korresponderer med dette.

Tabell 4.3 viser en oppsummering av alle de estimerte hastighetene i km/t ved kapasitetsreduksjonen som hendelsene medfører. Ha1 og Ha2 er hastigheten i hhv. perioden med lav trafikketterspørsel (07:00-07:45 og 09:15-10:00) og med høy trafikketterspørsel (07:45-09:15). Også her er cellene markert med gult som i tabellen over dersom trafikketterspørselen overskrider kapasiteten.

Tabell 4.3 Estimerte hastigheter for alle scenarioer, km/t

	T1								T2								T3							
	S1				S2				S1				S2				S1				S2			
	Ha1		Ha2		Ha1		Ha2		Ha1		Ha2		Ha1		Ha2		Ha1		Ha2		Ha1		Ha2	
	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF	VF	HF
<b>H1</b>	114	107	112	103	114	106	110	91	113	106	107	96	113	102	101	41	113	104	99	87	112	97	47	14
<b>H2</b>	114	107	112	103	113	104	108	75	113	106	107	96	112	98	73	8	113	104	99	87	110	89	25	8
<b>H3</b>	114	107	112	102	113	100	101	4	113	104	107	91	111	82	14	4	113	104	98	76	107	49	14	4
<b>H4</b>	110	0	90	0					107	0	24	0					101	0	24	0				

## 4.2 Trafikkavvikling

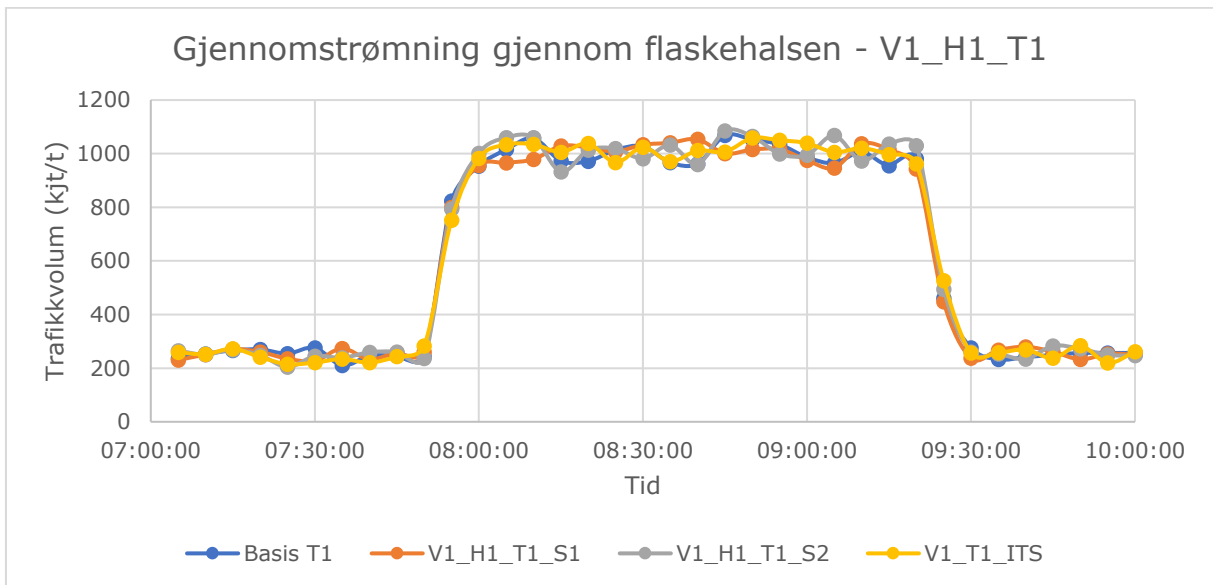
### 4.2.1 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen

Gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen, altså forbi hendelsesseksjonen, er framstilt som trafikkvolum på strekningen som en funksjon av tid. I tillegg vises gjennomsnittlig gjennomstrømning for den mest interessante tidsperioden ved hendelsen for de ulike scenarioene. Ettersom man har brukt en profilert trafikketterspørsel som beskrevet i 3.4.2 reflekteres dette naturligvis i gjennomstrømningen, men man kan se hvordan noen scenarioer fører til at gjennomstrømningen begrenses kraftig. I det videre grupperes de ulike kombinasjonene av varighet, V, og hendelse, H, for å kunne sammenligne forskjellene mellom skulderbreddene og ITS-tiltaket.

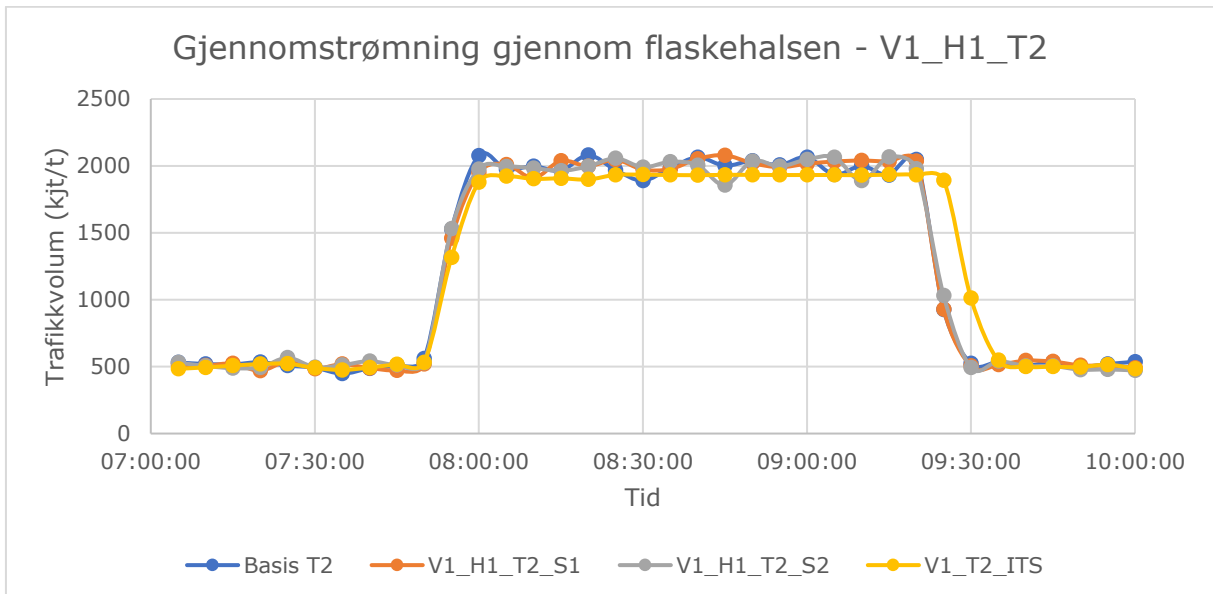
#### Varighet V1 - Hendelse H1

Ved varighet V1 varer hendelsen gjennom hele simuleringsperioden. Figur 4.1, Figur 4.2 og Figur 4.3 viser gjennomstrømningen for V1\_H1 for hhv. T1, T2 og T3.

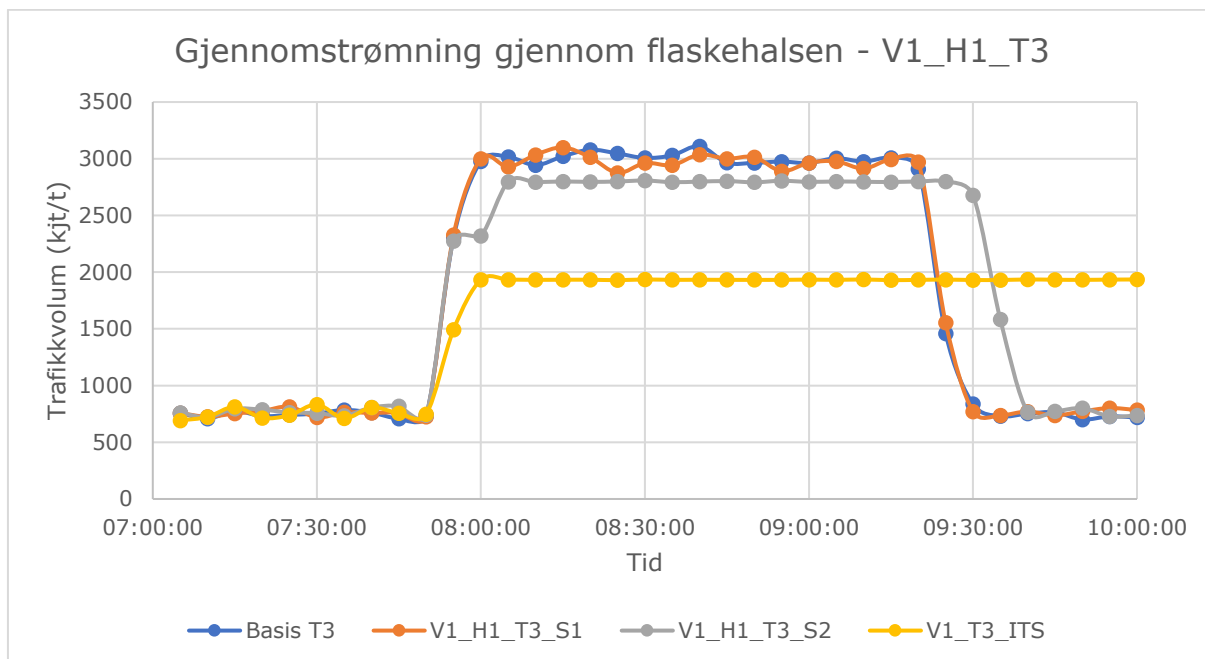




*Figur 4.1 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_H1\_T1*



*Figur 4.2 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_H1\_T2*

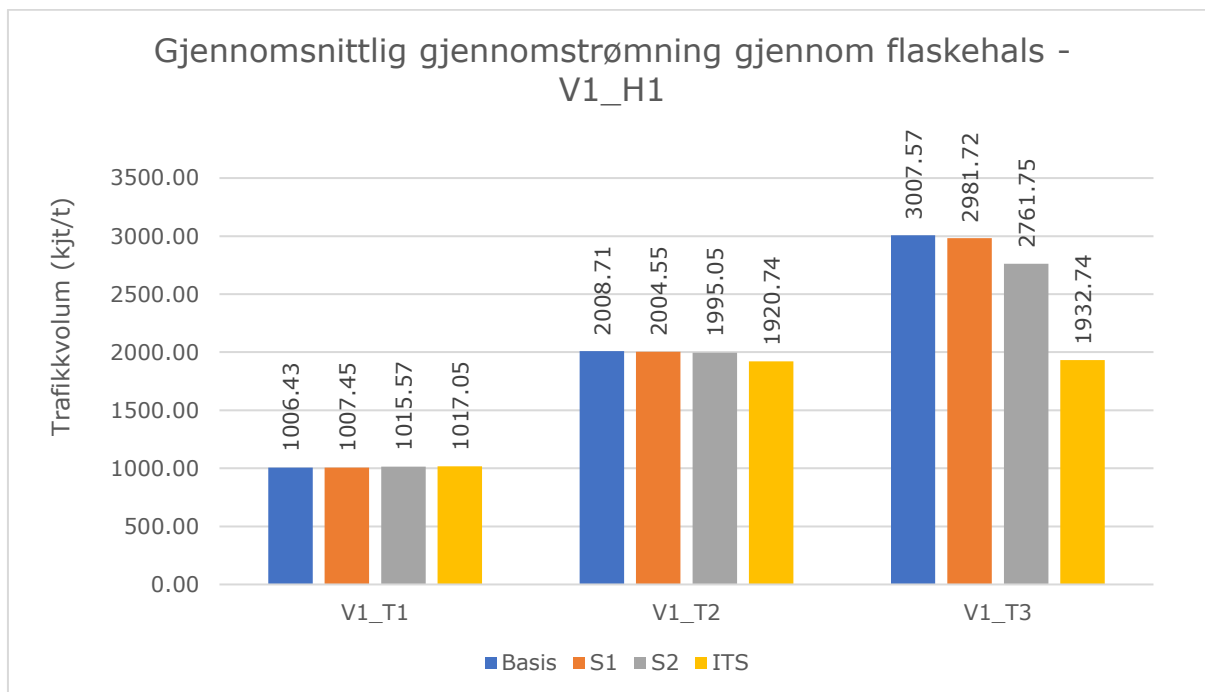


Figur 4.3 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_H1\_T3

Som man kan se ut fra figurene påvirkes gjennomstrømningen i liten grad av skulderbredden ved liten trafikketterspørsel. Dette vil være naturlig, ettersom man har trafikketterspørsel som er mye mindre enn kapasiteten. Ved T2, hvor trafikketterspørselen gir et trafikkvolum på 2000 kjt/t på strekningen, begrenses trafikkflyten noe av kapasiteten ved ITS-tiltaket og gjennomstrømningen er da omtrent 1930 kjt/t. Ved trafikketterspørsel T2 viser det seg at det er lite forskjell mellom S1 og S2 ved denne hendelsestypen og varigheten. Ved T3 er det derimot mulig å se at gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen er mindre ved smalere skulder (S2) enn ved skulderbredde tilsvarende dagens standard (S1). I dette tilfellet overgår trafikketterspørselen i midten av simuleringsperioden kapasiteten ved kapasitetsreduksjonen som er estimert og lagt inn i modellen ved hjelp av nedskrivning av fartsgrensen. Man ser også at man i dette tilfellet får en forskyvning av når trafikkvolumet går ned igjen til nivået som etterspørselen gir mellom 09:15 og 10:00. Dette skjer fordi man har fått en opphopning av kjøretøy før hendelsesstrekningen når trafikkvolumet har vært større enn kapasiteten, og man bruker lengre tid på å avvikle disse kjøretøyene gjennom flaskehalsen.

Fra Figur 4.3 kan man se at ITS-tiltaket gjør at man har trafikkvolum som begrenses av den nye kapasiteten resten av simuleringsperioden etter økningen i trafikketterspørsel. Dette skjer fordi det hopper seg opp så mange kjøretøy at man hele resten av perioden har problemer med å få avviklet alle disse forbi flaskehalsen.

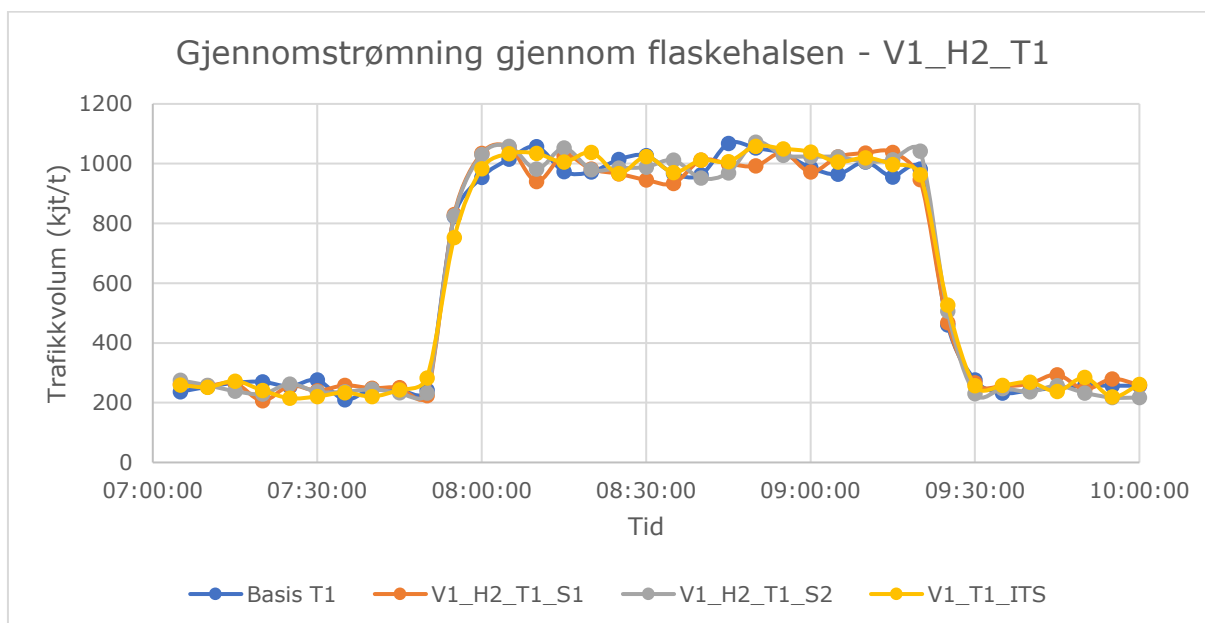
Gjennomsnittlig gjennomstrømning ved scenario V1\_H1 i perioden 08:00 til 09:00, altså en periode der man har den høyeste andelen av trafikketterspørsel i simuleringsperioden, er vist i Figur 4.4. Her kan man se at det ikke er betydelige forskjeller mellom basis-scenarioet og V1\_H1\_S1 for alle trafikketterspørsler, mens man har en noe mer markant reduksjon i gjennomsnittlig gjennomstrømning for V1\_H1\_T3\_S2. ITS-scenarioet har en god del lavere gjennomstrømning for både T2 og T3 enn hendelsen uten tiltak.



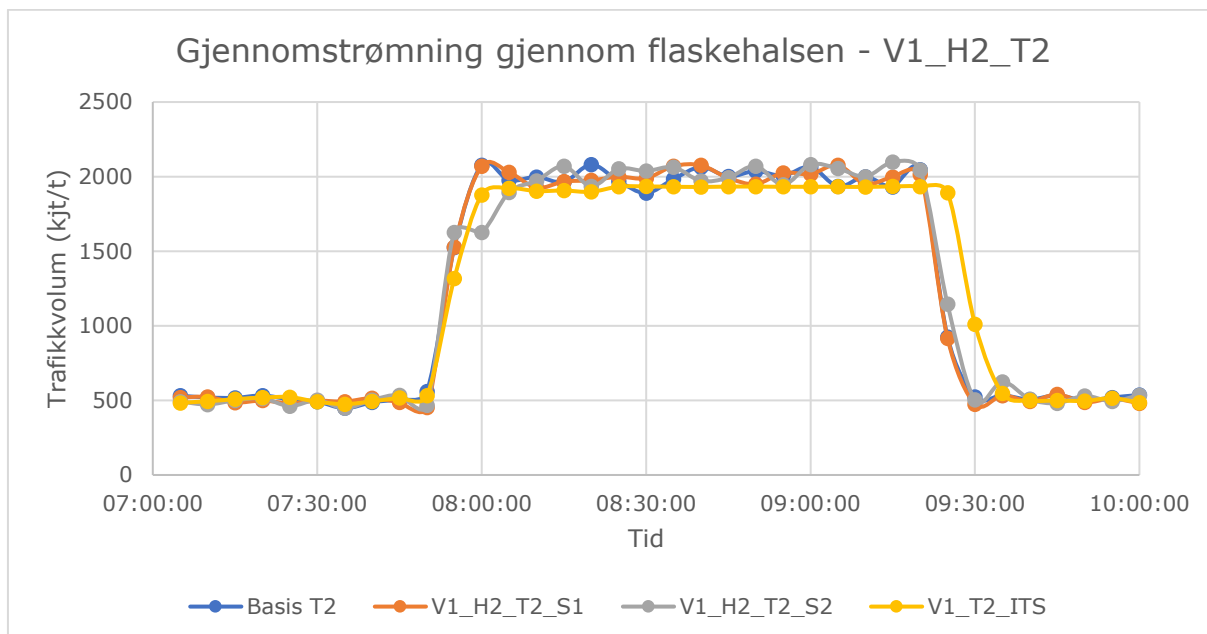
Figur 4.4 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals 08:00-09:00 - V1\_H1

#### Varighet V1 - Hendelse H2

Figur 4.5 og Figur 4.6 viser gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen i løpet av simuleringsperioden ved H2 for hhv. T1 og T2. Som man ser fra grafene er ikke kapasiteten så mye redusert ved hendelsen at gjennomstrømningen er nevneverdig påvirket for verken S1 eller S2. Ved denne hendelsen gir ITS-tiltaket litt lavere gjennomstrømning gjennom flaskehalsen enn når man ikke har ITS-tiltak ved T2, slik man også kunne se for H1.

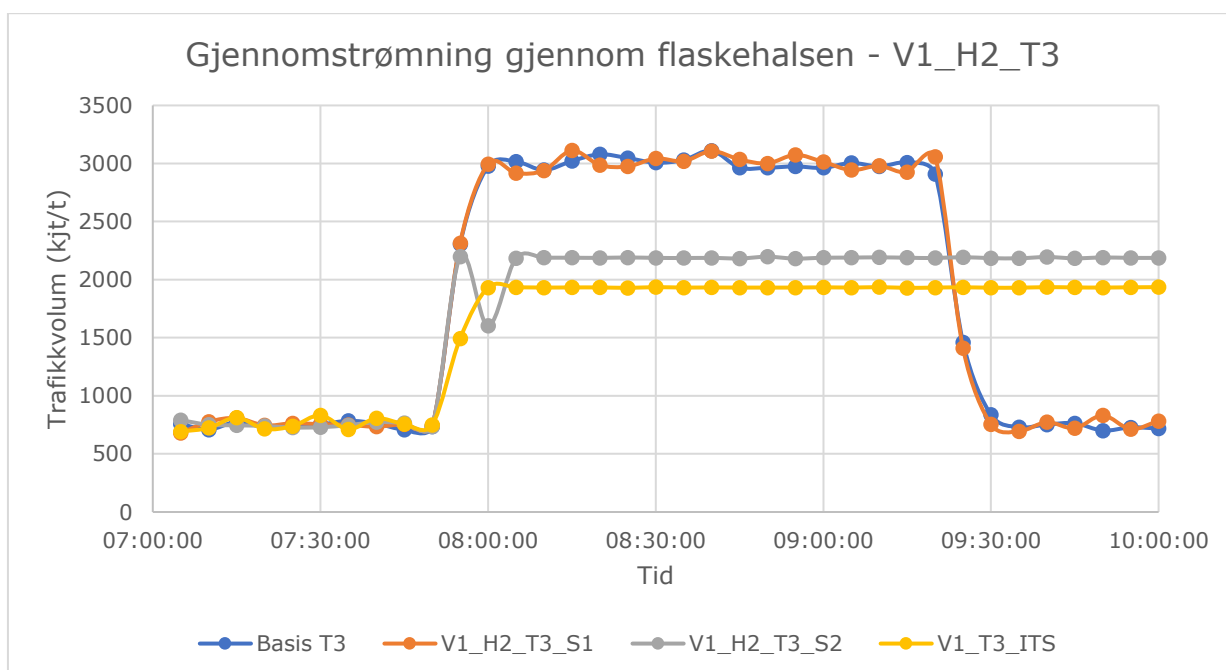


Figur 4.5 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_T2\_T1



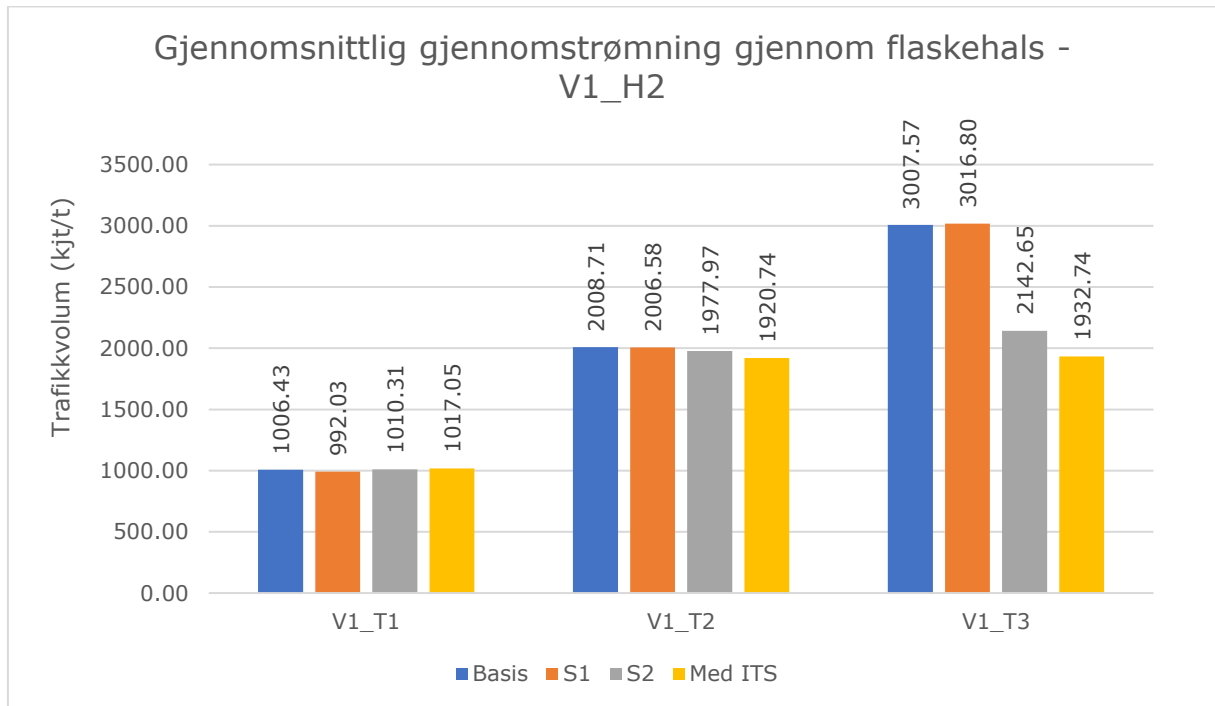
Figur 4.6 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_H2\_T2

Mer markante forskjeller mellom scenarioene kan derimot sees når man har høyere trafikk- etterspørsel, T3. Dette vises i Figur 4.7. Her ser man at når man har smal skulder, S2, er gjennomstrømningen en god del lavere enn ved S1 og basisscenarioet. I tillegg er trafikk- etterspørselen så pass mye større enn kapasiteten ved etterspørselstoppen at kjøretøyene er hopet opp bak hendelsesseksjonen og man får trafikkvolum som begrenses av kapasiteten resten av simuleringsperioden. Dette gjelder også for ITS tiltaket, men her er gjennomstrømningen enda lavere. Man har altså problemer med avviklingen både når man har smal skulder og når man benytter ITS-tiltaket.



Figur 4.7 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_H2\_T3

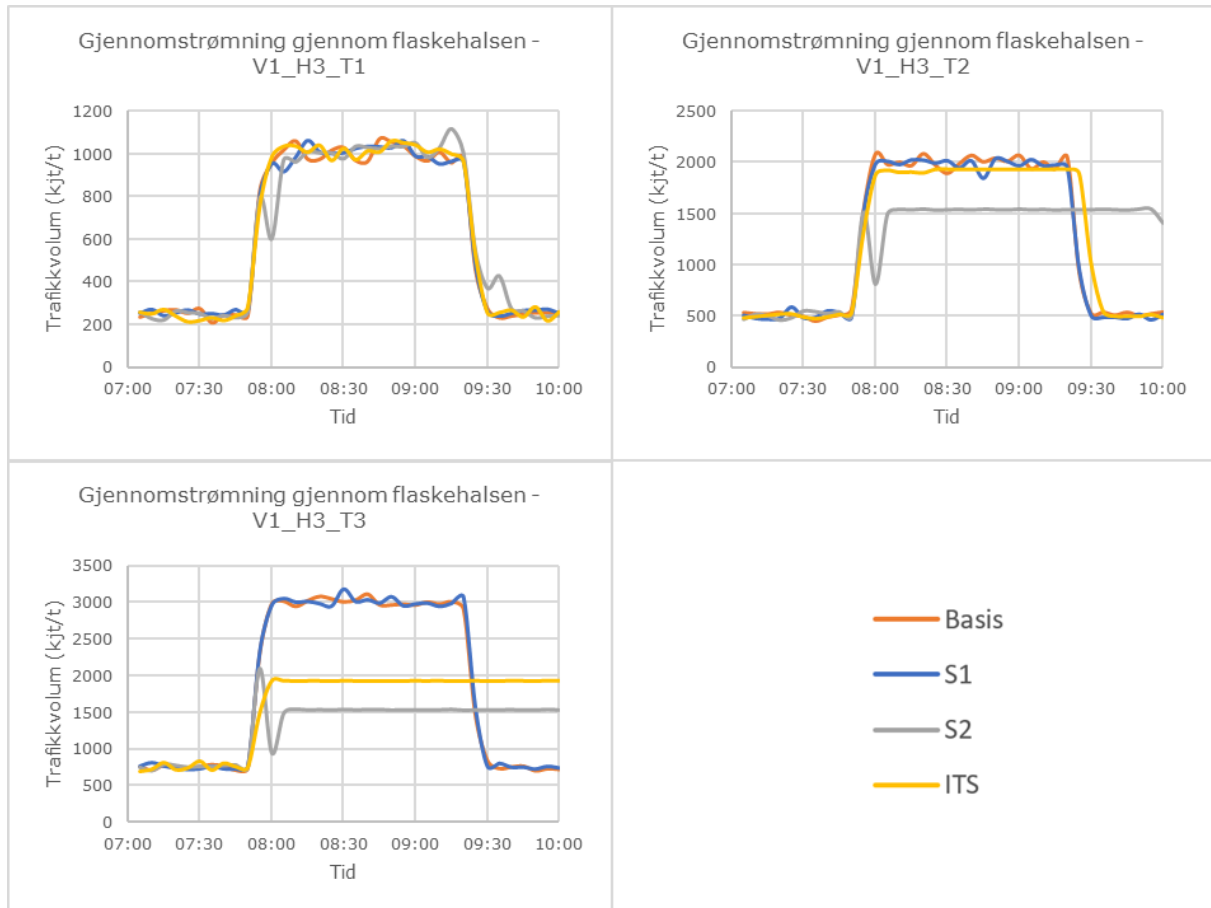
Den gjennomsnittlige gjennomstrømningen i tidsperioden 08:00-09:00 vises i Figur 4.8. Her er det blant annet nyttig å merke seg at trafikkvolumet ved V1\_H2\_T3\_S2 er mindre enn den estimerte kapasiteten. Dette antas å skyldes at man overskrider kapasiteten i dette tilfellet, og flaskehalsen er overbelastet og dermed har lavere gjennomstrømning.



Figur 4.8 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals 08:00-09:00- V1-H2

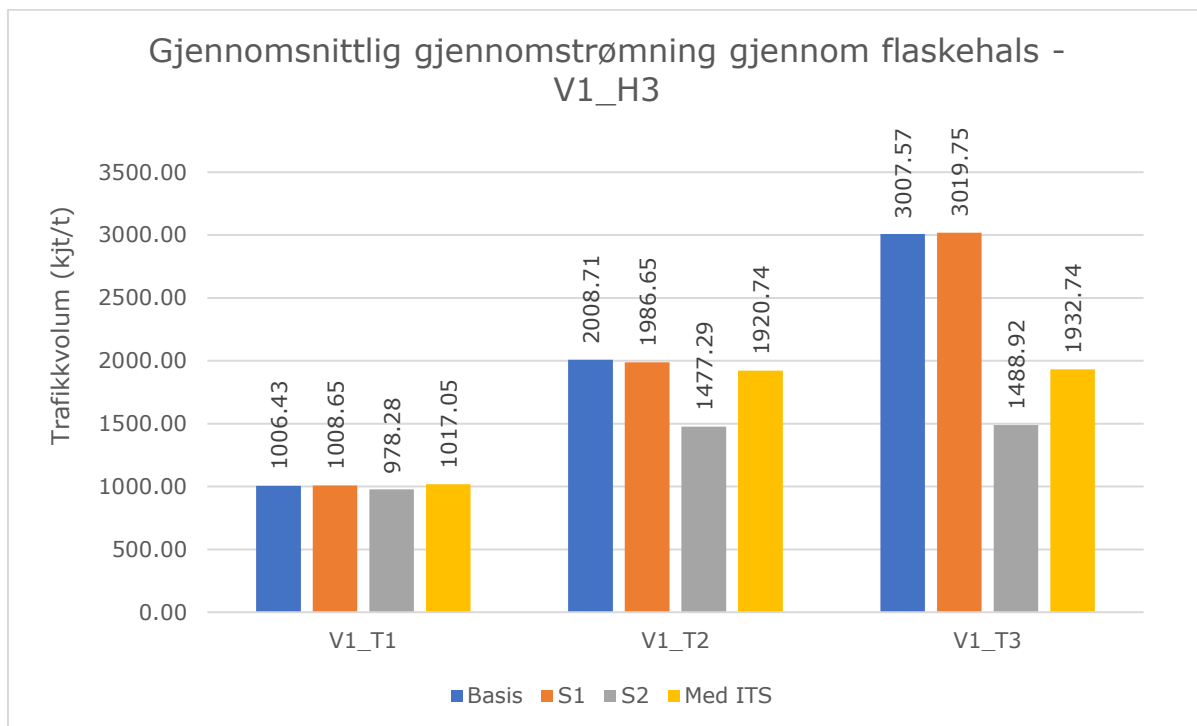
### Varighet V1 – Hendelse H3

Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen for hendelse H3 med varighet V1 vises i Figur 4.9 for T1, T2 og T3. Som man ser fra scenarioene med T1 gir ikke hendelsen store utslag for noen av skulderbreddene eller ITS-tiltaket. Når man derimot har større trafikk- etterspørsel gir hendelsen ved smal skulder, S2, lavere gjennomstrømning enn når man har ITS-tiltak som styrer trafikken ved denne hendelsen. Skulderbredde etter dagens standard, S1, gir derimot gjennomstrømning som er omtrent like stor som når hendelsen ikke har oppstått på veien (basis). Grafene kan sees i større format i Vedlegg D.



Figur 4.9 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen, V1\_H3

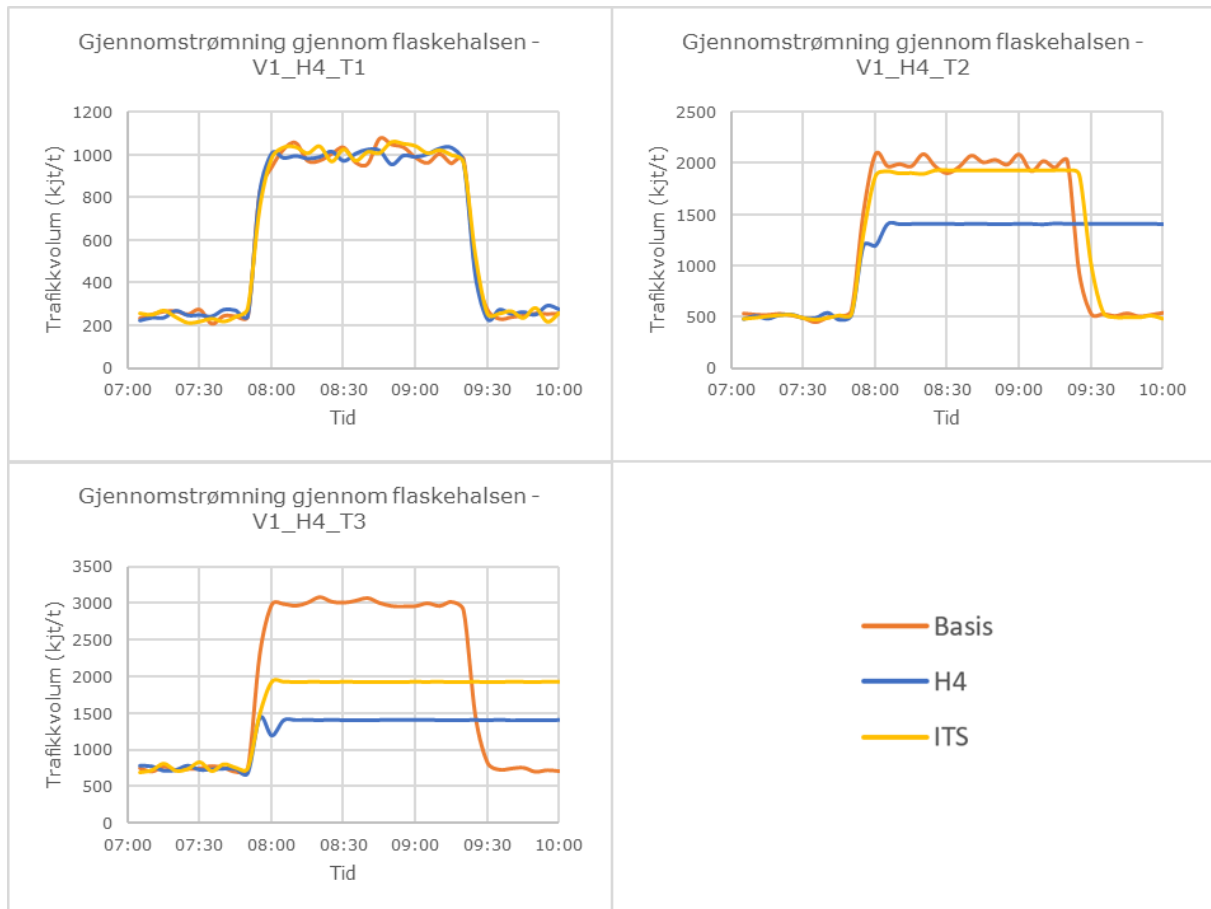
I Figur 4.10 kan man se en sammenstilling av den gjennomsnittlige gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen i tidsperioden 08:00-09:00 for de ulike trafikketter spørslene og de ulike skulderbreddene/ITS. Også her er det tydelig at hendelsen H3 med smal skulder, S2, gir en lavere gjennomstrømning enn ved ITS-tiltaket, og at H3 med skulder etter dagens standard, S1, gir en høyere gjennomstrømning enn ved ITS-tiltaket.



Figur 4.10 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehalsen 08:00-09:00 - V1\_H3

### Varighet V1 – Hendelse H4

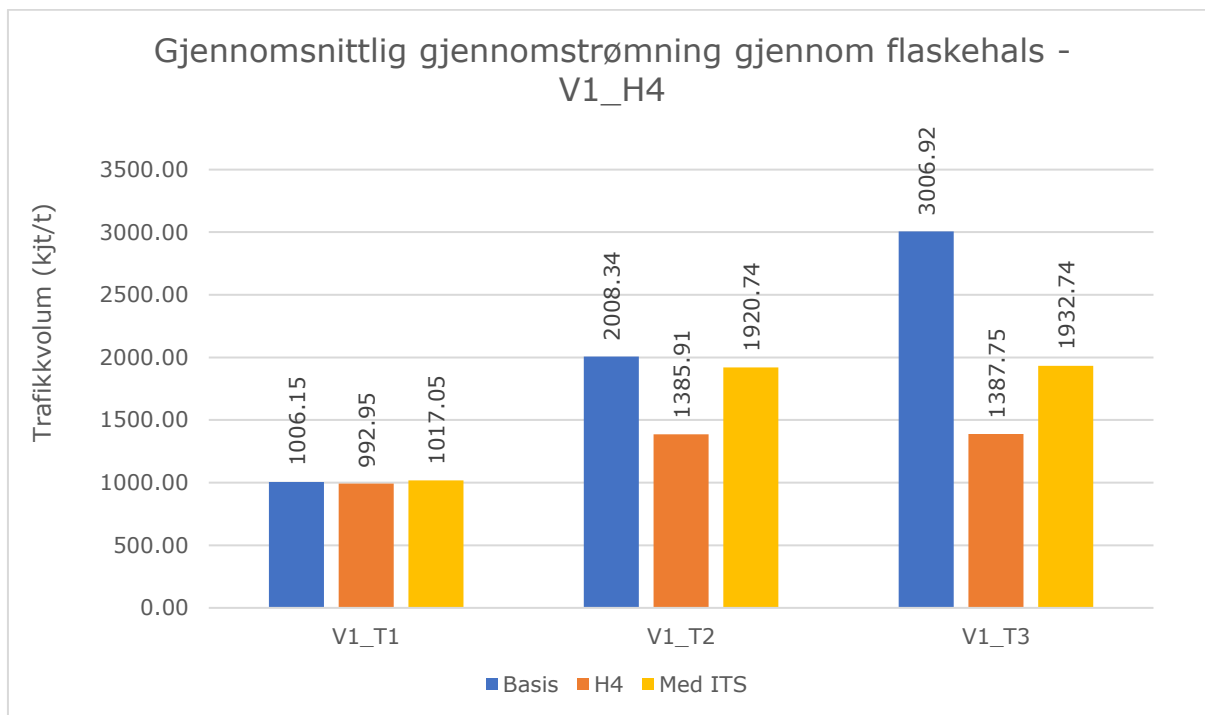
Ved hendelse H4 er det som tidligere nevnt antatt at skulderbredden ikke har noen effekt på trafikkavvikling eller trafiksikkerhet ettersom hele høyre kjørefelt er fysisk stengt. Dermed har man i Figur 4.11 kun data for hendelsen i seg selv, og man skiller altså ikke mellom S1 og S2. Ved denne hendelsen ser man at ITS-tiltaket gjør at man har høyere gjennomstrømning enn når vegen er fysisk stengt på grunn av stopp/ulykke og man ikke regulerer trafikken over i venstre kjørefelt.



Figur 4.11 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V1\_H4

Den gjennomsnittlige gjennomstrømningen mellom 08:00 og 09:00 ved hendelse H4 vises i Figur 4.12. Som tidsseriene indikerer, er den gjennomsnittlige gjennomstrømningen ved basis-scenariotet og hendelse H4 med og uten tiltak tilnærmet lik ved lav trafikketterspørsel. Når man har mellomstor og stor trafikketterspørsel (T2 og T3) gir hendelse H4 uten tiltak betydelig lavere gjennomstrømning enn basisscenariotet og ITS-scenariotet.

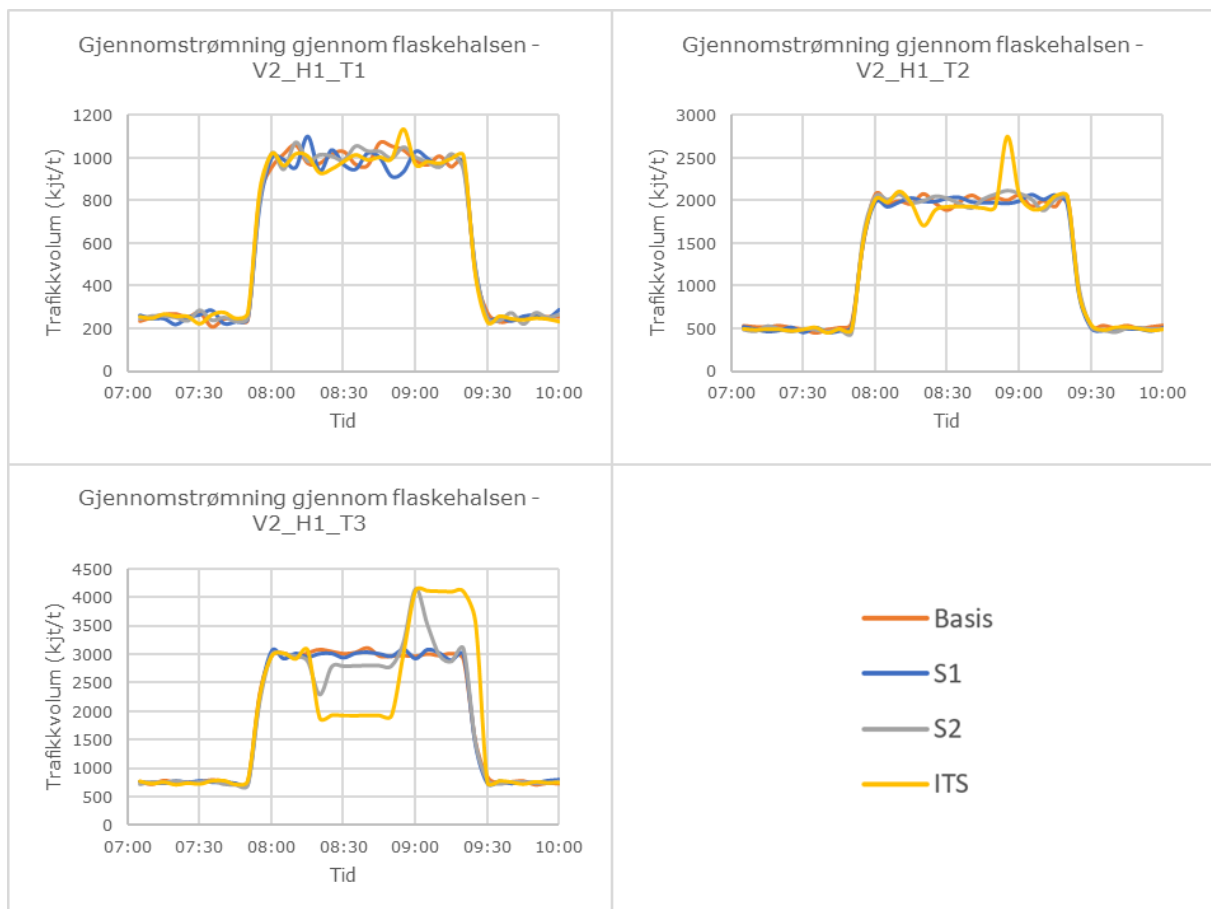




Figur 4.12 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals 08:00-09:00 - V1\_H4

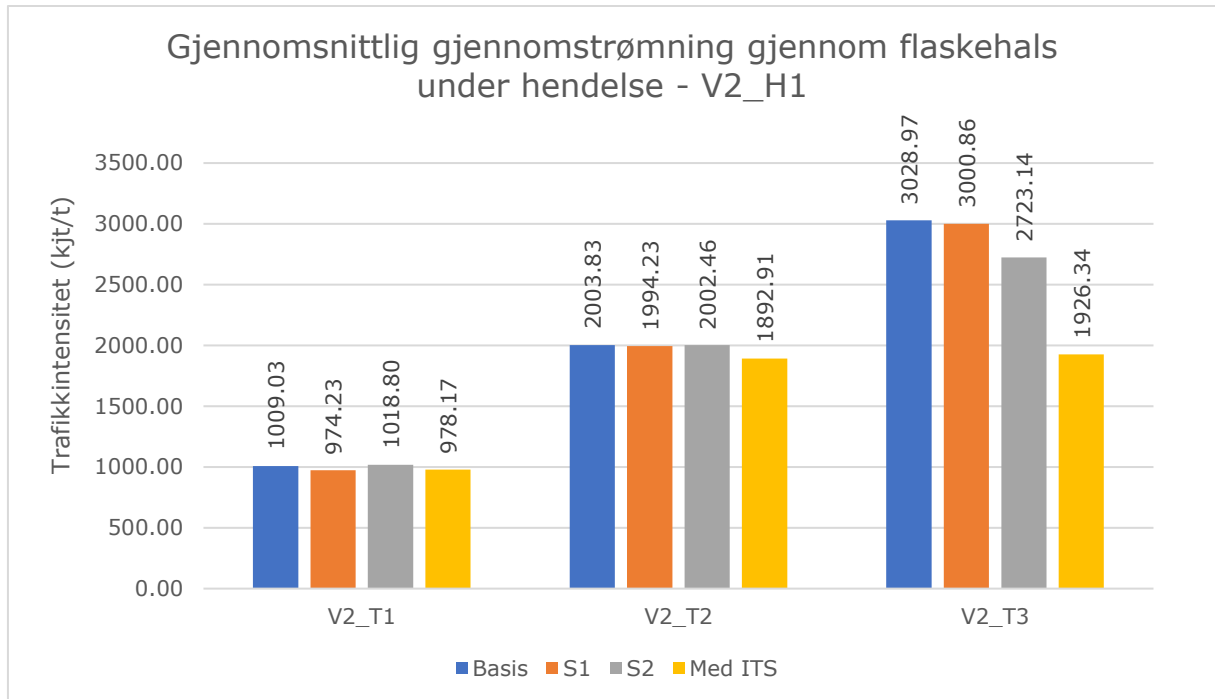
## Varighet V2 – Hendelse H1

Ved varighet V2 varer hendelsen 37 minutter fra 08:15. Figur 4.13 viser gjennomstrømningen V2\_H1 medfører ved de ulike trafikketerspørslene og skulderbreddene. Som man kan se fra resultatene fører hendelsen til at man ved T3 har noe reduksjon i gjennomstrømning ved S2 i forhold til S1 mens hendelsen pågår. Det ser også ut til at man helt i starten av hendelsen har en kort periode med en lavere gjennomstrømning enn under resten av hendelsen. Etter hendelsen er det en liten periode med gjennomstrømning lik den originale kapasiteten på veien, altså omtrent 4140 kjt/t, fordi man har opphopede kjøretøy bak flaskehalsen som vil forsøke å avvikles optimalt når hendelsen er fjernet. Når man bruker ITS-tiltak skjer dette ved T2 og T3. Det ser derimot ut til at man ikke får det samme brå fallet i gjennomstrømning ved starten av hendelsen ved ITS-tiltaket. Dette kan tyde på at reduksjonen i kapasitet er mer kontrollert ved ITS-tiltaket, og at kjøretøyene samarbeider bedre om å opprettholde trafikkflyt opp mot det som er den nye kapasiteten når de får beskjed om ny fartsgrense og feltskifte fra de variable skiltene.



Figur 4.13 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2\_H1

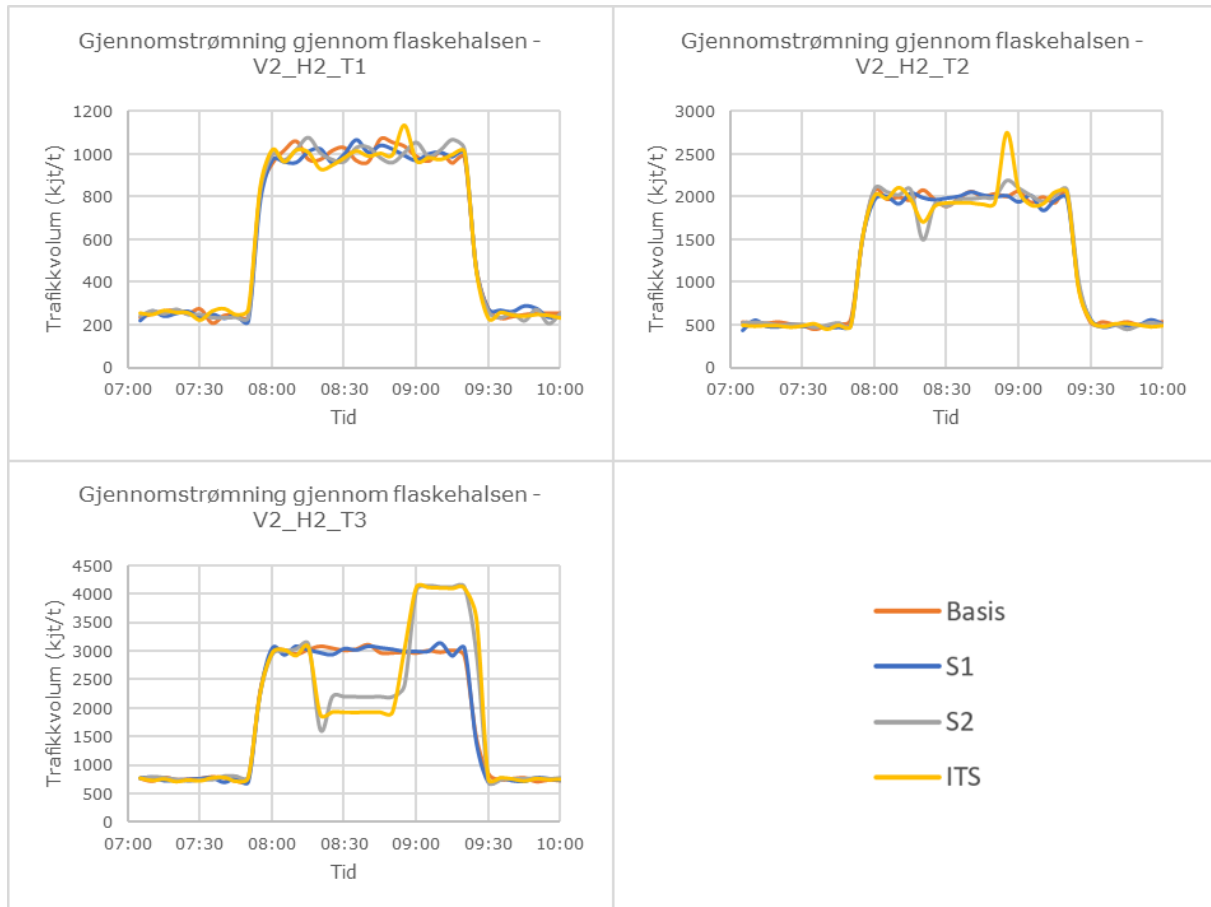
Figur 4.14 viser den gjennomsnittlige gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen under hendelsen. ITS-tiltaket resulterer i den laveste gjennomstrømningen for denne hendelsen og varigheten, mens S2 har noe redusert gjennomstrømning ved T3. Det kan også være verdt å merke seg at ved T2 er den gjennomsnittlige gjennomstrømningen ved ITS-tiltak noe lavere ved denne varigheten enn det som ble resultatet i V1. Dette kan tenkes at skjer på grunn av det plutselige fallet i kapasitet som påføres ved V2, og som ikke skjer ved V1 ettersom ITS-tiltaket er aktivert gjennom hele simuleringsperioden ved V1.



Figur 4.14 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2\_H1

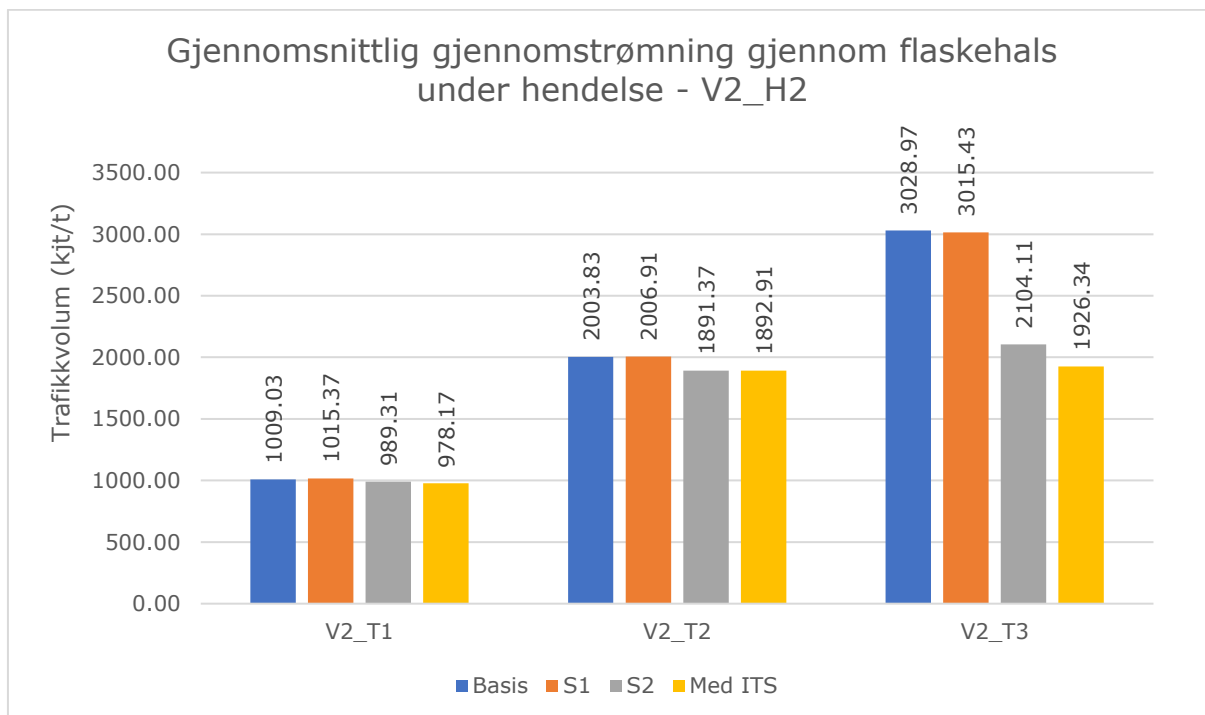
## Varighet V2 – Hendelse H2

Ved H2 er det enda tydeligere at førerne er mer påvirket av den plutselige reduksjonen i kapasitet ved S2 enn når ITS-tiltaket aktiveres. I Figur 4.15 ser man at man har et brått fall i gjennomstrømning ved både T2 og T3 som gjør at man har gjennomstrømning lavere enn ved ITS-tiltaket. Resten av hendelsen viser det seg at ITS-tiltaket fører til noe lavere gjennomstrømning enn når man har smal skulderbredde, S2. Skulderbredde etter dagens standard, S1, fører fortsatt til gjennomstrømning som er nokså lik den man har ved basis-scenarioet. Dette er fordi kapasitetsreduksjonen er så liten at trafikketterspørselen ikke når den nye kapasiteten.



Figur 4.15 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2\_H2

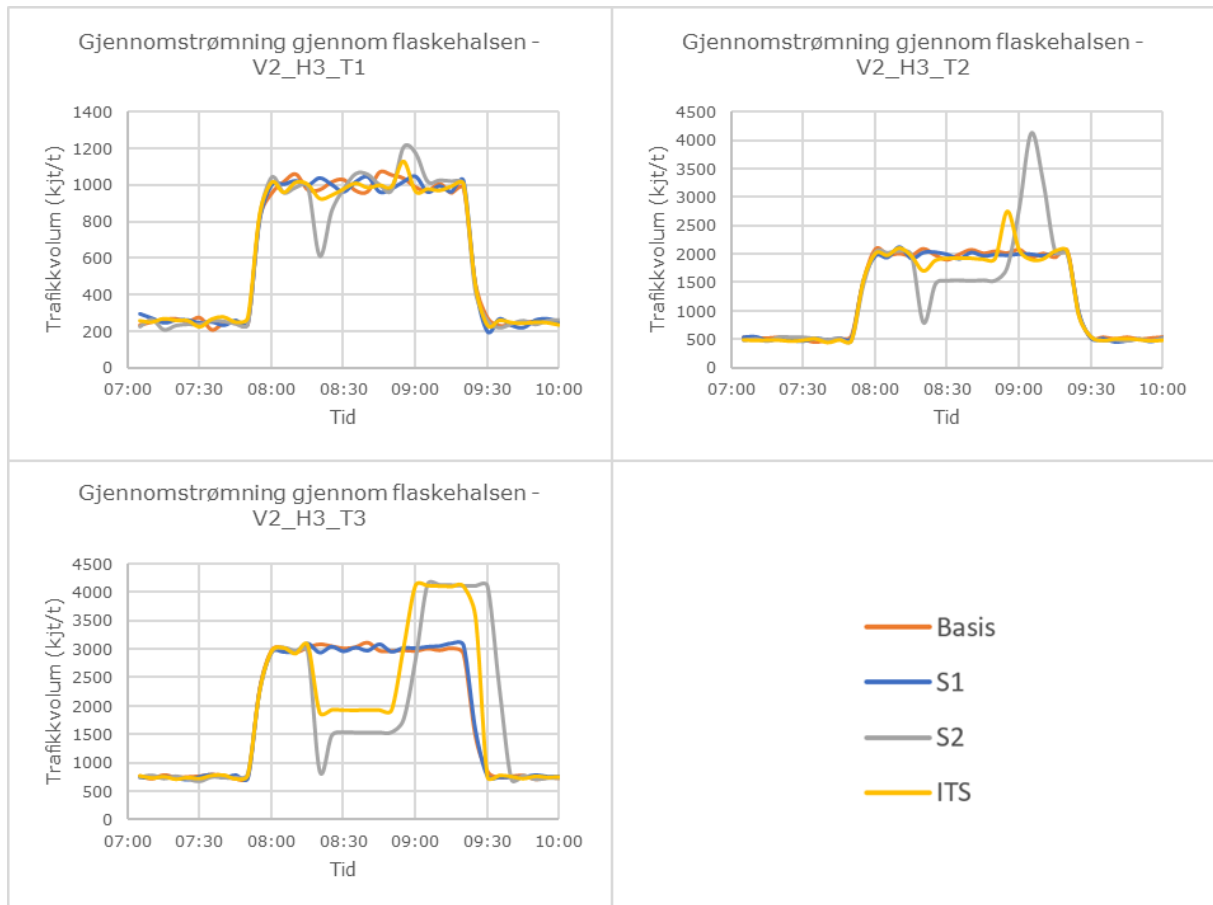
Figur 4.16 viser gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehalsen for V2\_H2. Man ser at det plutselige fallet i gjennomstrømning ved hendelsesstart som man så for S2 i Figur 4.15 fører til at den gjennomsnittlige gjennomstrømningen i hendelsesperioden ved S2 nærmer seg den gjennomsnittlige gjennomstrømningen ved ITS-tiltaket, ved T2. Der som man sammenligner V2\_H2\_S2\_T3 med V1\_H2\_S2\_T3 (Figur 4.7) ser man at forskjellen mellom gjennomsnittlig gjennomstrømning ved S2 og ITS er noe mindre når hendelsen har kortere varighet.



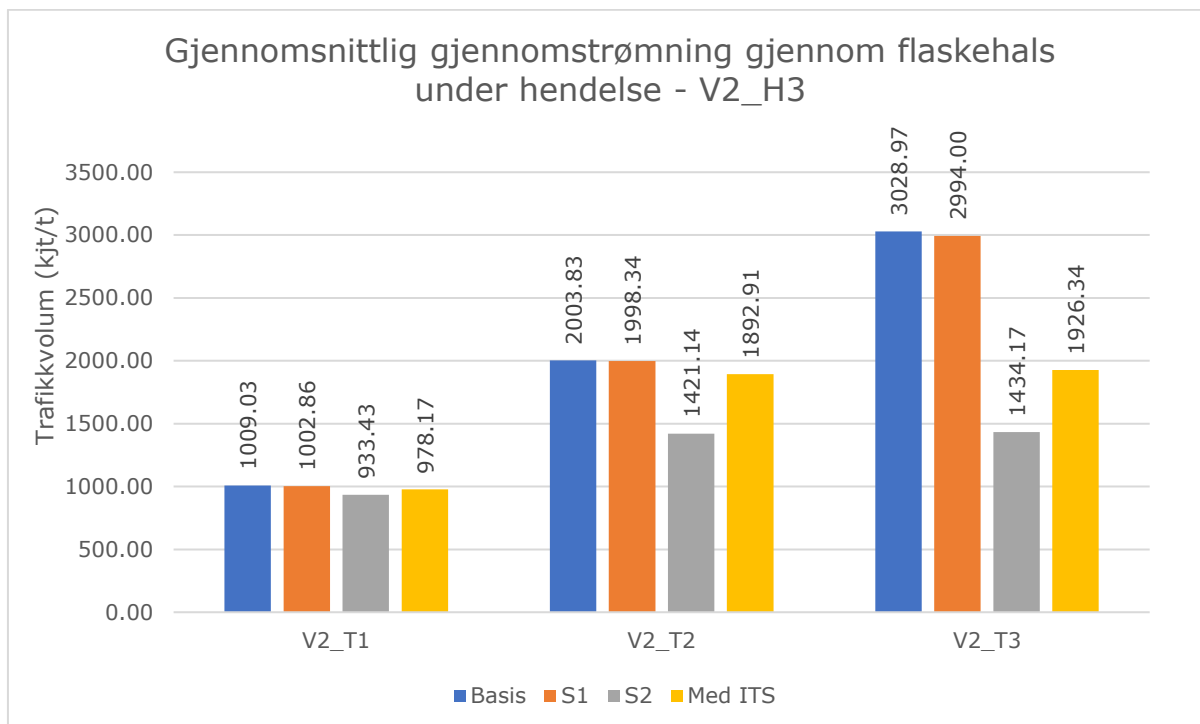
Figur 4.16 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2\_H2

### Varighet V2 – Hendelse H3

Ved V2\_H3 ser det ut til at hendelsen får stor påvirkning på gjennomstrømningen ved smal skulder, S2, selv ved den laveste trafikketterspørselen, T1. Se Figur 4.17. Gjennomstrømningen faller plutselig når hendelsen inntreffer, men stabiliserer seg noe mot slutten av hendelsen før den øker når hendelsen er ferdig. Det samme ser man for T2 og T3. Smal skulderbredde gir tydelig lavere gjennomstrømning under selve hendelsen, og lenger tid med maksimal gjennomstrømning etter hendelsen, enn dersom man benytter seg av ITS-tiltak. Dette kan også sees på de gjennomsnittlige verdiene vist i Figur 4.18.



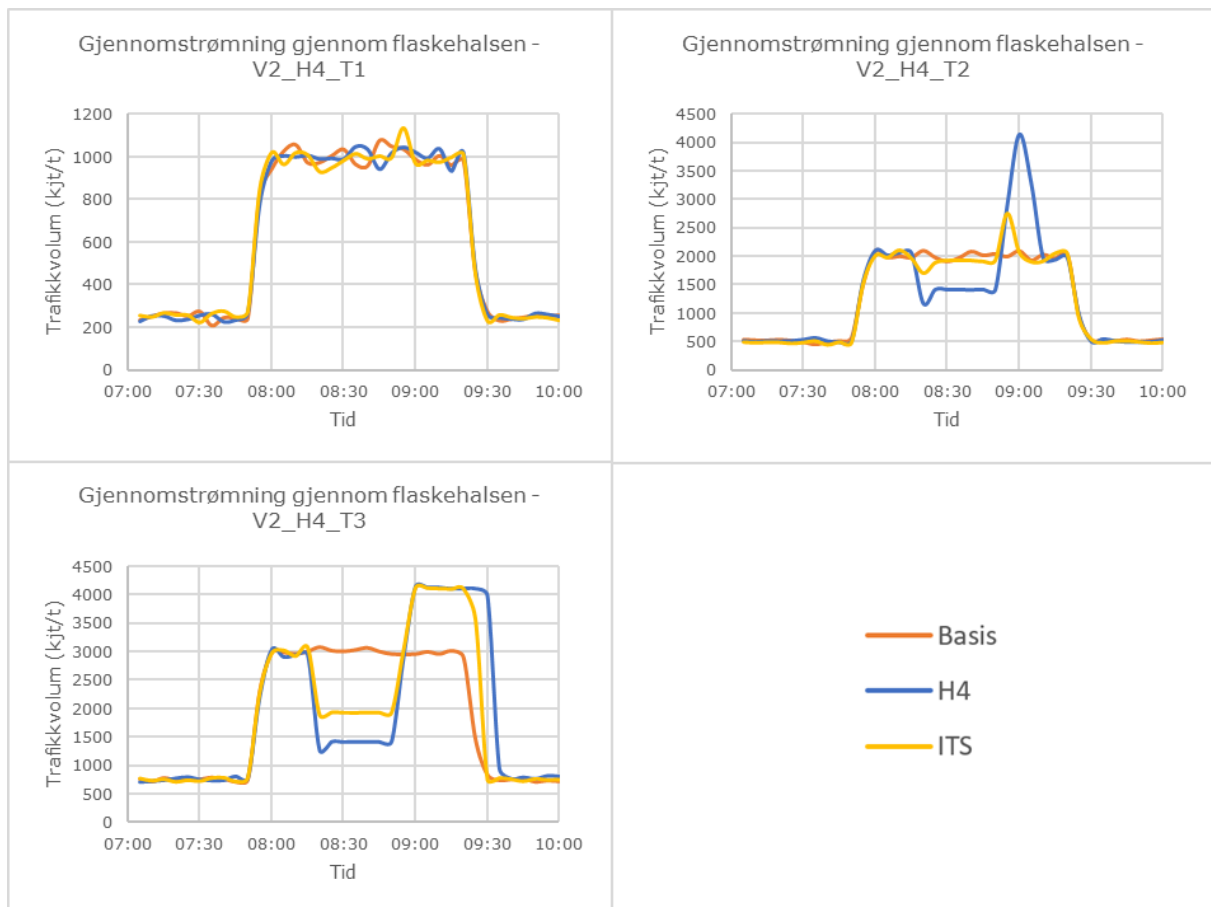
Figur 4.17 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2\_H3



Figur 4.18 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2\_H3

## Varighet V2 - Hendelse H4

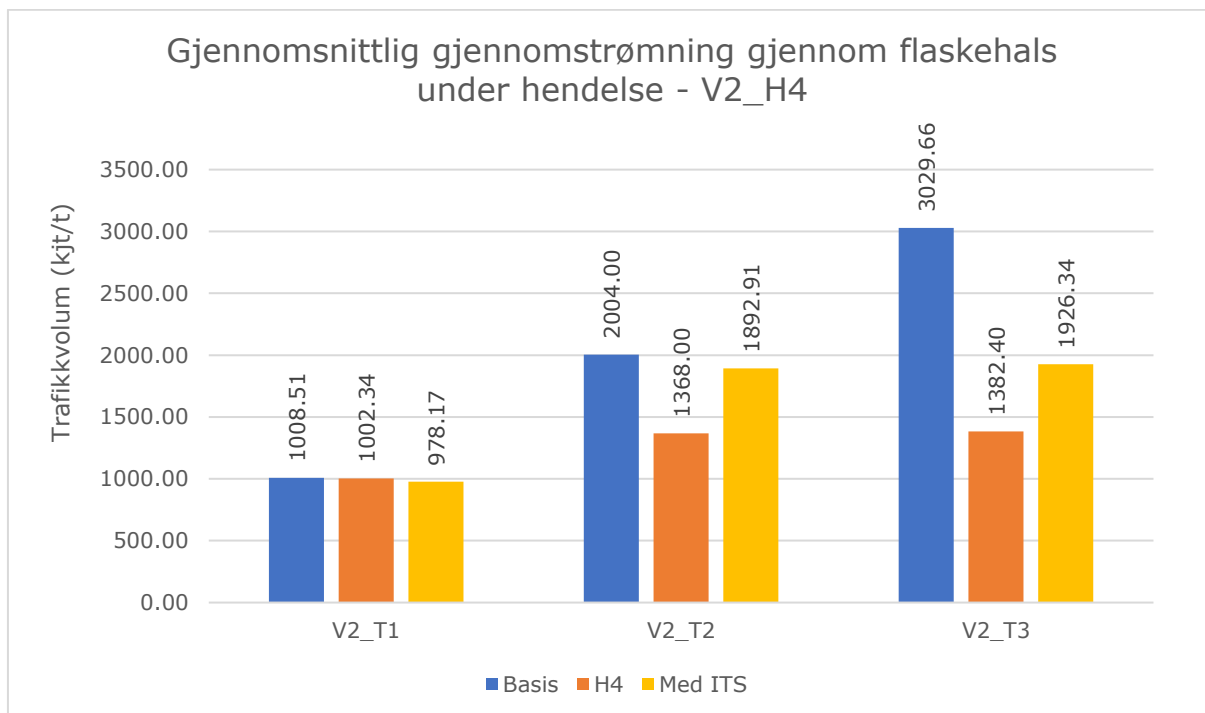
Når hele høyre kjørefelt er blokkert ser det ut til at man ikke får det samme brå fallet i gjennomstrømning ved hendelsen uten ITS-tiltak som man gjorde for H1-H3 (Figur 4.19). Dette kan skyldes at det er helt tydelig for førerne at det kun er et kjørefelt og at de må foreta feltskifte. Ved H3 kan det tenkes at flere av kjøretøyene blir i høyre kjørefelt selv om det er liten plass der, og heller bremses kraftig ned samtidig som de trekker seg så langt bort fra det stoppede kjøretøyet at de hindrer kjøretøyene i venstre felt uten å faktisk legge seg over i det feltet.



Figur 4.19 Gjennomstrømning gjennom flaskehalsen - V2\_H4

Den gjennomsnittlige gjennomstrømningen under hendelsen er betydelige lavere uten ITS-tiltak enn den er med et slikt tiltak ved trafikketterspørsel T2 og T3, som man kan se i Figur 4.20.

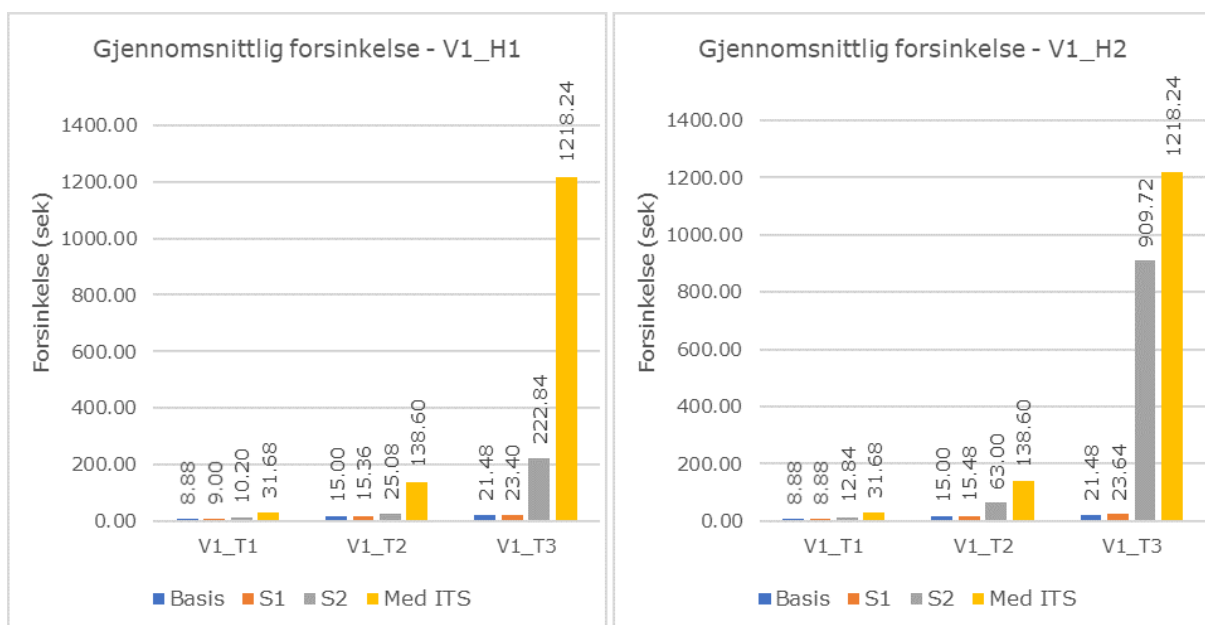




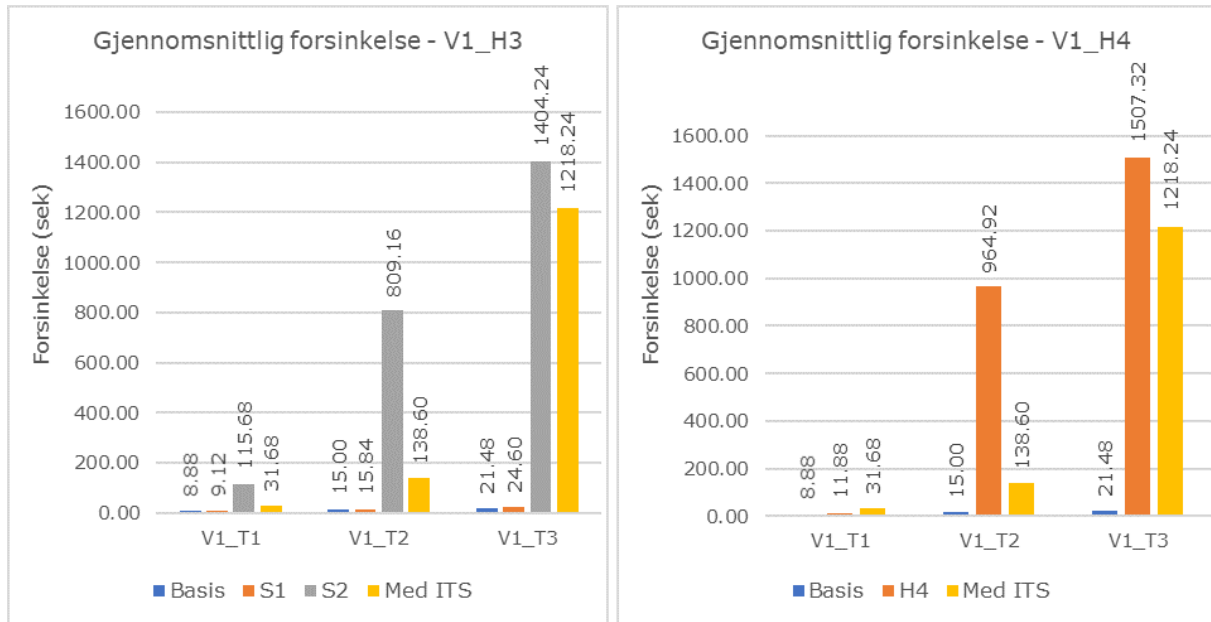
Figur 4.20 Gjennomsnittlig gjennomstrømning gjennom flaskehals under hendelse - V2\_H4

#### 4.2.2 Gjennomsnittlig forsinkelse

Den gjennomsnittlige forsinkelsen kjøretøyene opplever på strekningen ved de ulike scenarioene vil kunne si noe om kvaliteten på trafikkavviklingen på vegen. Lang forsinkelsestid kan påføre forbrukeren store tidskostnader, og det kan derfor være lite lønnsomt for samfunnet å bygge veger eller innføre tiltak som ved hendelse vil kunne påføre forbrukerne slike kostnader. Den gjennomsnittlige forsinkelsen per kjøretøy for varighet V1 for hhv. H1 + H2 og H3 + H4 er vist i Figur 4.21 og Figur 4.22.



Figur 4.21 Gjennomsnittlig forsinkelse - V1\_H1 og V1\_H2

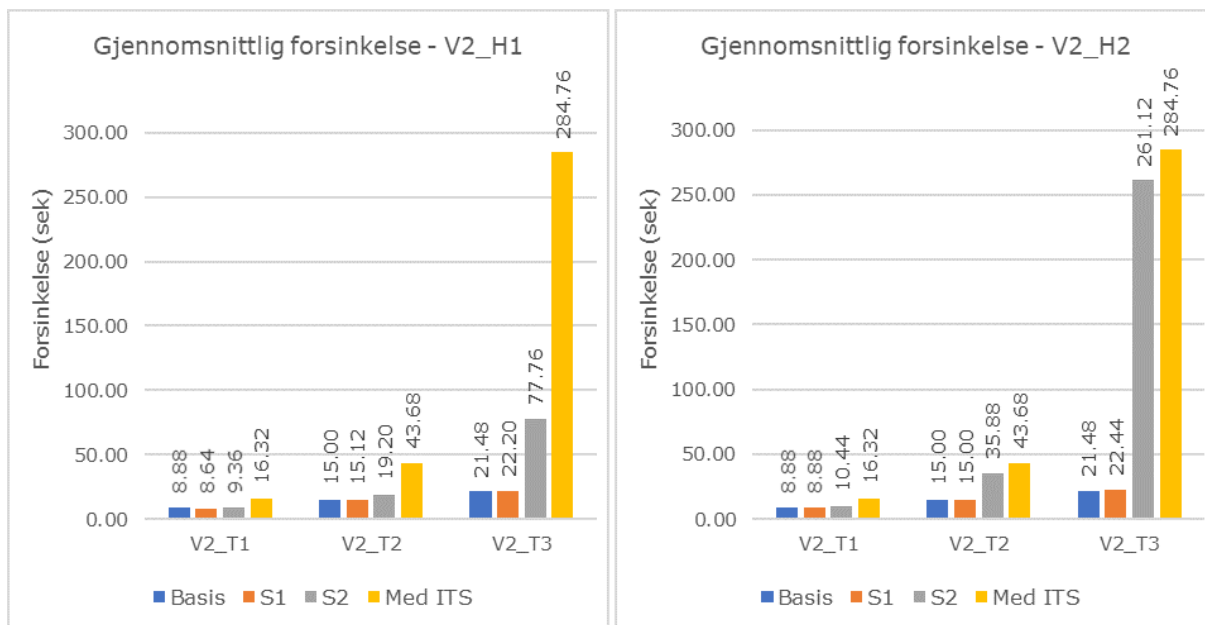


Figur 4.22 Gjennomsnittlig forsinkelse - V1\_H3 og V1\_H4

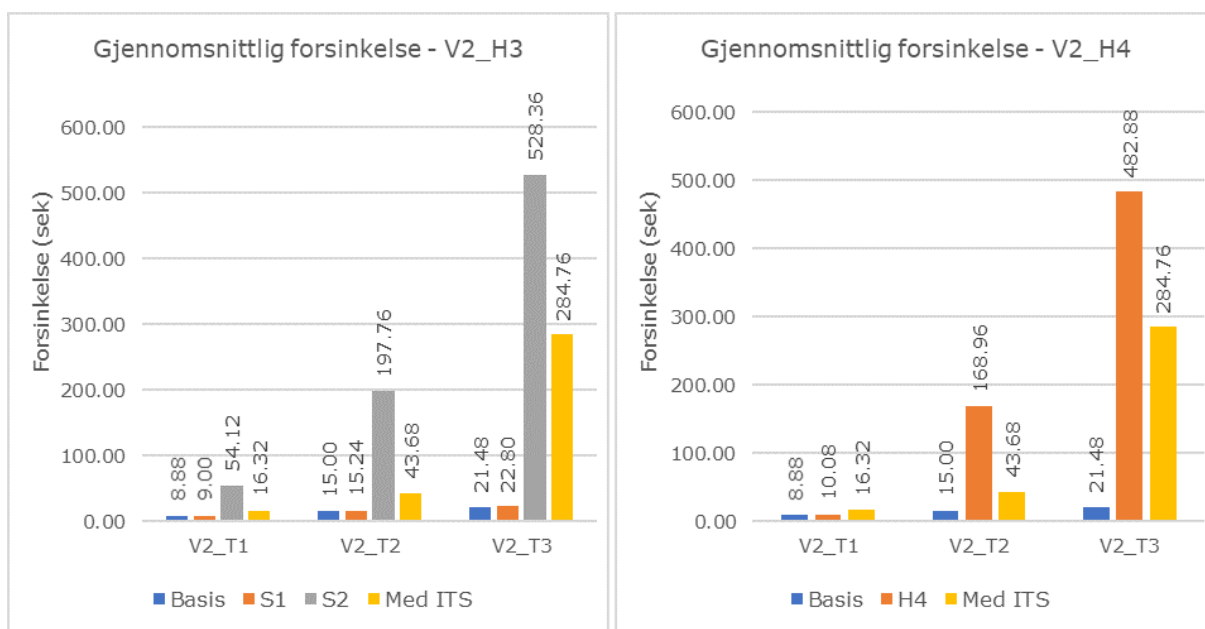
Simuleringene resulterer i at det ved hendelse H1-H3 kun er noen få sekunders forsinkelse per kjøretøy når man har skulderbredde som tilsvarer dagens standard (S1). Dette gjelder selv ved stor trafikketterstørrelse. Dersom man derimot planlegger for smal 4-felts motorveg med skulderbredde S2 kan hvert kjøretøy påføres en gjennomsnittlig forsinkelse på omtrent 20 minutter dersom det er mye trafikk på vegen, T3, og man har en hendelse tilsvarende H3. I tillegg opplever forbrukerne en nokså stor forskjell i forsinkelse mellom S1 og S2 ved både hendelse H1 og H2 når man har stor trafikketterstørrelse.

Man kan se fra figurene at dersom man skulle ha benyttet ITS-tiltak når man har en hendelse som H1 og vil dette føre til relativt store forsinkelser for kjøretøyene for alle de tre trafikketterstørrelsene i forhold til om man ikke bruker et slikt tiltak. Også ved H2 har man et par minutter ekstra forsinkelsestid dersom man har ITS-tiltak. Ved H3 derimot ser det ut til at man kan oppleve mindre forsinkelse ved å aktivere ITS-tiltaket. Når hele høyre kjørefelt er blokkert vil kjøretøyene bli påført en gjennomsnittlig forsinkelse på over 20 minutter uansett om man har skulderbredde S1 eller S2. I dette tilfellet ser det ut til at et ITS-tiltak vil redusere forsinkelsestiden noe.

Figur 4.23 og Figur 4.24 viser gjennomsnittlig forsinkelsestid for de samme hendelsene, men nå med varighet V2. Noe som er interessant med disse resultatene er at forskjellen mellom den gjennomsnittlige forsinkelsestiden ved V2\_S2\_H2 og V2\_ITS er relativt mindre enn ved den lange varigheten, V1. I tillegg ser det ut til at den gjennomsnittlige forsinkelsestiden ved V2\_S2\_H3 er nesten dobbelt så lang som når man benytter ITS-tiltak ved denne hendelsesvarigheten. En annen interessant observasjon fra disse figurene er at forsinkelsestiden når hendelsesvarigheten er 37 minutter (V2) når man har hendelse H4 uten ITS-tiltak og trafikketterstørrelse T2, er lengre enn forsinkelsestiden ved hendelsesvarighet på over 3 timer (V1) når man benytter ITS-tiltaket ved samme trafikketterstørrelse.



Figur 4.23 Gjennomsnittlig forsinkelse - V2\_H1 og V2\_H2



Figur 4.24 Gjennomsnittlig forsinkelse - V2\_H3 og V2\_H4

### 4.2.3 Kø

Maksimum kølengde for de scenarioene hvor denne er lenger enn 2 kjøretøy, samt tidspunkt køen ble oppløst og eventuelt gjenstående kølengde dersom denne ikke ble oppløst vises i Tabell 4.4 for varighet V1. Tabell 4.5 viser de samme dataene for varighet V2.

Tabell 4.4 Kødata ved varighet V1

Scenario	Maks kølengde (kjt)	Tidspunkt oppløst	Gjenstående kø (kjt) kl. 10:00
V1_H1_T1_S1	-	-	-
V1_H1_T1_S2	-	-	-
V1_H1_T2_S1	-	-	-
V1_H1_T2_S2	-	-	-
V1_H1_T3_S1	-	-	-
V1_H1_T3_S2	12.48	09:35	-
V1_H2_T1_S1	-	-	-
V1_H2_T1_S2	-	-	-
V1_H2_T2_S1	-	-	-
V1_H2_T2_S2	-	-	-
V1_H2_T3_S1	-	-	-
V1_H2_T3_S2	773.93	-	222.66
V1_H3_T1_S1	-	-	-
V1_H3_T1_S2	-	-	-
V1_H3_T2_S1	-	-	-
V1_H3_T2_S2	472.6	-	37.66
V1_H3_T3_S1	-	-	-
V1_H3_T3_S2	1480.69	-	1242.33
V1_H4_T1	-	-	-
V1_H4_T2	841.57	-	332.41
V1_H4_T3	1932.59	-	1717.46
V1_T1_ITS	-	-	-
V1_T2_ITS	95.43	09:35	-
V1_T3_ITS	1022.77	-	593.64

Ved hendelse H1 uten ITS-tiltak oppstår det kun kø dersom man har stor trafikketter-spørse (T3) og smal skulder (S2). Denne køen består av få kjøretøy og oppløses klokken 09:35. Dersom man derimot har ITS-tiltak ved denne hendelsen og trafikketter-spørse har man over 1000 kjøretøy som står i kø på et tidspunkt. Ved H2\_T3\_S2 uten ITS-tiltak har man en god del lengre kø enn ved H1, men også i dette tilfellet er både maksimum kø og gjenstående kø en god del mindre enn ved ITS-tiltak med samme trafikketter-spørse. Ved smal skulder og hendelse H3 uten ITS-tiltak har man lange køer både ved T2 og T3, og ingen av disse køene løses opp i løpet av simuleringsperioden. Dersom man derimot har ITS-tiltak ved denne hendelsen er maksimum kø mindre, og køen ved T2 løses opp klokken 09:35.

I tabellen kan man se at det oppstår lengst maksimum kø ved hendelse H4 og trafikk-  
 etterspørsel T3. I dette tilfellet står nesten 2000 kjøretøy i kø på et tidspunkt. Dersom man  
 hadde hatt ITS-tiltak ved denne hendelsen og trafikketterspørselen hadde denne køen  
 nesten vært halvert. I tillegg kan man se at man har nesten tre ganger så lang kø som  
 ikke er oppløst ved slutten av simuleringsperioden dersom man ikke bruker ITS-tiltaket i  
 dette tilfellet. Dersom man har mindre trafikketterspørsel ved denne hendelsen (H4\_T2)  
 har man også lang kø dersom man ikke har ITS-tiltak, samt lang gjenstående kø, mens  
 dersom man bruker ITS-tiltak i dette tilfellet er køen under 100 kjøretøy og den oppløses  
 klokken 09:35.

Tabell 4.5 Kødata ved varighet V2

Scenario	Maks kølengde (kjt)	Tidspunkt oppløst	Gjenstående kø (kjt) kl. 10:00
V2_H1_T1_S1	-	-	-
V2_H1_T1_S2	-	-	-
V2_H1_T2_S1	-	-	-
V2_H1_T2_S2	-	-	-
V2_H1_T3_S1	-	-	-
V2_H1_T3_S2	5.48	09:05	-
V2_H2_T1_S1	-	-	-
V2_H2_T1_S2	-	-	-
V2_H2_T2_S1	-	-	-
V2_H2_T2_S2	-	-	-
V2_H2_T3_S1	-	-	-
V2_H2_T3_S2	365.62	09:25	-
V2_H3_T1_S1	-	-	-
V2_H3_T1_S2	-	-	-
V2_H3_T2_S1	-	-	-
V2_H3_T2_S2	196.01	09:15	-
V2_H3_T3_S1	-	-	-
V2_H3_T3_S2	741.37	09:35	-
V2_H4_T1	-	-	-
V2_H4_T2	325.87	09:10	-
V2_H4_T3	910.53	09:35	-
V2_T1_ITS	-	-	-
V2_T2_ITS	38.2	09:00	-
V2_T3_ITS	506.5	09:25	-

I Tabell 4.5 ser man at køen løses opp før simuleringsperioden ender i alle scenarioene.  
 Ved hendelse H1 er det også ved V2 kun en liten kø når man har smal skulder og høy  
 trafikketterspørsel. Køen er oppløst under ett kvarter etter at hendelsen er over. Ved ITS-  
 tiltak i dette tilfellet varer køen i nesten 35 minutter, og er nesten 100 ganger lenger på  
 sitt meste. Ved H2\_T3\_S2 oppløses køen i sammen 5-minuttersintervall som ved ITS-  
 tiltaket ved T3, selv om den maksimale kølengden er en god del lengre ved ITS-tiltaket.

Ut fra resultatene om kødannelse kan man se at ved begge varigheter og H1-H3, altså når man ikke har blokkert hele kjørefeltet og skulderbredden dermed har en effekt på hvor mye kapasiteten er redusert, har man ingen kødannelse når man har skulderbredde som tilsvarer dagens standarder (S1). Dette er derimot ikke tilfelle ved smal skulder (S2), hvor det oppstår kø ved store og mellomstore trafikketerspørsler. ITS-tiltaket ved varighet V2 gir mindre kø enn dersom man ikke har slikt tiltak ved V2\_H3\_T2\_S2, V2\_H3\_T3\_S2, V2\_H4\_T2, V2\_H4\_T3. Køen løses opp raskere med ITS ved alle disse scenarioene, i tillegg til at den løses opp samtidig som V2\_H2\_T3\_S2.

## 4.3 Trafikksikkerhet

### 4.3.1 Antall stopp

Antall stopp vil som tidligere nevnt si noe om stopp-og-kjør sjokkbølger som oppstår på vegen. Det er i dette tilfellet valgt å se på det totale antallet stopp i løpet av simuleringsperioden for de ulike scenarioene. Antallet vil naturligvis være avhengig av antall kjøretøy som er en del av simuleringsperioden, og det er dermed kun hensiktsmessig å sammenligne scenarioer med samme trafikketerspørsel, T. Tabell 4.6 viser totalt antall stopp for de ulike scenarioene. For hver kombinasjon av varighet, hendelse og trafikketerspørsel (V#\_H#\_T#) er skulderbreddene, eller scenario med ITS, markert med mørkest farge dersom antall stopp er høyest og lysest farge dersom antall stopp er lavest.

Tabell 4.6 Totalt antall stopp

Varighet V1				Varighet V2			
Scenario	S1	S2	ITS	Scenario	S1	S2	ITS
V1_H1_T1	2.4	1.7	3.3	V2_H1_T1	1.7	1.9	3.2
V1_H1_T2	7.3	8.7	771.6	V2_H1_T2	7.3	8.2	253.9
V1_H1_T3	8.5	630.2	1130.4	V2_H1_T3	8.5	262.8	451.1
V1_H2_T1	1.6	2.3	3.3	V2_H2_T1	2.7	1.7	3.2
V1_H2_T2	5.6	28.2	771.6	V2_H2_T2	7.2	28.8	253.9
V1_H2_T3	10.3	760.4	1130.4	V2_H2_T3	12.7	404.9	451.1
V1_H3_T1	2.3	529.2	3.3	V2_H3_T1	2.3	225.2	3.2
V1_H3_T2	8	467.5	771.6	V2_H3_T2	6.6	389.2	253.9
V1_H3_T3	11.9	724.7	1130.4	V2_H3_T3	10.4	1373.5	451.1
V1_H4_T1	65.8		3.3	V2_H4_T1	30		3.2
V1_H4_T2	3520.4		771.6	V2_H4_T2	1362.6		253.9
V1_H4_T3	2695.5		1130.4	V2_H4_T3	2241.8		451.1

Ut fra tabellen kan man se at ved varighet V1 fører ITS-tiltaket stort sett til flere stopp enn scenarioene uten dette tiltaket for hendelse H1-H3. Dette vil stort sett skyldes behovet for feltskifte ved et stengt kjørefelt. Et unntak er ved V1\_H3\_T1 hvor man har langt flere stopp ved smal skulder, S2, enn man har ved ITS-tiltaket. Dette kan skyldes at hastigheten i høyre felt er satt så lavt ved denne hendelsen (4 km/t) at flere av kjøretøyene vil holde en hastighet som er under 3,6 km/t (1 m/s) og dermed regnes som stoppet. En annen forklaring kan være at forskjellen mellom hastigheter i høyre og venstre kjørefelt er så stor

at kjøretøyene stopper opp mer ved feltskifte for å unngå farlige feltskifter. Det er også mulig at forskjellen mellom hastighet før hendelsen og ved hendelsen er så stor at flere må deselerere svært fort, noe som kan skape ustabilitet i trafikken og dermed stopp. Det ser også ut til at det er flere stopp ved V1\_H3\_T1\_S2 enn det er ved V1\_H3\_T2\_S2, altså når trafikketterspørselen er større. Dette kan være fordi hastighetsforskjellen mellom venstre og høyre kjørefelt ikke er like stor ved T2, og det dermed blir enklere for kjøretøyene i simuleringen å skifte over til venstre kjørefelt.

Ved varighet V2 kan man se at man har flest stopp ved ITS-tiltaket for hendelsene H1 og H2. Ved H3 har man langt flere stopp ved skulderbredde S2 enn dersom man bruker ITS-tiltaket.

Dersom man har en hendelse av typen H4 fører dette til langt flere stopp enn ved ITS-tiltaket. Dette kan tenkes at skjer fordi det oppstår en høyere grad av samarbeid mellom kjøretøyene når de får varsel fra de variable skiltene om at de må skifte felt og senke hastigheten. Dette gjelder for både V1 og V2.

#### 4.3.2 Forsinkelse på grunn av stopp

Den gjennomsnittlige forsinkelsen på grunn av stopp vil kunne gi oss et bilde av hvor lenge kjøretøyene er definert som stoppet, og dermed hvor mye risikoen for sekundære hendelser øker på grunn av stopp på vegen ved hendelser. Disse tallene kan være nokså resultatene for antall stopp, ettersom kjøretøyene forblir lenger definert som stoppet når køen beveger seg sakte fremover ved noen scenarier. Tabell 4.7 viser gjennomsnittlig stopptid per kjøretøy, og altså det som i denne rapporten er definert som forsinkelse på grunn av stopp.

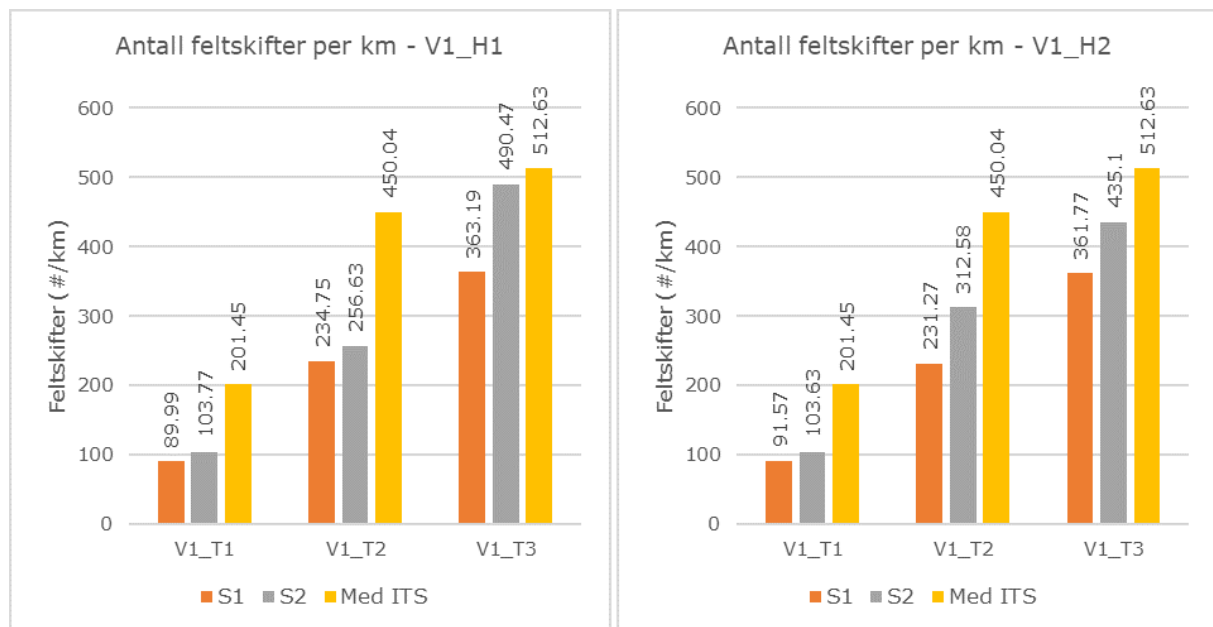
Tabell 4.7 Gjennomsnittlig stopptid per kjøretøy (sek)

Varighet V1				Varighet V2			
Scenario	S1	S2	ITS	Scenario	S1	S2	ITS
V1_H1_T1	0	0	0	V2_H1_T1	0	0	0
V1_H1_T2	0	0	3.84	V2_H1_T2	0	0	0.96
V1_H1_T3	0	0.48	10.08	V2_H1_T3	0	0.24	3.48
V1_H2_T1	0	0	0	V2_H2_T1	0	0	0
V1_H2_T2	0	0	3.84	V2_H2_T2	0	0.24	0.96
V1_H2_T3	0	2.88	10.08	V2_H2_T3	0	1.32	3.48
V1_H3_T1	0	106.56	0	V2_H3_T1	0	45.24	0
V1_H3_T2	0	135.84	3.84	V2_H3_T2	0	23.16	0.96
V1_H3_T3	0	447.36	10.08	V2_H3_T3	0	160.68	3.48
V1_H4_T1	0.36		0	V2_H4_T1	0.12		0
V1_H4_T2	517.44		3.84	V2_H4_T2	83.64		0.96
V1_H4_T3	624.36		10.08	V2_H4_T3	247.8		3.48

Som man ser fra tabellen vil flere av scenarioene resultere i at man har 0 sekunder gjennomsnittlig stopp per kjøretøy. Ved hendelse H1 og H2 påføres kjøretøyene mest forsinkelse på grunn av stopp når ITS-tiltaket tas i bruk for alle trafikketterspørslers og begge varighetene, men denne forsinkelsen er ikke veldig stor. Ved hendelse H3 er det derimot registrert mye lenger forsinkelsestid på grunn av stopp når man har smal skulder enn ved både S1 og når ITS-tiltaket benyttes. Dette antas å være på grunn av den kraftig reduserte hastigheten forbi hendelsen, da køen i dette tilfellet beveger seg så sakte at kjøretøyene er registrert som stoppet lenge. Ved hendelse H4 har man også mye lenger forsinkelsestid på grunn av stopp når man ikke har ITS-tiltak på vegen enn når dette benyttes.

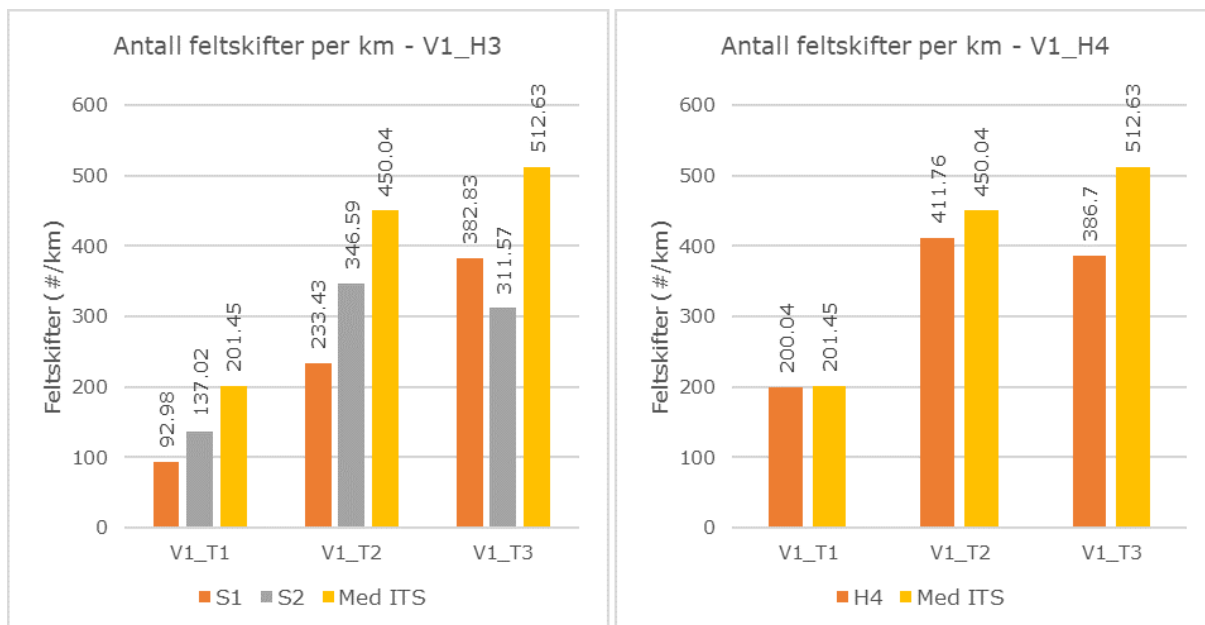
### 4.3.3 Antall feltskifter

Antall feltskifter per kilometer for V1\_H1 + V1\_H2 og V1\_H3 + V1\_H4 er vist i hhv. Figur 4.25 og Figur 4.26. Her er det tydelig at ITS-tiltaket bidrar til flere feltskifter enn dersom man ikke har dette tiltaket ved alle hendelser og trafikketterspørslers. I tillegg kan man se at ved hendelse H1 og H2 har man flere feltskifter ved smal skulder, S2, enn man har ved skulderbredde etter dagens standard, S1. Dette er naturlig ettersom en del av høyre kjørefelt er blokkert ved hendelse når man har S2, og det derfor vil være ønskelig for å kjøretøyene å skifte til et felt som ikke er fysisk blokkert. Ved H3\_T3 har man ikke samme effekten, ettersom trafikketterspørselen er så stor at det ikke er mer gunstig for kjøretøyene å skifte til venstre felt hvor det også er liten trafikkflyt.



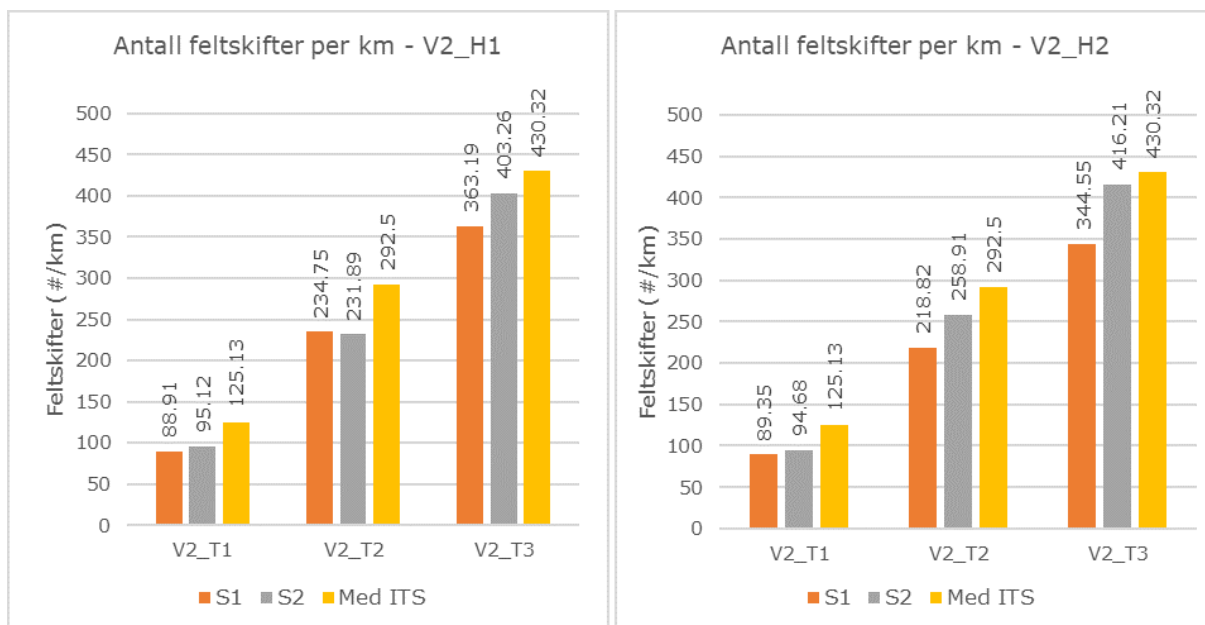
Figur 4.25 Antall feltskifter per km - V1\_H1 og V1\_H2



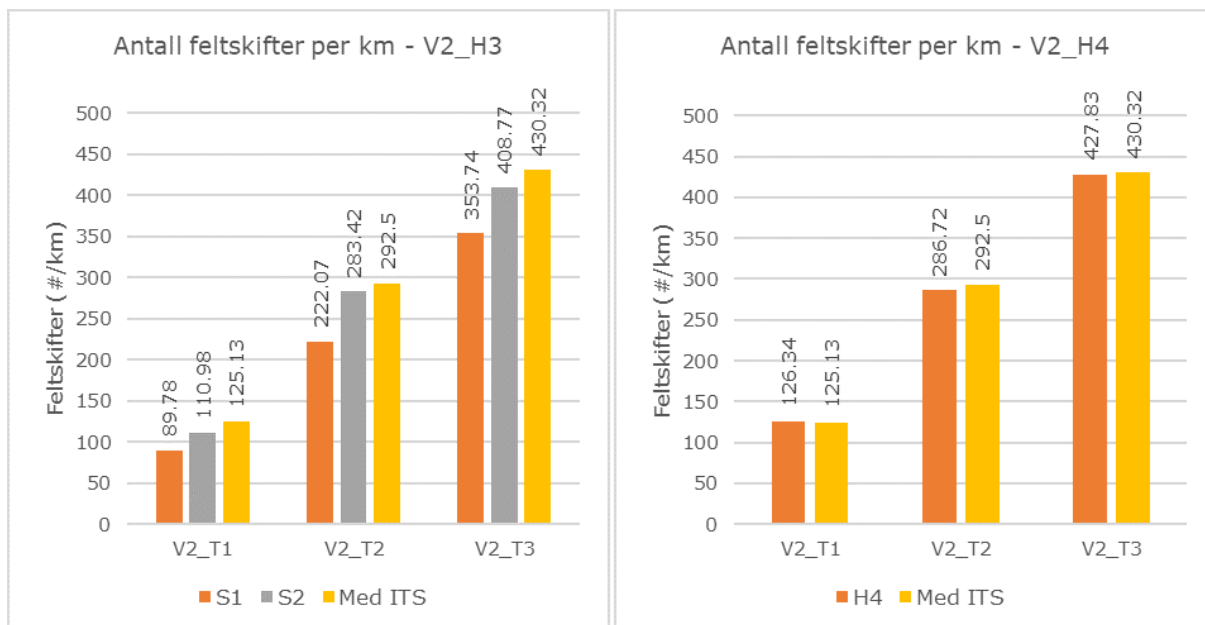


Figur 4.26 Antall feltskifter per km - V1\_H3 og V1\_H4

Ved varighet V2 kan man se at man har et jevnere antall feltskifter per km for alle hendelsestyper, Figur 4.27 og Figur 4.28. Dette er naturlig fordi hendelsen er kortere, og man har en større del av simuleringsperioden hvor det er en normal trafikksituasjon. Likevel er det verdt å merke seg at antall feltskifter også her er størst for ITS-tiltaket for H1-H3, og at hendelsene på smal skulder stort sett vil resultere i noen flere feltskifter enn ved skulderbredde S1. Det kan også være verdt å merke seg at ved hendelse H4 har man tilnærmet like mange feltskifter per kilometer med og uten ITS-tiltak.



Figur 4.27 Antall feltskifter per km - V2\_H1 og V2\_H2



Figur 4.28 Antall feltskifter per km - V2\_H3 og V2\_H4

# 5 Kapittel 5

---

## Diskusjon

### 5.1 Metode for modellering av hendelser

Som en del av oppgaven har det blitt gjort et forsøk på å utvikle en metode som gjør det mulig å analysere hendelser som er til hinder for trafikken i ulik grad. Metoden som foreslås baserer seg på mikrosimulering samt generelle teoretiske prinsipper og forsøk på å tilpasse disse til formålet. Forslaget knyttet til estimering av kapasitet er forenklet til å kun være avhengig av en *rubbernecking*-faktor og hvor stor den fysiske hindringen av kjøretøyene er. I virkeligheten vil kapasitetsreduksjonen ved en hendelse være avhengig av mange flere faktorer, og *rubbernecking*-faktoren er i tillegg svært vanskelig å måle da dette også vil være avhengig av den individuelle hendelsen og føreroppførselen. Kapasitetsreduksjonen ved hendelse kan for eksempel påvirkes av individuelle forskjeller mellom hvordan føreren tolker sikkerheten knyttet til å passere et stanset kjøretøy, eller hvor nysgjerrig føreren er på hva som er årsaken til ulykken eller hvem som er involvert. Det kan tenkes at *rubbernecking*-effekten øker dersom årsaken til hendelsen er spesiell, eller at kjøretøyet er av en spesiell type som man gjerne blir litt ekstra nysgjerrig.

Fordelingen av kjøretøytyper på vegen og den faktiske bredden av personbiler vil også ha en effekt på hvordan kapasiteten påvirkes ved hendelser som ikke fanges opp av denne metoden, da kun personbiler med dimensjonerende bredde oppgitt i vegnormalene tas i betraktning. Som tidligere nevnt kan det diskuteres om den dimensjonerende bredden av personbiler bør justeres opp på grunn av økningen i kjøretøysbredde som har blitt observert de senere årene. Dersom dette er tilfelle kan det tenkes at en hendelse har enda mer effekt på kapasiteten enn forespeilet her. Dersom et tungt kjøretøy med dimensjonerende bredde 2,6 m skulle ha passert hendelse H3\_S2, vil dette føre til at den gjenstående effektive bredden til venstre kjørefelt er så liten at det ikke er hensiktsmessig å kjøre to kjøretøy i bredden forbi ulykken. Kapasiteten vil dermed være ytterligere redusert ved høye andeler av tunge kjøretøy. Dersom det er et tungt kjøretøy som er stoppet ved hendelse H3\_S2, vil dette sannsynligvis medføre at hele høyre kjørefelt er stengt. Det kan tenkes at man kan modellere hendelser hvor bredere personbiler eller tunge kjøretøy er stoppet på skulder ved å bruke samme framgangsmåte for å finne gjenstående kapasitet på vegen når kjøretøyet har en annen dimensjonerende bredde. Effekten av tunge kjøretøy i trafikken ellers må trolig modelleres på en annen måte.

En annen faktor som kan påvirke kapasitetsberegningen kan være horisontalkurvaturen. Dersom hendelsen oppstår i en høyresving kan dette medføre at siktlinjen til kjøretøyene som kommer bakfra er hindret noe, og at de dermed blir tvunget til å senke hastigheten sin noe. Effekten denne siktreduksjonen har på kapasiteten er ikke tatt stilling til ved utviklingen av metoden for denne oppgaven, og det kan tenkes at dette er vanskelig å tallfeste ettersom det vil være individuelt hvor mye hver fører påvirkes av at de ikke vet hva som skjer rundt svingen når de passerer en ulykke.

Til tross for disse faktorene som også kan påvirke kapasitetsreduksjonen ved ulike hendelsestyper, er forslaget for estimering antatt å være nyttig for å kunne sammenligne hendelser på vegger med ulike skulderbredder på et generelt grunnlag. De andre faktorene som vil påvirke kapasitetsreduksjonen vil kunne være til stede både ved smal og bred skulder, og sier derfor mindre om effekten av kun skulderbredden.

Forslaget til hvordan kapasitetsreduksjonen kan implementeres i Aimsun baserer seg på et forsøk på å justere *speed-flow*-forholdet ved redusert kapasitet. Det er forsøkt å finne ut hvordan *speed-flow*-kurven ser ut i Aimsun ved trafikk som ikke er påvirket av kapasitetsreduksjon, for så å justere denne for ulike kapasitetsreduksjoner. Det kan diskuteres om *speed-flow*-forholdet man får i Aimsun ved normale forhold er korrekt i forhold til virkeligheten, men ettersom det er hvordan dette forholdet må justeres ved redusert kapasitet som er interessant så ansees det som mulig å anta at dette stemmer tilstrekkelig med det virkelige trafikkbildet på en motorveg. Justeringen av *speed-flow* kurvene er derimot mer usikker, og baserer seg blant annet på antakelsen om at forskjellen i hastighet mellom teorien presentert i HCM2000 og det som skjer i Aimsun er lik ved samme kapasitetsutnyttelse ved de ulike kapasitetsreduksjonene.

Det kan diskuteres om måten Aimsun praktiserer nedskrivning av fartsgrense på vil gi et korrekt bilde av hva som skjer ved en hendelse, spesielt i starten av den. Trafikk-simuleringer har en tendens til å unngå å skape ustabilitet i trafikken så langt det lar seg gjøre, selv om førerne i virkeligheten gjerne ville ha reagert plutselig og uforutsigbart på en hendelse og dermed skapt ustabilitet ved å plutselig skifte kjørefelt eller bremse ned veldig brått. Når man skal simulere bruken av ITS-tiltaket på vegen kan det ha en betydning for resultatene at kjøretøy som allerede har passert det variable skiltet som gir fartsgrenseendring før endringen skjer også endrer sin hastighet.

Det er i rapporten funnet en måte å estimere kapasiteten og hastigheten i kjørefeltene hver for seg, men det er ikke vurdert hvordan hastigheten i et kjørefelt påvirker hastigheten i det andre. Det kan diskuteres om man burde ha estimert kapasitetsreduksjon for hele vegen, og ikke tenkt på det som to forskjellige kapasiteter, og fordelt den gjenstående kapasiteten likt mellom de to kjørefeltene. Dette kunne ha ført til at man fikk en situasjon der kjøretøyene samarbeidet mer og praktiserte fletting.

## 5.2 Trafikkavvikling

### 5.2.1 Effekten av skulderbredde

Resultatene viser forskjeller i ytelsesparameterne knyttet til trafikkavvikling for de ulike skulderbreddene. En visualisering av hvordan smal skulder, S2, yter i forhold til bred skulder, S1, med tanke på disse er vist i Tabell 5.1. Dersom resultatet for S2 avviker fra S1 mindre enn avviksterskelen vises en gul strek, og hvis det avviker mer vises pil opp eller ned. Rød pil betyr at smal skulder påvirker trafikkavviklingsparameteren negativt, mens grønn pil betyr at smal skulder påvirker den positivt. Pilen peker opp dersom verdien av parameteren ved S2 er høyere enn ved S1, og ned hvis den er lavere.

Tabell 5.1 Trafikkavvikling ved S2 sammenlignet med S1

S2 sammenlignet med S1										
		H1			H2			H3		
	Avviksterskel	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Varighet V1</b>										
Gjennomstrømning	50 kjt/t	—	—	↓	—	—	↓	—	↓	↓
Forsinkelse	20 sek	—	—	↑	—	↑	↑	↑	↑	↑
Kølengde	20 kjt	—	—	↑	—	—	↑	—	↑	↑
<b>Varighet V2</b>										
Gjennomstrømning	50 kjt/t	—	—	↓	—	↓	↓	↓	↓	↓
Forsinkelse	20 sek	—	—	↑	—	↑	↑	↑	↑	↑
Kølengde	20 kjt	—	—	—	—	—	↑	—	↑	↑

Som man ser fra Tabell 5.1 har skulderbredden liten effekt på den gjennomsnittlige gjennomstrømningen ved den minste trafikketterspørselen, T1, med unntak av når hendelse H3 inntreffer i midten av simuleringsperioden slik som ved V2. Dette kan skyldes at man får et kortvarig men kraftig fall i gjennomstrømningen når hendelsen inntreffer, slik man kunne se i tidsseriene i resultatene. Ved den høyeste trafikketterspørselen har smalere skulder en negativ effekt på gjennomstrømningen ved alle de tre hendelsestypene, ettersom kapasiteten ved disse hendelsene begrenses mye mer når skulderen er smal enn når den er etter dagens standarder. Generelt kan man altså si at simuleringene viser at en smalere skulder påvirker gjennomstrømningen ved hendelser lite eller negativt avhengig av hvor stor trafikketterspørselen er og hvor langt kjøretøyet står fra vegkanten. Dette stemmer med det man forventer at skal skje, ettersom man har mindre plass til å stoppe et kjøretøy på og trafikken vil være mer hindret ved stopp på smalere skulder. Jo mindre trafikketterspørselen er, jo mindre effekt har hendelsen på gjennomstrømningen fordi jo

mindre trafikk tettheten er jo mindre effekt har forstyrrelser som reduksjon av hastighet eller feltskifter på stabiliteten i trafikkflyten (Tang *et al.*, 2008).

Når gjennomstrømningen begrenses slik den gjør i flere av tilfellene med smal skulder, vil dette gjøre at tiden det tar for trafikken å avvikles forbi hendelsen øker. Av den grunn fører alle situasjonene der man har redusert gjennomstrømning også til økt forsinkelsestid. I tillegg har man økt forsinkelsestid ved V1\_H2\_T2 og V1\_H3\_T1, selv om det ikke har vist seg å være betydelige forskjeller i gjennomstrømningen ved disse scenarioene. Dette kan tenkes å skyldes at man i utgangspunktet har stor nok kapasitet på vegen, men at noen av kjøretøyene som velger å bli i høyre kjørefelt forbi hendelsen har en betydelig reduksjon i hastighet.

Når man har smal skulder og kjøretøyet står 20 cm fra vegkanten, og man har trafikk- etterspørsel T3 og varighet V1, påføres hvert kjøretøy i snitt nesten 4 minutters forsinkelse. Når man har ytre rekkverk som gjør at kjøretøyet ikke kan stå så langt ut mot kanten nesten firedobles denne forsinkelsestiden til 15 minutters forsinkelse per kjøretøy. Når man har bred skulder ved disse to hendelsestypene, er det snakk om kun 24 sekunders gjennomsnittlig forsinkelsestid per kjøretøy. Selv når hendelsene er korte påføres det en god del forsinkelse for kjøretøyene når man har smal skulder. I en situasjon der kjøretøyet ikke har klart å manøvrere seg nærmere skulderkanten enn 80 cm, og står der i 37 minutter, påføres hvert kjøretøy nesten 9 minutters forsinkelse ved den største trafikk- etterspørselen. Dette medfører en dobling av reisetiden på en 12-km-strekning, dersom man antar at det kan holdes 110 km/t over hele strekningen, noe som kan oppfattes som en betydelig kostnad for trafikantene.

Resultatene fra simuleringene viser at ved bred skulder, S1, fører ingen av hendelsene til at det oppstår kø på vegen lengre enn to kjøretøy, heller ikke med stor trafikk etterspørsel. Når man har smal skulder og stor etterspørsel får man derimot lange køer i flere tilfeller både når hendelsene varer hele simuleringsperioden og når den varer i 37 minutter. I det «verste» tilfellet står nesten 1500 kjøretøy i kø på strekningen. Dersom man for eksempel antar at avstanden mellom kjøretøyene i kø er 2 meter og at kjøretøyene i snitt er 4,5 meter, slik som det er lagt inn i Aimsun, betyr dette at køen på sitt meste strekker seg nesten 5 km bak hendelsen dersom køen er jevnt fordelt mellom de to kjørefeltene. Dersom man hadde hatt påkjøringsramper, noe man i realiteten vil ha på en så lang strekning, ville det også skapt problemer for flere av vegene som har påkjøring til motorvegen og problemet kan forplante seg gjennom store deler av vegnettet.

Smalere skulderbredde vil altså redusere kvaliteten på trafikkavviklingen kraftig når trafikk etterspørselen er stor, basert på de valgte ytelsesparameterne, mens de hendelsene som det sees på har liten effekt på trafikkavviklingen ved skulder etter dagens standarder. Dette er naturlig ettersom en skulderbredde på 2,75 meter vil kunne ha plass til hele kjøretøyet pluss klaringsavstand for kjøretøyene i det tilstøtende kjørefeltet både når vegen har ytre rekkverk og ikke. Selv når man trenger ekstra plass på passasjersiden tyder simuleringene på at den negative effekten på trafikkavviklingen er liten når motorvegen har skulderbredde etter dagens standard.

## 5.2.2 Effekten av ITS-tiltak

Dersom man antar at den tidligere omtalte statistikken fra Nederland, som sier at 11 kjøretøy til enhver tid er stoppet i hver retning av en motorvegstrekning på 100 km, kan sammenlignes med situasjonen i Norge, kan man si at man statistisk sett har minst ett kjøretøy stoppet hele tiden på 12-km-strekningen. Det er derfor viktig å være sikker på at et ITS-tiltak ikke forulemper trafikantene og reduserer kvaliteten på trafikkavviklingen i nevneverdig grad dersom et slikt tiltak skal kunne erstatte en bred skulder med god plass til nødstoppede kjøretøy. Forskjellene knyttet til trafikkavvikling mellom ITS-tiltaket og hendelser på vegen med smal skulderbredde uten et slikt tiltak er framstilt i Tabell 5.2, på samme måte som i Tabell 5.1.

Tabell 5.2 Trafikkavvikling ved ITS-tiltak sammenlignet med S2

ITS-tiltak sammenlignet med S2													
		H1			H2			H3			H4		
	Avviks- terskel	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Varighet V1</b>													
Gjennom- strømning	50 kjt/t	▬	↓	↓	▬	↓	↓	▬	↑	↑	▬	↑	↑
Forsinkelse	20 sek	↑	↑	↑	▬	↑	↑	↓	↓	↓	▬	↓	↓
Kølengde	20 kjt	▬	↑	↑	▬	↑	↑	▬	↓	↓	▬	↓	↓
<b>Varighet V2</b>													
Gjennom- strømning	50 kjt/t	▬	↓	↓	▬	▬	↓	▬	↑	↑	▬	↑	↑
Forsinkelse	20 sek	▬	↑	↑	▬	▬	↑	↓	↓	↓	▬	↓	↓
Kølengde	20 kjt	▬	↑	↑	▬	↑	↑	▬	↓	↓	▬	↓	↓

Fra simuleringene kan det se ut til at effekten av ITS-tiltaket på gjennomstrømningen er tilnærmet ubetydelig når man har lav trafikketterspørsel, T1. Når trafikketterspørselen er høyere har ITS-tiltaket derimot både positiv og negativ innvirkning på gjennomstrømningen, avhengig av typen hendelse. Resultatene viser at ITS-tiltaket stort sett har en negativ effekt på gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen ved hendelse H1 og H2 og trafikketterspørsel T2 og T3 i forhold til når man ikke har et slikt tiltak på en veg med smal skulderbredde. Når man trenger mer plass på passasjersiden, eller ikke har klart å manøvrere kjøretøyet langt nok ut på skulder, slik som ved H3, er gjennomstrømningen derimot lavere uten tiltaket. Når en hendelse blokkerer hele høyre kjørefelt ser det ut til at bruk av ITS-tiltaket kan bidra til at gjennomstrømningen gjennom flaskehalsen holdes høyere enn dersom man ikke bruker et slikt tiltak. Dette kan tenkes at skjer fordi førerne får beskjed i god i tid om at de må skifte felt ved ITS-tiltaket og dermed kan gjøre dette mer effektivt og med høyere grad av samarbeid enn når de ikke ser at de må skifte felt før de kommer frem til hendelsen. I tillegg er det som tidligere nevnt antatt at man unngår

*rubbernecking*-effekten når man varsler om en hendelse i god tid, og dermed senkes ikke hastigheten og kapasiteten like mye når man har ITS-tiltak ved denne hendelsen.

Som nevnt i resultatdelen kan man fra tidsseriene se at når hendelsen oppstår i midten av simuleringsperioden får man et plutselig fall i gjennomstrømning i starten av hendelsen når man ikke har ITS-tiltak. Dette kan skyldes at kjøretøyene plutselig må justere hastigheten for å passere det stoppede kjøretøyet på en trygg måte. Dette igjen fører til at noen av dem sannsynligvis deselerer så fort at trafikkflyten blir ustabil, noe som skaper sjokkbølger for de følgende kjøretøyene, og dermed reduseres også gjennomstrømningen. Når ITS-tiltaket er aktivert ser man ikke se like stort utslag av denne effekten. Denne positive effekten som ITS-tiltaket vil dog være avhengig hvor fort man klarer å oppdage hendelsen og iverksette tiltaket. Som man har sett fra litteraturen kan det tenkes at minste mulige gjennomsnittlige deteksjonstid for hendelser per i dag er rundt 2,5 minutter. I perioden før man har fått iverksatt tiltaket vil man dermed også få et slikt fall i gjennomstrømningen når hendelsen inntreffer, og effekten av dette er spesielt utslagsgivende ved store trafikkmengder.

Den gjennomsnittlige forsinkelsestiden per kjøretøy reduseres ved bruk av ITS-tiltaket både når man har smal skulder og hendelse H3 og når hele kjørefeltet er blokkert som ved H4. Dette kan skyldes at man ikke har en like saktegående kø gjennom flaskehalsen fordi man opprettholder en viss stabilitet i trafikkflyten ved å varsle tidlig og redusere hastigheten kontrollert. Når man har mindre «alvorlige» hendelser som H1 og H2 derimot så øker ITS-tiltaket forsinkelsestiden per kjøretøy med ganske mange minutter ved de største trafikkettersspørselene. Det kan diskuteres om det er viktigere å ta stilling til hva ITS-tiltaket gjør med forsinkelsestiden ved hendelser som H1 og H2, ettersom det kan tenkes at disse forekommer mer hyppig.

ITS-tiltaket har også en positiv innvirkning på kølengdene som oppstår ved hendelsene H3 og H4 ved trafikkettersspørsel T2 og T3, og maksimal kø kan reduseres med flere hundre kjøretøy. Når trafikkettersspørselen er mindre enn dette er effekten av tiltaket på kølengde minimal. Når hendelse H1 og H2 forekommer kan det se ut til at ITS-tiltaket er såpass drastisk i forhold til hendelsens alvorlighetsgrad at det dannes en god del mer kø enn det man får dersom man lar trafikken gå sin gang forbi hendelsen. Som man så fra resultatene oppløses køen samtidig med og uten ITS-tiltak når man har hendelse H2 og trafikkettersspørsel T3, selv om kølengden er lenger ved ITS-tiltaket. Dette kan tyde på at ITS-tiltaket kan ha en fordel når det kommer til gjenoppbygging av trafikkflyten, og dermed den totale varigheten av hendelsen på vegen inkludert gjenoppbyggingsfasen.

Dersom man skal diskutere om ITS-tiltak kan brukes til det formålet som er foreslått av Vegdirektoratet, altså som avbøtende tiltak ved negative konsekvenser av smal skulderbredde på motorveg med ÅTD mindre enn 12 000, kan det tenkes at det er trafikkettersspørsel T1 som er mest relevant. Selv i de travleste periodene i løpet av et år vil man sannsynligvis ikke oppnå mer trafikk enn dette på en slik veg. ITS-tiltaket gir en kapasitet som er en god del større enn den største delen av trafikkettersspørsel T1, og vil dermed begrense gjennomstrømningen minimalt. Ettersom hastigheten forbi fartsgrensen forbi hendelsen senkes til 70 km/t, får man allikevel noe mer forsinkelse ved ITS tiltaket enn ved hendelsene H1 og H2 men dette er kun snakk om rett over 20 sekunder for V1 og rundt 6 sekunder for V2, altså en svært liten ekstra forsinkelse per kjøretøy. Ved hendelse



H3 og trafikketterspørsel T1 påføres kjøretøyene en god del mer forsinkelse når man har smal skulder og ikke ITS-tiltak. Det oppstår ikke kø for noen av hendelsene eller ITS-tiltaket når trafikketterspørselen er T1.

Det ser altså ikke ut til at ITS-tiltaket bedrer trafikkavviklingen noe særlig ved lave trafikketterspørsler, men tiltaket gjør stort sett ikke situasjonen verre heller. Videre må det vurderes om effektene et slikt tiltak har på sikkerhet mot sekundære hendelser taler for ITS-tiltaket. Dersom man også ser at effekten på trafiksikkerhet ved hendelser er liten, må det vurderes om et slikt tiltak svarer seg med tanke på de kostandene det medfører.

## 5.3 Trafikksikkerhet

### 5.3.1 Effekten av skulderbredde

Tabell 5.3 viser sikkerhetseffekten av smal skulderbredde sammenlignet med skulderbredde etter dagens standarder, beskrevet av ytelsesparameterne knyttet til trafikksikkerhet ved hendelser.

Tabell 5.3 Trafikksikkerhet ved S2 sammenlignet med S1

S2 sammenlignet med S1										
		H1			H2			H3		
Avviksterskel		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Varighet V1</b>										
Antall stopp	20									
Stoptid	20 sek									
Feltskifter	20 kjt									
<b>Varighet V2</b>										
Antall stopp	20									
Stoptid	20 sek									
Feltskifter	20 kjt									

Ut fra simuleringene ser det ut til at en skulderbredde på 1,5 meter fører stort sett til flere stopp på vegen enn en skulderbredde på 2,75 meter ved samme hendelsestype og trafikk-etterspørsel. Unntakene er når man har lav trafikketterspørsel ved hendelse H1 og H2. Det økte antallet stopp kan tilskrives at kapasiteten reduseres mer ved smal skulder, ettersom kjøretøyet blokkerer mer av kjørebanelen. Forskjellen mellom hastighet før hendelsen og forbi hendelsen blir dermed større, noe som gjør at kjøretøyene har behov for å deselerere raskere. Dette kan føre til ustabilitet i trafikken og dermed at man får stopp-og-kjør sjokkbølger. Som nevnt i det teoretiske grunnlaget vil en slik turbulens i trafikken øke faren for sekundære ulykker.

En annen grunn til at hendelsene fører til flere stopp ved smal skulder kan være at den relative hastighetsdifferansen mellom kjøretøyene er større når et kjøretøy hindrer trafikkflyten noe i et kjørefelt. Jo større hastighetsdifferansen er mellom kjørefeltene, jo mer ønskelig er det for føreren i det saktegående feltet å skifte kjørefelt. Det kan også fremstå som nødvendig når man passerer hendelsen. Når føreren har et sterkt ønske om å skifte kjørefelt men trafikkvolumet i målfeltet er høyt vil det forsøkes å lete etter trygge luker

bakover i strømmen av kjøretøy i motsatt felt, og føreren kan måtte bremse opp og til og med stoppe helt for å gjøre det mulig å skifte kjørefelt (Aimsun, 2020).

Jo lenger kjøretøy er stoppet på vegen, jo større sjanse er det for sekundære kollisjoner. Simuleringene tyder på at hendelser hvor kjøretøyet står 0,2 til 0,5 meter fra vegkanten ved smal skulder, ikke medfører nevneverdig lenger stopptid på vegen enn når man har bredere skulder og samme hendelse. For den største trafikkmengden og den mest hindrende hendelsen (utenom full blokkering hvor skulderbredde er vurdert til å ikke ha betydning) har skulderbredden derimot en betydelig effekt på denne parameteren. For-sinkelsestiden på grunn av stopp er i dette tilfellet over 8 minutter per kjøretøy når man har smal skulder, mens den er 0 når man har bred skulder. Som tidligere nevnt kan dette skyldes at hastigheten forbi hendelsen er estimert til å være svært lav og dermed defineres kjøretøyene som stoppet selv om de faktisk beveger seg framover. Når en kø beveger seg så sakte, vil det også være en økt sannsynlighet for kollisjon og fare for mer alvorlige ulykker dersom kjøretøyene bak kommer i en hastighet opp mot fartsgrensen og ikke er klar over at de kommer til å møte på bakenden av en kø.

Ved hendelse på en veg med smal skulder ser det ut til at det vil forekomme flere feltskifter per kilometer enn ved bredere skulder for de fleste hendelse-trafikketerspørsel kombinasjoner. Unntak fra dette er hendelse H1 og H2 med lav trafikketerspørsel, og når man har mye trafikk og H3 med varighet V1. Grunnen til at man stort sett har flere feltskifter ved smalere skulder kan være at når kapasiteten i kjørefeltet nærmest hendelsen er lavere, vil det være mer ønskelig for kjøretøyene i det kjørefeltet å skifte til et kjørefelt hvor hastigheten er høyere og fremkommeligheten er bedre. Ved hendelse V1\_H3\_T3 viser det seg at det foretas flere feltskifter ved bred skulder. Grunnen kan være at vegen er så mettet og hastighetene så lave i begge kjørefelt ved smal skulder at det verken er ønskelig eller mulig å skifte kjørefelt.

Det kan diskuteres om antall feltskifter vil si så mye om trafikksikkerheten i seg selv, ettersom risikoen forbundet med å skifte felt vil øke med økt hastighetsdifferanse. Etter-som det er den smale skulderen som fører til de største hastighetsdifferansene, kan man si at det økte antallet feltskifter sammen med den økte hastighetsdifferansen når skulder-bredden er redusert vil tilsa at risikoen for sekundære hendelser er større.

Ytelsesparameterne knyttet til trafikkavvikling som ble diskutert tidligere viste at trafikkavviklingen generelt ble dårligere ved hendelser på smal skulder, og man bør trolig også ta dette i betraktning når man vurderer risikoen for sekundære hendelser. Spesielt kø på vegen har i litteraturen blitt trukket frem som en viktig bidragsyter til økt risiko for slike hendelser, og når man får så lange køer som man får i noen tilfeller med høy trafikketerspørsel kan man si at man får betraktelig redusert trafikksikkerhet på vegen.

Som man så i kapittel 2.2.3 er det funnet at andelen sekundære ulykker som fører til alvorlig skade eller død er nesten dobbelt så stor som andelen primære ulykker som fører til det samme. Det er derfor svært viktig å begrense risikoen for sekundære ulykker. Med mindre man kan garantere at man har lav trafikketerspørsel og kun hendelser som H1 og H2 på vegen, vil risikoen for slike ulykker øke dersom man reduserer skulderbredden til 1,5 meter. Dette vil være i strid med målet om null døde eller hardt skadde i trafikken.

### 5.3.2 Effekten av ITS-tiltak

Effekten ITS-tiltaket har på trafikksikkerheten ved hendelser sammenlignet med dersom man har smal skulderbredde uten et slikt tiltak er oppsummert i Tabell 5.4.

Tabell 5.4 Trafikksikkerhet ved ITS-tiltak sammenlignet med S2

ITS-tiltak sammenlignet med S2													
		H1			H2			H3			H4		
	Avviks- terskel	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Varighet V1</b>													
Antall stopp	20	—	↑	↑	—	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓
Stoptid	20 sek	—	—	—	—	—	—	↓	↓	↓	—	↓	↓
Feltskifter	20 kjt	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	—	↑	↑
<b>Varighet V2</b>													
Antall stopp	20	—	↑	↑	—	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Stoptid	20 sek	—	—	—	—	—	—	↓	↓	↓	—	↓	↓
Feltskifter	20 kjt	↑	↑	↑	↑	↑	—	—	—	↑	—	—	—

Antall stopp som skjer på vegen når man bruker ITS-tiltaket ved de ulike hendelsene ser ut til å være flere når man har nødstopp hvor føreren har klart å plassere seg så langt ut mot rekkverket eller grøften som mulig (H1 og H2) og trafikketterspørselen er medium eller stor (T2 og T3). Dette skjer fordi man har stengt av hele kjørefeltet nærmest ulykken, og alle kjøretøyene i høyre kjørefelt vil måtte skifte felt innen hendelsesseksjonen. Dette vil føre til at flere kjøretøy må stoppe helt opp før de kan skifte felt eller at kjøretøyene står i en stopp-og-kjør-kø på grunn av for liten kapasitet forbi hendelsen. Det kan også tenkes at noe av effekten skyldes at når man har et definert punkt der det må skiftes felt, som ved ITS-tiltaket, og dette er en situasjon som kjøretøyene i begge felt er klar over, vil det oppstå mer samarbeid mellom kjøretøyene for å få dette til. Noen av kjøretøyene i venstre kjørefelt vil derfor også stoppe opp for å slippe inn de som må skifte felt. Dette vil naturligvis avhenge av trafikketterspørselen på vegen, og når det er lite trafikk vil det ikke være like vanskelig å skifte kjørefelt for de som ligger til høyre, i tillegg til at mindre kø bygger seg opp.

Når hendelsen har en kortere varighet, V2, viser simuleringene mange flere stopp ved hendelse H3 med smal skulderbredde enn når man bruke ITS-tiltaket, mens når den samme hendelsestypen varer lengre er det ITS-tiltaket som gir flest stopp. Det kan tenkes at dette skyldes at det skapes mer ustabil trafikkflyt når hendelsen inntreffer mens det er mye trafikk, og flere kjøretøy må stoppe helt opp på grunn av denne ustabiliteten. Når ITS brukes til å regulere trafikken ser det ut til at denne effekten reduseres.

Når et kjørefelt er helt blokkert av et stoppet kjøretøy, slik som ved H4, viser det seg at det er langt flere stopp når man ikke tar i bruk ITS-tiltaket. Det kan tenkes at dette kan skyldes at kjøretøyene blir obs på at de må skifte felt tidligere, og dermed kan senke farten mer skånsomt og ikke påføre ustabilitet til trafikken bak, samt at de kan planlegge at de skal skifte felt tidligere og dermed ha større sannsynlighet for å unngå å måtte stoppe helt opp. I tillegg kan det skyldes en større grad av samarbeid mellom kjøretøyene når de får beskjed om å skifte felt fra de variable skiltene.

ITS-tiltaket ser ut til å minimal effekt på forsinkelsestiden på grunn av stopp når kjøretøyene har plassert seg så langt ut mot vegkanten som mulig, slik som ved H1 og H2. Når man har mer hindring av kjøretøyene, slik som ved H3\_S2 og H4, er kjøretøyene derimot stoppet mye lengre og et ITS-tiltak vil da bøte noe på de negative konsekvensene som stopptiden medfører, spesielt ved medium og stor trafikketterspørsel.

Det kan se ut til at kjøretøyene som oftest må skifte felt flere ganger per km når man bruker ITS-tiltaket ved hendelser, enn dersom man ikke gjør det. Det antas at feltskifte medfører en viss risiko for kollisjon uansett, men når hastigheten er mindre vil konsekvensen av kollisjon være mindre. Ved ITS-tiltaket senkes hastigheten til kjøretøyene til 80 km/t og så 70 km/t før hendelsen, altså der feltskiftene stort sett forekommer, mens kjøretøyene uten ITS-tiltak stort sett vil holde en høyere hastighet før det har bygget seg opp kø, ettersom fartsgrensen fortsatt er 110 km/t. Selv om antall feltskifter er flere ved ITS-tiltaket kan det altså tenkes at risikoen for kollisjon per feltskifte er mindre ved et slikt tiltak, og det kan dermed diskuteres om ITS-tiltaket i realiteten ikke medfører mindre sikkerhet mot sekundære hendelser når man ser på denne ytelsesparameteren.

I tillegg til de valgte ytelsesparameterne kan det diskuteres om det faktum at man ikke har kjøretøy i høyre kjørefelt, og at man har antatt høyere hastighet forbi hendelsen i flere av tilfellene uten tiltak enn den som settes av de variable skiltene, gjør at risikoen for sekundær kollisjon i kjede med det stoppede kjøretøy er betraktelig redusert når man tar i bruk det aktuelle ITS-tiltaket. Stor trafikkmengde øker sannsynligheten for ulykke og høy hastighet øker konsekvensen av ulykken (Statens Vegvesen, 2019c). Tiltaket gjør det dermed tryggere for de involverte i hendelsen, samt at det trygger og gjør arbeidet enklere for bilbergere, helsepersonell, politi eller andre som assisterer det involverte kjøretøyet. Når arbeidsforholdene for de som skal klarere vegen etter ulykken er tryggere og enklere vil det også kunne redusere varigheten på hendelsen, og som nevnt tidligere vil varigheten til hendelsen ha en direkte innvirkning på risikoen for sekundære hendelser.

Ettersom det er omtales i litteraturen at *rubbernecking*-effekten kan reduseres når førerne får varsel om hendelsen i god tid før de passerer den, kan det tenkes at dette også medfører en viss reduksjon av risikoen for sekundære hendelser. Førerne er mindre distraherede og opptatt av å se hva som har skjedd, og kan dermed reagere raskere på handlinger hos kjøretøyet foran. Dette kan også bidra til å opprettholde stabilitet i trafikkflyten, noe som har vist seg å ha en positiv effekt på risikoen for sekundære hendelser.

En av de negative effektene man har sett at ITS-tiltaket medfører er at det i noen tilfeller dannes lange køer på vegen. I den forbindelse kan det diskuteres om tiltaket også bør suppleres med automatisk køvarsling for kjøretøyene som nærmer seg enden av køen slik at de kan redusere hastigheten sin før de entrer området med kø. Dette kan redusere

risikoen for at ulykker forekommer ved inngangen til en saktegående kø, og en eventuell kollisjon med køenden vil være mindre alvorlig.

I analysen er det antatt at den automatiske hendelsesgjenkjenningen er «perfekt», altså at tiltaket iverksettes med en gang ulykken forekommer. I litteraturstudien ble det derimot kartlagt at dette per dags dato ikke er realiteten. Dersom man antar at metoden for deteksjon er for eksempel *fuzzy logic*, som brukt i studien til *Zhao, Chen og Sun (2018)*, vil det gjennomsnittlig ta 2,54 minutter før hendelsen oppdages. I løpet av disse 2,54 minuttene vil kjøretøyene oppføre seg som de gjør i tilfellene der man ikke har brukt ITS-tiltaket i simuleringene. Man har altså trafikkflyt i kjørefeltet nærmest det stoppede kjøretøyet, og i denne perioden vil risikoen for sekundær kollisjon i kjede med dette kjøretøyet være til stede. Det kan skje mye i løpet av 2,54 minutter på vegen, og starten av hendelsen kan også vurderes som den farligste ettersom førerne bruker litt tid på å reagere på og justere seg til hendelsen. De 2,54 minuttene ekstra det tar før utrykningspersonell responderer på ulykken vil kunne øke mengden kø på vegen, noe som også har vist seg å medføre økt risiko for sekundære hendelser. Hvor mye ekstra maksimal kølengde man får på grunn av tidsforsinkelsen ved iverksettingen av tiltaket avhenger av køens negative sjokkbølgehastighet, altså hvor fort køen vokser bakover.

For å få den ønskede effekten av ITS-tiltaket må man altså bruke en metode som gir kortest mulig deteksjonstid, og i fremtiden kan det tenkes at det vil være mulig med enda kortere deteksjonstider enn det som beskrives i litteraturen. Kort deteksjonstid må likevel ikke gå for mye på bekostning av deteksjonsgraden (DR) og andel feilaktige utløsninger av tiltaket (FAR). Dersom ITS-tiltaket iverksettes uten at det er nødvendig, har man sett at dette medfører både større risiko for sekundære ulykker og problemer med trafikk-avvikling som skaper kø og forsinkelser. Ettersom sammenhengen mellom MTTD og DR/FAR tilsier at lav MTTD gir høyere DR/FAR medfører det en overveining som må gjøres når det kommer til hvilke verdier som er akseptable.

Det kan vise seg å være utfordringer knyttet til bruk av ITS-tiltak til formålet foreslått av Statens Vegvesen på grunn av dagens teknologi for automatisk hendelsesdeteksjon. Noen av de tidligere omtalte studiene knyttet til AID-systemer pekte nemlig på at det kan være et problem å bruke automatisk hendelsesdeteksjon på veger med lav ÅDT ettersom de fleste AID-systemer er avhengige av høy trafikk tetthet på vegen for å kunne fange opp hendelser. Lave trafikkmengder kan føre til lengre deteksjonstider, lavere deteksjonsgrad og flere falske alarmer, noe som ikke vil være gunstig dersom man baserer seg på at ITS-tiltaket skal fungere som et avbøtende tiltak ved smal skulderbredde på veger med ÅDT mindre enn 12 000.

# 6

## Kapittel 6

---

# Konklusjon

Gjennom rapporten har det blitt forsøkt å ta stilling til den definerte hypotesen ved å besvare tre forskningsspørsmål, som her oppsummeres og tas stilling til hver for seg.

### **1. Hvordan kan man bruke trafikksimuleringsprogrammet Aimsun Next 20 til å modellere det som skjer ved hendelser som blokkerer kjørefelt helt eller delvis?**

Aimsun Next 20 har gjennom arbeidet vist seg å ikke ha noen innebygd funksjon som gjør det enkelt å modellere hendelser som blokkerer kjørefelt delvis. Prosessen for å utvikle en metode for å simulere slike hendelser ble dermed utviklet ved å prøve og feile i ulike retninger før en metode viste seg å være den mest gunstige for formålet og tiden tilgjengelig for gjennomføringen av studien. Metoden baserer seg på systematiske estimater av hvor mye kapasiteten reduseres på en veg ved en hendelse, og hvor mye dette påvirker hastigheten kjøretøyene vil holde forbi hendelsen. Aimsun har funksjoner som gjør det mulig å justere hastigheten til kjøretøyene på avgrensede områder og i begrensede tidsrom, og er derfor mulig å bruke basert på disse estimatene.

Metoden har vist seg å medføre en god del usikkerhet, men det vurderes at den er mulig å bruke til å sammenligne hva som skjer når man har samme hendelse og ulike konfigurasjoner av skulderbredde og tiltak. Man kan dermed si noe om forskjellene mellom ulike skulderbredder og effekten av ITS-tiltak. Det er derimot mindre nyttig å bruke metoden for å si noe om forskjellene mellom et scenario uten hendelse og et scenario med hendelse, eller mellom ulike hendelser.

### **2. Hvordan påvirkes trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser når man reduserer skulderbredden på en 4-felts motorveg med utgangspunkt i norske standarder for fartsgrense og tverrprofil?**

En vegskulder som er 1,5 meter bred i stedet for 2,75 meter ser ut til å påvirke både trafikkavvikling- og sikkerhet ved hendelser negativt ved hendelser hvor kjøretøyet klarer å manøvrere seg helt eller delvis over på skulderen og man har medium til stor trafikketterspørsel. Når man har trafikketterspørsel som gir trafikkvolumer fra 125 kjt/t/felt til 500 kjt/t/felt har denne reduksjonen i skulderbredde liten effekt ved hendelser der føreren har klart å manøvrere kjøretøyet til kanten av vegen eller nært rekkverket. Den reduserte skulderbredden har nokså stor negativ effekt dersom vegen har ytre rekkverk og det er nødvendig å komme til på passasjersiden eller føreren ikke har klart å få kjøretøyet lengre inn mot vegkanten enn 80 cm. Mer generelt kan man altså si at effekten av skulderbredden på trafikkavvikling og risikoen for sekundære ulykker er større med økt trafikketterspørsel, og øker også med stoppede kjøretøys avstand til vegkanten. Ved mer alvorlige hendelser som blokkerer et eller flere hele kjørefelt er skulderbredden vurdert til å være ubetydelig i sammenhengen det sees på i denne studien.

Ved valg av skulderbredde på fremtidige 4-felts motorveger blir det nødvendig å vurdere om de sparte investeringskostnadene knyttet til smalere tverrsnitt er verdt den negative

effekten på trafikkavvikling- og sikkerhet ved hendelser på veggen. Ettersom det ikke er i tråd med nullvisjonen å bidra til økt risiko for sekundære kollisjoner på veggen, kan det tenkes at dette bør gis ekstra tung vekt i en slik vurdering. Forsinkelseskostnadene som påføres trafikantene er store i flere av de simulerte scenarioene, og dette må også tas i betraktning ved en vurdering av hvor samfunnsøkonomisk lønnsom en slik reduksjon av skulderbredde vil være.

### **3. På hvilken måte kan bruk av intelligente transportsystemer (ITS) for trafikkregulering ved hendelser påvirke parametre knyttet til trafikkavvikling og -sikkerhet på 4-felts motorveg med redusert skulderbredde?**

Et ITS-tiltak etter dagens retningslinjer for trafikkstyring med variable fartsgrenser og stenging av kjørefelt vil kunne påvirke både trafikkavvikling og risikoen for sekundære hendelser negativt når hendelsene er små og blokkeringen av kjørefelt dermed er liten. Man får lengre køer, lengre forsinkelsestid, lavere gjennomstrømning og flere stopp på veggen ved et slikt tiltak enn når man lar trafikken avvikles naturlig forbi hendelsen. Effekten øker med økt trafikketterspørsel. Når man har hendelser hvor kjøretøyet står 80 cm fra vegkanten på en veg med smal skulder får man derimot stort sett en positiv effekt av ITS-tiltaket, i tillegg til at man ser positive effekter av et slikt tiltak når man har en hendelse som blokkerer et helt kjørefelt, uavhengig av skulderbredde. Det kan dog tenkes at disse positive effektene er noe redusert dersom deteksjonstiden er slik den er beskrevet i litteraturen.

Selv om ITS-tiltaket har en negativ effekt på ytelsesparameterne som er kartlagt i denne studien ved de minst blokkerende hendelsene, kan det tenkes at man likevel kan se en positiv effekt av et slikt tiltak ettersom man ikke har trafikk i kjørefeltet nærmest hendelsen. I tillegg får man en kontrollert reduksjon av hastighet forbi hendelsen, noe som er positivt med tanke på konsekvensen av eventuelle sekundære kollisjoner. Et slikt tiltak kan også øke sikkerheten for, og effektiviteten til, rednings- og opprydningspersonell.

Hypotesen som tas stilling til i denne studien var formulert slik:

*Trafikkstyring ved hjelp av ITS kan brukes som avbøtende tiltak for negative konsekvenser knyttet til trafikkavvikling og -sikkerhet ved hendelser når man har redusert skulderbredde på 4-felts motorveg.*

Basert på de simulerte forsøkene kan et forslag til bruk av smal skulder og ITS-tiltak være at skulderbredde på 1,5 meter kan brukes på veger hvor man sjelden har trafikkvolumer mer enn 500 kjt/t og at ITS-tiltak da brukes ved hendelsene som fører til mest blokkering. Det kan også vurderes om de andre nevnte positive effektene ITS-tiltaket har på sikkerheten for de som er involverte i hendelsen, og reduksjon av hastighet og dermed reduksjon av konsekvensen av eventuelle sekundære kollisjoner, tilsier at man bør bruke ITS-tiltaket ved mindre hendelser også. Dersom ITS-tiltaket kun skal brukes ved de hendelsene der det ser ut til at det har en positiv effekt på de ulike ytelsesparameterne må det vurderes om det i fremtiden vil være mulig for den automatiske hendelsesdeteksjonen å differensiere mellom de ulike hendelsene og vurdere hvilke hendelser ITS-tiltaket bør aktiveres for.



## 6.1 Videre arbeid

For å kunne konkludere om bruken av smal skulderbredde og ITS som avbøtende tiltak med større sikkerhet bør det gjennomføres studier der man gjør målinger i felt knyttet til hva som skjer med kapasiteten på vegen ved hendelser. Det kan også være hensiktsmessig å gjennomføre mer omfattende studier som ser på flere typer hendelser, og andre alternativer til skulderbredde før man kan si noe sikkert om hvor nyttig et slikt tiltak vil være. I tillegg vil det være nødvendig å kartlegge kostnader knyttet til ITS-tiltaket, og sammenligne dette med beregninger av samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til reduksjon av skulderbredde uten et slikt tiltak.

Dersom smal skulderbredde og ITS-tiltak skal brukes i spesifikke prosjekter bør det gjøres analyser hvor man har faktiske trafikkdata og bruker den faktiske vegstrekningen i simuleringsmodellen. Det bør gjøres en grundig vurdering av hvordan tungtrafikken vil påvirke trafikkbildet ved ulike hendelser når man har smal skulde og ITS-tiltak. I tillegg kan det være nyttig å se på hvordan avkjørsler og omdirigering av trafikken ved hendelser vil kunne påvirke trafikkvolumet på vegen ved hendelser, og dermed redusere de negative konsekvensene som både smal skulderbredde og ITS-tiltaket kan medføre.

---

## Referanser

- Aakre, A. 2020. Traffic simulation with Aimsun. *TBA4286 Trafikkavvikling og ITS*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 01.05.2021).
- Aakre, A. og Lu, C. 2020. Traffic Flow Theory - part 2. Microscopic Models. *TBA4286 Trafikkavvikling og ITS*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 01.03.2021).
- Aimsun (2020) Aimsun Next 20 Users' Manual.
- Aimsun (u.å.) *Aimun Next*. Tilgjengelig fra: <https://www.aimsun.com/aimsun-next/> (Hentet: 04.12.2020).
- Appel, K., Aakre, A. og Kronborg, P. (2018) *ITS Terminology - Terms and Definitions*. Finnish Transport Agency, Swedish Transport Administration, Statens Vegvesen. Tilgjengelig fra: [https://www.vegvesen.no/attachment/422094/binary/1261585?fast\\_title=ITS+Terminology+2018](https://www.vegvesen.no/attachment/422094/binary/1261585?fast_title=ITS+Terminology+2018).
- Brownlee, J. (2018) *A Gentle Introduction to Exponential Smoothing for Time Series Forecasting in Python*. Tilgjengelig fra: <https://machinelearningmastery.com/exponential-smoothing-for-time-series-forecasting-in-python/> (Hentet: 30.11.2020).
- Cambridge Systematics Inc. (1990) *Incident Management: Final Report*. Trucking Research Institute ATA Foundation, Inc. Tilgjengelig fra: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/3206> (Hentet: 11.05.2021).
- Carson, J. L. (2010) *Best Practices in Traffic Incident Management*. (FHWA-HOP-10-050). Texas, USA: Federal Highway Administration. Tilgjengelig fra: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop10050/fhwahop10050.pdf> (Hentet: 12.05.2021).
- Chang, G.-L., Fei, C. og Point-du-Jour, J. Y. (2002) *Interrelations between variable message signs and detour operations in the I-95 corridor*. (State Highway Administration Research Report MD-02-SP007B4G). Baltimore: University of Maryland. Tilgjengelig fra: [https://roads.maryland.gov/OPR\\_Research/MD-02-SP007B4G-VMS-and-Detour-Operations-in-the-I-95-Corridor-Report.pdf](https://roads.maryland.gov/OPR_Research/MD-02-SP007B4G-VMS-and-Detour-Operations-in-the-I-95-Corridor-Report.pdf) (Hentet: 21.04.2021).
- Chimba, D. og Kutela, B. (2014) Scanning secondary derived crashes from disabled and abandoned vehicle incidents on uninterrupted flow highways, *Journal of Safety Research*, 50, s. 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.05.004>
- Cullison, J. et al. (1997) *Incident Management in the United States: A State-of-The-Practice Review*. (Final Report). Texas, USA: Texas Transport Institute. Tilgjengelig fra: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/TTI-1997-2.pdf> (Hentet: 12.05.2021).
- D'Andrea, E. og Marcelloni, F. (2017) Detection of traffic congestion and incidents from GPS trace analysis, *Expert Systems with Applications*, 73, s. 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.018>
- Department of Planning, Transport and Infrastructure (2019) *Traffic Simulation Model Development Guidelines; Aimsun Next*. South Australia: Government of South Australia. Tilgjengelig fra: [https://www.dpti.sa.gov.au/data/assets/pdf\\_file/0009/532098/AIMSUN\\_Model\\_Development\\_Manual\\_V8\\_190219.pdf](https://www.dpti.sa.gov.au/data/assets/pdf_file/0009/532098/AIMSUN_Model_Development_Manual_V8_190219.pdf) (Hentet: 23.11.2020).
- Dir 2010/40/EU *Europaparlaments- og rådsdirektiv 2010/40/EU av 7.juli 2010 om en ramme for innføring av intelligente transportsystemer innen veitransport og for*

- grensesnitt mot andre transportformer*. Tilgjengelig fra:  
<https://lovdata.no/static/NLX3/32010I0040.pdf> (Hentet: 13.05.2021).
- Dowling, R., Skabardonis, A. og Alexiadis, V. (2004) *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software*. (Final Report FHWA-HRT-04-040). Washington, DC, USA: Federal Highway Administration. Tilgjengelig fra:  
[https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat\\_vol3/vol3\\_guidelines.pdf](https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/vol3_guidelines.pdf)  
 (Hentet: 29.04.2021).
- Farrag, S. G. *et al.* (2020a) Evaluating Active Traffic Management (ATM) Strategies under Non-Recurring Congestion: Simulation-Based with Benefit Cost Analysis Case Study, *Sustainability*, 12(15), s. 15. <https://doi.org/10.3390/su12156027>
- Farrag, S. G. *et al.* (2020b) Toward the improvement of traffic incident management systems using Car2X technologies, *Personal and Ubiquitous Computing*, 25, s. 163-176. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01368-5>
- Foss, T. (2019) Effekten av vegskulder mht. trafikksikkerhet og avvikling. SINTEF Prosjektnotat til Statens Vegvesen Vegdirektoratet, 22.10.2019.
- Giuliano, G. (1989) Incident characteristics, frequency, and duration on a high volume urban freeway, *Transportation Research Part A: General*, 23(5), s. 387-396. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(89\)90086-1](https://doi.org/10.1016/0191-2607(89)90086-1)
- Hadi, M., Sinha, P. og Wang, A. (2007) Modeling Reductions in Freeway Capacity due to Incidents in Microscopic Simulation Models, *Transportation Research Record*, 1999(1), s. 62-68. <https://doi.org/10.3141/1999-07>
- Han, X. *et al.* (2020) Traffic Incident Detection: A Trajectory-based Approach, i *2020 IEEE 36th International Conference on Data Engineering (ICDE), Dallas, TX, USA, 20.-24. april 2020*. IEEE, s. 1866-1869.
- J. Javid, R. og Jahanbakhsh Javid, R. (2018) A framework for travel time variability analysis using urban traffic incident data, *IATSS Research*, 42(1), s. 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2017.06.003>
- Li, J. *et al.* (2020) Assessing injury severity of secondary incidents using support vector machines, *Journal of Transportation Safety & Security*, s. 1-20. <https://doi.org/10.1080/19439962.2020.1754983>
- Lu, J. *et al.* (2012) Automatic traffic incident detection based on nFOIL, *Expert Systems with Applications*, 39(7), s. 6547-6556. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.050>
- Márquez, A. C. (2010) *On the Definition of Dynamic Simulation. Dynamic Modelling for Supply Chain Management: Dealing with Front-end, Back-end and Integration Issues*. Springer London. Tilgjengelig fra:  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84882-681-6#about> (Hentet: 02.03.2021).
- Meld. St. 33 (2016-2017) (2017) *Nasjonal Transportplan 2018-2029*. Oslo: Samferdselsdepartementet. Tilgjengelig fra:  
<https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20162017/id2546287/?ch=4> (Hentet: 16.12.2020).
- Multiconsult (2019) Vurdering av tverrsnitt firefelts veg med fartsgrense 110 km/t. Notat til Statens Vegvesen, 10.10.2019.
- Müller, E. R., Carlson, R. C. og Kraus, W. (2015) Implementing Variable Speed Limits in the Aimsun Microscopic Traffic Simulator, i *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet, Ouro Preto, 9.-13. november 2015*. s. 1622-1630.
- Ohio Department of Transportation (2007) *Ohio QuickClear: Professional Responders Guide for Safe and Effective Highway Incident Management*. Tilgjengelig fra:  
<https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/15096> (Hentet: 11.05.2021).

- Olstam, J. J. og Tapani, A. (2004) *Comparison of Car-following models*. (VTI meddelande 960A). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute. Tilgjengelig fra: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:673977/FULLTEXT01.pdf> (Hentet: 01.03.2021).
- Park, H. *et al.* (2018) Real-time prediction and avoidance of secondary crashes under unexpected traffic congestion, *Accident Analysis & Prevention*, 112, s. 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.11.025>
- PB Farradyne (2000) *Traffic Incident Management Handbook*. Federal Highway Administration. Tilgjengelig fra: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/3702> (Hentet: 27.04.2021).
- Persson, J. *et al.* (2019) *Veileder for Aimsun - Delkapitler til veilederen*. (Rapport Aimsun-veileder 620609-03). Trondheim: Asplan Viak.
- Pompigna, A. og Rupi, F. (2017) Lane-Distribution Models and Related Effects on the Capacity for a Three-Lane Freeway Section: Case Study in Italy, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(10), s. 05017010. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000080>
- Road Network Operations & Intelligent Transport Systems (u.å) *Automatic Incident Detection (AID)*. Tilgjengelig fra: <https://rno-its.piarc.org/en/network-monitoring-its-network-monitoring-vehicles-roadways/automatic-incident-detection> (Hentet: 11.11.2020).
- Rubbernecking (u.å.) Merriam-Webster. Tilgjengelig fra: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/rubberneck> (Hentet: 13.05.2021).
- Sheikh, M. S., Liang, J. og Wang, W. (2020) An Improved Automatic Traffic Incident Detection Technique Using a Vehicle to Infrastructure Communication, *Journal of Advanced Transportation*, 2020, s. 9139074. <https://doi.org/10.1155/2020/9139074>
- Smith, B. L., Qin, L. og Venkatanarayana, R. (2003) Characterization of Freeway Capacity Reduction Resulting from Traffic Accidents, *Journal of Transportation Engineering*, 129(4), s. 362-368. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:4\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(362))
- Solberg, M. G. (2016) På 40 år har en Golf blitt 20 centimeter bredere. Men parkeringsplassene er like små, *Teknisk Ukeblad*, 15.02.2016. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/pa-40-ar-har-en-golf-blitt-20-centimeter-bredere-men-parkeringsplassene-er-like-sma/276940> (Hentet: 27.05.2021).
- Statens Vegvesen (2011) *ITS på veg: En veileder for innføring av vegbaserte ITS-løsninger*. Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/trafikk/its-portalen/its-i-norge> (Hentet: 15.02.2021).
- Statens Vegvesen (2014a) N101 Rekkverk og vegens sideområder: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker> (Hentet: 21.10.2020).
- Statens Vegvesen (2014b) V321 Variable trafikkskilt: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker> (Hentet: 02.12.2020).
- Statens Vegvesen (2017) R311 Trafikkstyringssystemer på veg: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker> (Hentet: 02.12.2020).
- Statens Vegvesen (2018) *ITS-strategi for Statens Vegvesen 2018-2023: Et vegkart mot fremtidens transportsystem*. Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/trafikk/its-portalen/its-i->

- [norge/attachment/2198857?ts=1621e6008e8&fast\\_title=Vegvesenets+ITS-strategi+%28PDF%29](#) (Hentet: 28.10.2020).
- Statens Vegvesen (2019a) *Utredning av smal 4-felts veg og standarder på veger med ÅDT 6000-20000*. Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: [https://www.vegvesen.no/attachment/2846680/binary/1349437?fast\\_title=Utredning+smal+4+felt+ved+%C3%85DT+6000-20000.pdf](https://www.vegvesen.no/attachment/2846680/binary/1349437?fast_title=Utredning+smal+4+felt+ved+%C3%85DT+6000-20000.pdf) (Hentet: 05.11.2020).
- Statens Vegvesen (2019b) N100 Veg- og gateutforming: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker> (Hentet: 23.11.2020).
- Statens Vegvesen (2019c) V120 Premiss for geometrisk utforming av veger: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker> (Hentet: 19.05.2021).
- Statens Vegvesen (2020) N500 Vegtunneler: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker> (Hentet: 02.12.2020).
- Statens Vegvesen (2021) *Trafikkulykkeregisterert*. Tilgjengelig fra: <https://trine.atlas.vegvesen.no/> (Hentet: 12.05.2021).
- SWOV (2002) *Safety Standards for Road Design and Redesign*. (SAFESTAR Project Final Report). Leidshendam, Nederland: SAFESTAR Consortium. Tilgjengelig fra: <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/safestarrep.pdf> (Hentet: 02.12.2020).
- Tang, T.-Q. *et al.* (2008) Stability Analysis for Traffic Flow with Perturbations, *International Journal of Modern Physics C*, 19, s. 1367-1375. <https://doi.org/10.1142/S0129183108012947>
- Transportation Research Board (2000) *Highway Capacity Manual*. Washington DC: National Research Council.
- Transportation Research Board (2009) *Impact of Shoulder Width and Median Width on Safety*. (NCRHP report 633). Washington, DC: The National Academies Press. Tilgjengelig fra: <https://www.nap.edu/catalog/14252/impact-of-shoulder-width-and-median-width-on-safety> (Hentet: 28.09.2020).
- Transportation Research Board (2016) *Highway Capacity Manual*. Washington DC: National Research Council.
- Vegdirektoratet (2020) Fartsgrense på motorvegar og standardar på vegar med ÅDT 6000 - 20 000. Vegdirektoratet sine vurderingar. Brev til Samferdselsdepartementet, 29.05.2020.
- Xie, B., Hu, Z. og Ma, H. (2008) Fuzzy-logic-based traffic incident detection algorithm for freeway, i *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Kunming, 12.-15. juli 2008*. IEEE, s. 1254-1259.
- Xu, C. *et al.* (2019) Investigating the factors affecting secondary crash frequency caused by one primary crash using zero-inflated ordered probit regression, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 524, s. 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.036>
- Zhan, C., Gan, A. og Hadi, M. (2009) Identifying Secondary Crashes and Their Contributing Factors, *Transportation Research Record*, 2102(1), s. 68-75. <https://doi.org/10.3141/2102-09>
- Zhao, M., Chen, X. og Sun, D. (2018) An incident detection method considering meteorological factor with fuzzy logic, *Engineering Review*, 38(1), s. 104-114. Tilgjengelig fra: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041169080&partnerID=40&md5=504989931a444b428af58e0059b0ee96> (Hentet: 30.11.2020).

---

# Vedlegg

- Vedlegg A**    Utvikling av metode for estimering av hastigheter
- Vedlegg B**    Kapasitetsberegning
- Vedlegg C**    Estimat av hastigheter ved redusert kapasitet
- Vedlegg D**    Gjennomstrømning gjennom flaskehals – tidsserier i større format
- Vedlegg E**    Oversikt over digitale vedlegg

# Vedlegg A – Utvikling av metode for estimering av hastigheter

A1 - Sammenligning av teoretisk og simulert hastighet ved maksimal gjennomstrømning (samme fartsreduksjon i begge felt)

Fartsreduksjon	Teoretisk (formel 4)		Ved simulering			Teoretisk med simulert tetthet			
	CAF	Hastighet	Hastighet	Tetthet	Hastighetsdifferanse	Hastighet	Hastighetsdifferanse	Hastighet	Hastighetsdifferanse
km/t		km/t	km/t	kjt/km	km/t	%	km/t	km/t	%
110	1.00	73.93	98.27	21.01	-24.34	-32.93	98.52	0.25	0.26
80	0.96	70.75	73.01	27.12	-2.26	-3.19	73.05	0.04	0.05
76	0.95	70.07	69.24	28.33	0.83	1.18	69.25	0.01	0.02
70	0.93	68.97	63.48	30.43	5.49	7.96	63.46	-0.02	-0.03
60	0.90	66.68	54.33	34.37	12.35	18.52	54.32	-0.01	-0.02
50	0.86	63.76	45.79	39.10	17.97	28.19	45.66	-0.13	-0.28
40	0.81	60.14	36.36	46.29	23.78	39.54	36.38	0.02	0.05
30	0.74	54.73	27.39	55.89	27.34	49.95	27.42	0.03	0.10
20	0.63	46.41	18.36	70.73	28.05	60.44	18.37	0.01	0.07
10	0.43	31.79	9.15	96.43	22.64	71.22	9.23	0.08	0.87

A2 - Hastighetsdifferanse mellom simulert og teori vs vp/C-andel (uten fartsreduksjon)

Høyre kjørefelt

Ved simulering			Teoretisk (formel 5)		Ved simulering		Differanse		Differanse	
Etterspørsel	vp/C	Trafikkvolum	Hastighet	Tetthet	Hastighet	Tetthet	Hastighet	Tetthet	Hastighet	Tetthet
kjt/t/felt	%	kjt/t	km/t	kjt/km	km/t	kjt/km	km/t	kjt/km	%	%
0	0	0	110	0	110	0	0	0	0	0
10	0.96	19.80	109.98	0.18	109.29	0.18	0.69	0.00	0.62	0.02
50	4.65	96.30	109.88	0.88	108.75	0.89	1.13	-0.01	1.02	-1.55
100	9.10	188.30	109.74	1.72	108.16	1.75	1.58	-0.03	1.44	-1.99
200	18.04	373.40	109.42	3.41	106.76	3.50	2.66	-0.09	2.43	-2.57
300	25.69	531.70	109.09	4.87	105.97	5.03	3.12	-0.16	2.86	-3.20
400	32.68	676.50	108.72	6.22	105.29	6.42	3.43	-0.20	3.15	-3.17
500	39.11	809.50	108.32	7.47	104.66	7.75	3.66	-0.28	3.38	-3.70
600	45.23	936.20	107.87	8.68	104.08	9.01	3.79	-0.33	3.51	-3.81
700	50.17	1038.60	107.45	9.67	103.56	10.05	3.89	-0.38	3.62	-3.98
850	57.59	1192.10	106.72	11.17	102.72	11.63	4.00	-0.46	3.75	-4.12
1000	63.77	1320.00	106.00	12.45	102.11	12.95	3.89	-0.50	3.67	-3.99
1100	67.77	1402.90	105.47	13.30	101.82	13.79	3.65	-0.49	3.46	-3.67
1200	72.00	1490.40	104.85	14.22	101.36	14.71	3.49	-0.49	3.32	-3.48
1300	75.35	1559.70	104.30	14.95	101.11	15.44	3.19	-0.49	3.06	-3.25
1400	78.90	1633.20	103.68	15.75	100.77	16.24	2.91	-0.49	2.80	-3.09
1500	82.37	1705.00	103.01	16.55	100.58	16.96	2.43	-0.41	2.35	-2.46
1600	86.22	1784.80	102.19	17.47	100.28	17.80	1.91	-0.33	1.87	-1.91
1700	88.89	1840.10	101.57	18.12	100.05	18.40	1.52	-0.28	1.50	-1.57
1800	91.93	1902.90	100.82	18.87	99.80	19.08	1.02	-0.21	1.02	-1.09
1966	96.99	2007.70	99.44	20.19	98.87	20.30	0.57	-0.11	0.57	-0.54
2000	97.88	2026.10	99.17	20.43	98.31	20.61	0.86	-0.18	0.87	-0.88
2070	99.31	2055.70	98.74	20.82	97.21	21.16	1.53	-0.34	1.55	-1.64



### A3 - Hastighetsdifferanse mellom simulert og teori vs vp/C-andel (uten fartsreduksjon)

#### Venstre kjørefelt

Ved simulering			Teoretisk (formel 5)		Ved simulering		Differanse		Differanse	
Etterspørsel	vp/C	Trafikkvolum	Hastighet	Tetthet	Hastighet	Tetthet	Hastighet	Tetthet	Hastighet	Tetthet
kjt/t/felt	%	kjt/t	km/t	kjt/km	km/t	kjt/km	km/t	kjt/km	%	%
0	0	0	116	0	116	0	0	0	0	0
10	0.03	0.60	116.00	0.01	115.91	0.01	0.09	0.00	0.08	-93.33
50	0.12	2.40	116.00	0.02	114.47	0.02	1.53	0.00	1.32	3.34
100	0.52	10.80	115.89	0.09	114.46	0.11	1.43	-0.02	1.24	-18.04
200	1.61	33.40	115.86	0.29	113.56	0.30	2.30	-0.01	1.99	-4.07
300	3.47	71.90	115.80	0.62	113.29	0.65	2.51	-0.03	2.17	-4.69
400	6.04	125.00	115.72	1.08	112.88	1.13	2.84	-0.05	2.45	-4.61
500	9.29	192.30	115.60	1.66	112.32	1.73	3.28	-0.07	2.84	-4.00
600	12.95	268.00	115.45	2.32	111.66	2.42	3.79	-0.10	3.28	-4.25
700	16.91	350.00	115.27	3.04	110.92	9.01	4.35	-5.97	3.78	-196.75
850	24.82	513.70	114.85	4.47	109.84	4.68	5.01	-0.21	4.36	-4.63
1000	32.99	682.90	114.30	5.97	108.67	6.30	5.63	-0.33	4.92	-5.44
1100	37.94	785.30	113.89	6.90	108.10	7.29	5.79	-0.39	5.09	-5.73
1200	43.96	910.00	113.31	8.03	107.29	8.51	6.02	-0.48	5.32	-5.97
1300	49.49	1024.40	112.69	9.09	106.49	9.64	6.20	-0.55	5.50	-6.04
1400	56.46	1168.70	111.74	10.46	105.62	11.08	6.12	-0.62	5.47	-5.93
1500	61.60	1275.20	110.90	11.50	105.21	12.16	5.69	-0.66	5.13	-5.75
1600	69.45	1437.70	109.36	13.15	104.71	13.77	4.65	-0.62	4.25	-4.74
1700	75.35	1559.70	107.94	14.45	103.78	15.05	4.16	-0.60	3.85	-4.16
1800	82.04	1698.30	106.01	16.02	103.04	16.50	2.97	-0.48	2.80	-3.00
1966	93.00	1925.00	101.92	18.89	100.98	19.09	0.94	-0.20	0.92	-1.07
2000	95.27	1972.00	100.89	19.55	100.11	20.61	0.78	-1.06	0.77	-5.45
2070	98.53	2039.60	99.29	20.54	99.19	20.58	0.10	-0.04	0.10	-0.19

A4 - Justert speed-flow forhold – formel 10 – høyre felt

CAF	1.00		0.96		0.95		0.93		0.90		0.86		0.81		0.74		0.63		0.43	
vp	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet
2070	100.00	98.52																		
2000	96.62	99.30																		
1981	95.70	99.46	100.00	73.05																
1962	94.78	99.61	99.04	73.30	100.00	69.25														
1931	93.29	99.84	97.48	75.80	98.43	70.81	100.00	63.46												
1900	91.79	100.04	95.91	78.03	96.84	73.73	98.39	65.58												
1867	90.19	100.24	94.24	79.80	95.16	75.84	96.68	69.02	100.00	54.32										
1800	86.96	100.54	90.86	83.00	91.75	79.67	93.21	73.95	96.41	61.79										
1785	86.25	100.60	90.13	83.63	91.00	80.42	92.45	74.93	95.63	63.26	100.00	45.66								
1700	82.13	100.69	85.82	86.91	86.65	84.35	88.03	80.00	91.06	70.85	95.22	57.27								
1684	81.35	100.74	85.01	87.45	85.83	85.00	87.20	80.84	90.20	72.11	94.32	59.17	100.00	36.38						
1600	77.29	101.02	80.77	89.87	81.55	87.90	82.85	84.70	85.70	77.89	89.62	67.92	95.01	50.60						
1532	74.03	101.28	77.36	91.67	78.11	90.01	79.35	87.23	82.08	81.59	85.83	73.65	91.00	59.83	100.00	27.42				
1500	72.46	101.42	75.72	92.47	76.45	90.93	77.68	88.38	80.35	83.22	84.02	76.04	89.08	63.66	97.88	34.57				
1400	67.63	101.97	70.67	94.82	71.36	93.62	72.50	91.53	74.99	87.61	78.41	82.19	83.14	73.42	91.36	53.52				
1300	62.80	102.39	65.62	96.71	66.26	95.79	67.32	94.28	69.63	91.31	72.81	87.16	77.20	80.72	84.83	67.08				
1300	62.78	102.40	65.60	96.72	66.24	95.80	67.30	94.29	69.61	91.33	72.79	87.18	77.17	80.75	84.80	67.13	100.00	18.37		
1200	57.97	102.81	60.58	98.31	61.16	97.60	62.14	96.45	64.28	94.22	67.21	91.24	71.26	86.57	78.31	76.84	92.34	45.19		
1100	53.14	103.24	55.53	99.62	56.07	99.06	56.96	98.16	58.92	96.59	61.61	94.40	65.32	91.04	71.78	84.31	84.64	63.63		
1000	48.31	103.77	50.48	100.95	50.97	100.52	51.78	99.84	53.56	98.54	56.01	96.86	59.38	94.52	65.26	89.85	76.95	76.14		
900	43.48	104.25	45.43	102.07	45.87	101.75	46.61	101.24	48.21	100.29	50.41	99.06	53.45	97.27	58.73	94.02	69.25	85.12		
890	43.00	104.30	44.93	102.17	45.37	101.86	46.09	101.37	47.68	100.44	49.86	99.26	52.86	97.52	58.08	94.38	68.49	85.84	100.00	9.23
800	38.65	104.79	40.38	103.02	40.78	102.78	41.43	102.41	42.85	101.71	44.81	100.84	47.51	99.57	52.20	97.24	61.56	91.39	89.88	46.76
700	33.82	105.23	35.34	103.96	35.68	103.78	36.25	103.50	37.49	102.99	39.21	102.27	41.57	101.39	45.68	99.81	53.86	95.87	78.64	71.11
600	28.99	105.69	30.29	104.73	30.58	104.60	31.07	104.40	32.14	104.03	33.61	103.57	35.63	102.94	39.15	101.78	46.17	99.28	67.41	85.49
500	24.15	106.16	25.24	105.46	25.48	105.36	25.89	105.22	26.78	104.95	28.01	104.62	29.69	104.19	32.63	103.45	38.47	101.83	56.17	93.94
400	19.32	106.64	20.19	106.15	20.39	106.08	20.71	105.98	21.43	105.79	22.40	105.56	23.75	105.26	26.10	104.76	30.78	103.72	44.94	99.41
300	14.49	107.32	15.14	106.96	15.29	106.90	15.54	106.82	16.07	106.67	16.80	106.49	17.82	106.24	19.58	105.90	23.08	105.24	33.70	102.91
200	9.66	108.04	10.10	107.82	10.19	107.79	10.36	107.75	10.71	107.66	11.20	107.54	11.88	107.40	13.05	107.15	15.39	106.66	22.47	105.29
100	4.83	108.74	5.05	108.65	5.10	108.63	5.18	108.61	5.36	108.57	5.60	108.52	5.94	108.45	6.53	108.34	7.69	108.13	11.23	107.46
50	2.42	109.15	2.52	109.04	2.55	109.04	2.59	109.03	2.68	109.01	2.80	108.98	2.97	108.95	3.26	108.90	3.85	108.80	5.62	108.49
20	0.97	109.32	1.01	109.28	1.02	109.27	1.04	109.27	1.07	109.26	1.12	109.25	1.19	109.24	1.31	109.22	1.54	109.18	2.25	109.06

A5 - Justert speed-flow forhold – formel 10 – venstre felt

CAF	1.00		0.96		0.95		0.93		0.90		0.86		0.81		0.74		0.63		0.43	
vp	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet	vp/C	Hastighet
2070	100.00	98.52																		
2000	96.62	99.57																		
1981	95.70	99.85	100.00	73.05																
1962	94.78	100.17	99.04	74.61	100.00	69.25														
1931	93.29	100.75	97.48	76.65	98.43	71.88	100.00	63.46												
1900	91.79	101.27	95.91	78.69	96.84	74.25	98.39	66.60												
1867	90.19	101.65	94.24	80.82	95.16	76.69	96.68	69.61	100.00	54.32										
1800	86.96	102.31	90.86	84.75	91.75	81.33	93.21	75.33	96.41	62.49										
1785	86.25	102.44	90.13	85.49	91.00	82.20	92.45	76.53	95.63	64.12	100.00	45.66								
1700	82.13	103.07	85.82	89.31	86.65	86.70	88.03	82.23	91.06	72.74	95.22	58.28								
1684	81.35	103.17	85.01	89.94	85.83	87.44	87.20	83.18	90.20	74.13	94.32	60.40	100.00	36.38						
1600	77.29	103.60	80.77	92.86	81.55	90.89	82.85	87.53	85.70	80.49	89.62	70.09	95.01	51.72						
1532	74.03	104.01	77.36	94.79	78.11	93.16	79.35	90.40	82.08	84.68	85.83	76.32	91.00	61.86	100.00	27.42				
1500	72.46	104.27	75.72	95.60	76.45	94.11	77.68	91.61	80.35	86.43	84.02	78.92	89.08	65.98	97.88	35.39				
1400	67.63	104.83	70.67	98.17	71.36	96.99	72.50	95.01	74.99	91.00	78.41	85.56	83.14	76.46	91.36	55.54				
1300	62.80	105.18	65.62	101.02	66.26	99.15	67.32	97.72	69.63	94.89	72.81	90.77	77.20	84.19	84.83	70.00				
1300	62.78	105.18	65.60	101.03	66.24	99.15	67.30	97.73	69.61	94.91	72.79	90.79	77.17	84.22	84.80	70.06	100.00	18.37		
1200	57.97	105.58	60.58	102.47	61.16	100.85	62.14	99.77	64.28	97.66	67.21	94.82	71.26	90.21	78.31	80.34	92.34	47.09		
1100	53.14	106.05	55.53	103.73	56.07	102.34	56.96	101.51	58.92	99.92	61.61	97.83	65.32	94.62	71.78	87.98	84.64	66.63		
1000	48.31	106.61	50.48	104.90	50.97	103.68	51.78	103.05	53.56	101.83	56.01	100.27	59.38	97.95	65.26	93.47	76.95	79.72		
900	43.48	107.27	45.43	106.01	45.87	104.96	46.61	104.46	48.21	103.53	50.41	102.34	53.45	100.63	58.73	97.48	69.25	88.91		
890	43.00	107.34	44.93	106.12	45.37	105.08	46.09	104.60	47.68	103.68	49.86	102.53	52.86	100.87	58.08	97.82	68.49	89.61	100.00	9.23
800	38.65	108.05	40.38	107.13	40.78	106.22	41.43	105.83	42.85	105.09	44.81	104.17	47.51	102.88	52.20	100.60	61.56	94.95	89.88	49.13
700	33.82	108.63	35.34	107.70	35.68	107.31	36.25	107.03	37.49	106.52	39.21	105.87	41.57	104.87	45.68	103.17	53.86	99.30	78.64	74.70
600	28.99	109.26	30.29	108.59	30.58	108.27	31.07	108.06	32.14	107.68	33.61	107.20	35.63	106.55	39.15	105.42	46.17	102.64	67.41	89.26
500	24.15	109.91	25.24	109.43	25.48	109.18	25.89	109.03	26.78	108.74	28.01	108.40	29.69	107.92	32.63	107.12	38.47	105.44	56.17	97.49
400	19.32	110.59	20.19	110.26	20.39	110.06	20.71	109.96	21.43	109.75	22.40	109.50	23.75	109.16	26.10	108.60	30.78	107.45	44.94	102.82
300	14.49	111.38	15.14	111.05	15.29	111.00	15.54	110.92	16.07	110.76	16.80	110.56	17.82	110.32	19.58	109.93	23.08	109.17	33.70	106.58
200	9.66	112.23	10.10	112.04	10.19	112.01	10.36	111.96	10.71	111.86	11.20	111.74	11.88	111.58	13.05	111.31	15.39	110.77	22.47	109.24
100	4.83	113.06	5.05	112.97	5.10	112.96	5.18	112.93	5.36	112.89	5.60	112.84	5.94	112.76	6.53	112.64	7.69	112.40	11.23	111.66
50	2.42	113.46	2.52	113.42	2.55	113.42	2.59	113.40	2.68	113.38	2.80	113.36	2.97	113.32	3.26	113.26	3.85	113.15	5.62	112.80
20	0.97	115.88	1.01	115.87	1.02	115.87	1.04	115.87	1.07	115.86	1.12	115.86	1.19	115.86	1.31	115.85	1.54	115.84	2.25	115.80

A6 - Fordeling av kjøretøy i felt

Trafikkvolum ved simulering							Differanse	
Trafikketterspørsel	Etterspørsel/C	Høyre felt	Venstre felt	Totalt	Andel i HF	Andel i VF	Trafikkvolum	
kjt/t/felt	%	kjt/t	kjt/t	kjt/t	%	%	kjt/t	%
10	0.48	19.80	0.60	20.40	97.06	2.94	19.20	96.97
50	2.42	96.30	2.40	98.70	97.57	2.43	93.90	97.51
100	4.83	188.30	10.80	199.10	94.58	5.42	177.50	94.26
200	9.66	373.40	33.40	406.80	91.79	8.21	340.00	91.06
300	14.49	531.70	71.90	603.60	88.09	11.91	459.80	86.48
400	19.32	676.50	125.00	801.50	84.40	15.60	551.50	81.52
500	24.15	809.50	192.30	1001.80	80.80	19.20	617.20	76.24
600	28.99	936.20	268.00	1204.20	77.74	22.26	668.20	71.37
700	33.82	1038.60	350.00	1388.60	74.79	25.21	688.60	66.30
850	41.06	1192.10	513.70	1705.80	69.89	30.11	678.40	56.91
1000	48.31	1320.00	682.90	2002.90	65.90	34.10	637.10	48.27
1100	53.14	1402.90	785.30	2188.20	64.11	35.89	617.60	44.02
1200	57.97	1490.40	910.00	2400.40	62.09	37.91	580.40	38.94
1300	62.80	1559.70	1024.40	2584.10	60.36	39.64	535.30	34.32
1400	67.63	1633.20	1168.70	2801.90	58.29	41.71	464.50	28.44
1500	72.46	1705.00	1275.20	2980.20	57.21	42.79	429.80	25.21
1600	77.29	1784.80	1437.70	3222.50	55.39	44.61	347.10	19.45
1700	82.13	1840.10	1559.70	3399.80	54.12	45.88	280.40	15.24
1800	86.96	1902.90	1698.30	3601.20	52.84	47.16	204.60	10.75
1966	94.98	2007.70	1925.00	3932.70	51.05	48.95	82.70	4.12
2000	96.62	2026.10	1972.00	3998.10	50.68	49.32	54.10	2.67
2070	100.00	2055.70	2039.60	4095.30	50.20	49.80	16.10	0.78
2100	101.45	2065.60	2059.00	4124.60	50.08	49.92	6.60	0.32

## Vedlegg B - Kapasitetsberegning

Hendelse	Skulder	Kb	S	x	k	B	d <sub>0</sub>	Høyre felt				Venstre felt				CAF <sub>tot</sub>
								d <sub>Hf</sub>	CAF <sub>h</sub>	CAF <sub>r</sub>	CAF	d <sub>Vf</sub>	CAF <sub>h</sub>	CAF <sub>r</sub>	CAF	
H1	S1	1.80	2.75	0.20	1.10	3.50	0.85	0.85	1.00	0.95	0.95	0.85	1.00	0.95	0.95	0.95
	S2	1.80	1.50	0.20	1.10	3.50	0.85	1.6	0.57	0.95	0.54	1.00	0.91	0.95	0.87	0.71
H2	S1	1.80	2.75	0.50	1.10	3.50	0.85	0.85	1.00	0.95	0.95	0.85	1.00	0.95	0.95	0.95
	S2	1.80	1.50	0.50	1.10	3.50	0.85	1.9	0.40	0.95	0.38	1.30	0.74	0.95	0.71	0.54
H3	S1	1.80	2.75	0.80	1.10	3.50	0.85	0.95	0.94	0.95	0.90	0.85	1.00	0.95	0.95	0.92
	S2	1.80	1.50	0.80	1.10	3.50	0.85	2.2	0.23	0.95	0.22	1.60	0.57	0.95	0.54	0.38

# Vedlegg C – Estimat av hastigheter ved redusert kapasitet

C1

		Basis											
		T1				T2				T3			
		S1		S2		S1		S2		S1		S2	
<b>CAF</b>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	4140		4140		4140		4140		4140		4140	
<b>Kjørefelt</b>		<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>
<b>CAF</b>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070
Ved trafikketterspørsel 07:00-07:45 og 09:15-10:00													
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	125				250				375			
<b>Vp/C</b>	[%]	6	6	6	6	12	12	12	12	18	18	18	18
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	6	94	6	94	10	90	10	90	15	85	15	85
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	14	236	14	236	52	448	52	448	112	638	112	638
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	1	11	1	11	3	22	3	22	5	31	5	31
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	0	2	0	2	0	4	0	4	1	6	1	6
<b>Hastighet</b>	[km/t]	116	108	116	108	113	106	113	106	113	105	113	105
Ved trafikketterspørsel 07:45-09:15													
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	500				1000				1500			
<b>Vp/C</b>	[%]	24	24	24	24	48	48	48	48	72	72	72	72
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	19	81	19	81	33	67	33	67	44	56	44	56
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	192	808	192	808	669	1331	669	1331	1307	1693	1307	1693
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	9	39	9	39	32	64	32	64	63	82	63	82
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	2	8	2	8	7	13	7	13	13	17	13	17
<b>Hastighet</b>	[km/t]	112	105	112	105	109	102	109	102	105	100	105	100

		H1											
		T1				T2				T3			
		S1		S2		S1		S2		S1		S2	
<b>CAF</b>		0.95		0.71		0.95		0.71		0.95		0.71	
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	3933		2939		3933		2939		3933		2939	
<b>Kjørefelt</b>		<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>
<b>CAF</b>		0.95	0.95	0.87	0.54	0.95	0.95	0.87	0.54	0.95	0.95	0.87	0.54
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	1967	1967	1801	1118	1967	1967	1801	1118	1967	1967	1801	1118
		Ved trafikketterspørsel 07:00-07:45 og 09:15-10:00											
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	125				250				375			
<b>Vp/C</b>	[%]	6	6	7	11	13	13	14	22	19	19	21	34
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	6	94	10	90	11	89	18	82	16	84	25	75
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	15	235	24	226	55	445	90	410	117	633	189	561
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	1	12	1	20	3	23	5	37	6	32	11	50
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	0	2	0	4	0	5	1	7	1	6	2	10
<b>Hastighet</b>	[km/t]	114	107	114	106	113	106	113	102	113	104	112	97
		Ved trafikketterspørsel 07:45-09:15											
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	500				1000				1500			
<b>Vp/C</b>	[%]	25	25	28	45	51	51	56	89	76	76	101	101
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	20	80	32	68	35	65	48	52	45	55	62	38
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	200	800	316	684	695	1305	963	1037	1343	1657	1871	1129
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	10	41	18	61	35	66	53	93	68	84	104	101
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	2	8	3	13	7	14	11	19	14	17	39	82
<b>Hastighet</b>	[km/t]	112	103	110	91	107	96	101	41	99	87	47	14

		H2											
		T1				T2				T3			
		S1		S2		S1		S2		S1		S2	
<b>CAF</b>		0.95		0.54		0.95		0.54		0.95		0.54	
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	3933		2236		3933		2236		3933		2236	
<b>Kjørefelt</b>		<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>
<b>CAF</b>		0.95	0.95	0.71	0.38	0.95	0.95	0.71	0.38	0.95	0.95	0.71	0.38
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	1967	1967	1470	787	1967	1967	1470	787	1967	1967	1470	787
		Ved trafikketterspørsel 07:00-07:45 og 09:15-10:00											
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	125				250				375			
<b>Vp/C</b>	[%]	6	6	9	16	13	13	17	32	19	19	26	48
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	6	94	13	87	11	89	24	76	16	84	33	67
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	15	235	33	217	55	445	121	379	117	633	249	501
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	1	12	2	28	3	23	8	48	6	32	17	64
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	0	2	0	6	0	5	2	10	1	6	3	13
<b>Hastighet</b>	[km/t]	114	107	113	104	113	106	112	98	113	104	110	89
		Ved trafikketterspørsel 07:45-09:15											
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	500				1000				1500			
<b>Vp/C</b>	[%]	25	25	34	64	51	51	68	100	76	76	117	117
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	20	80	40	60	35	65	61	39	45	55	69	31
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	200	800	403	597	695	1305	1213	787	1343	1657	2079	921
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	10	41	27	76	35	66	83	100	68	84	141	117
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	2	8	5	16	7	14	17	103	14	17	60	103
<b>Hastighet</b>	[km/t]	112	103	108	75	107	96	73	8	99	87	25	8

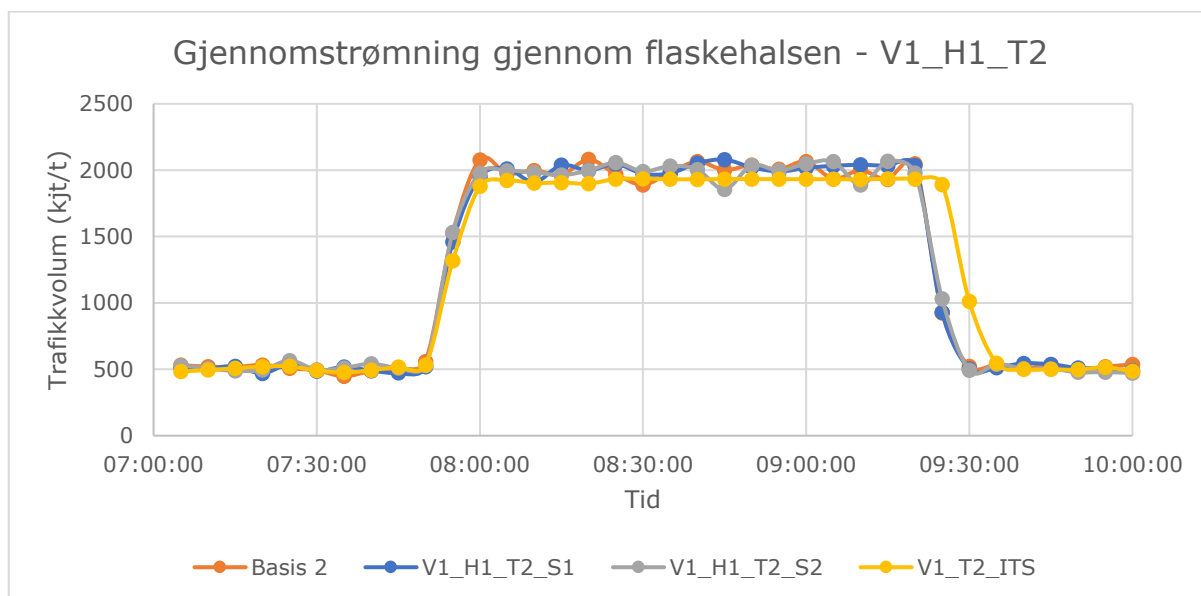
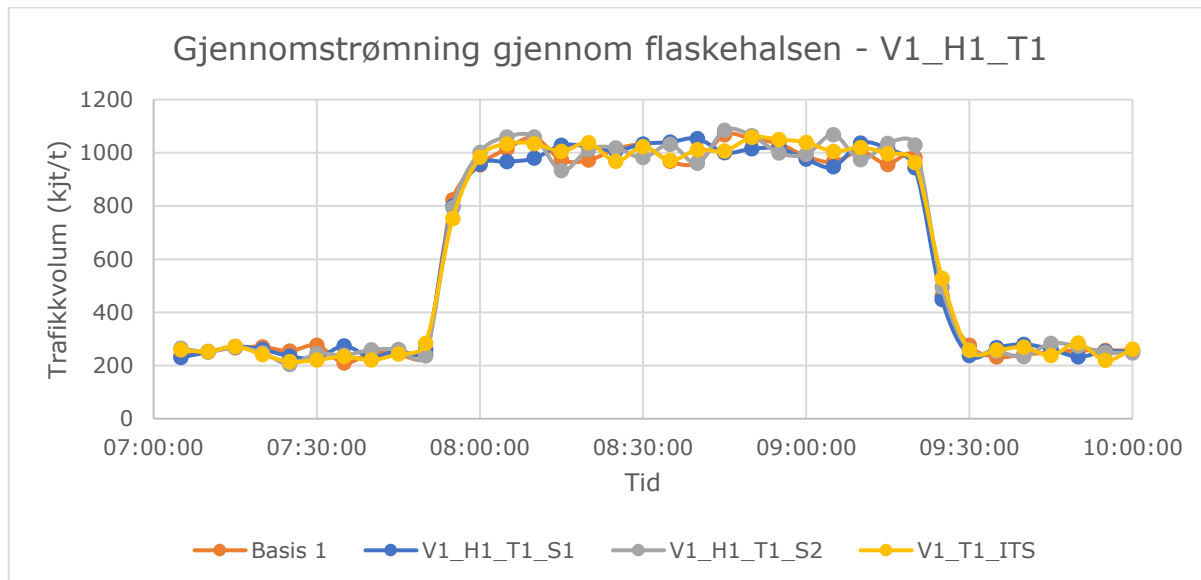


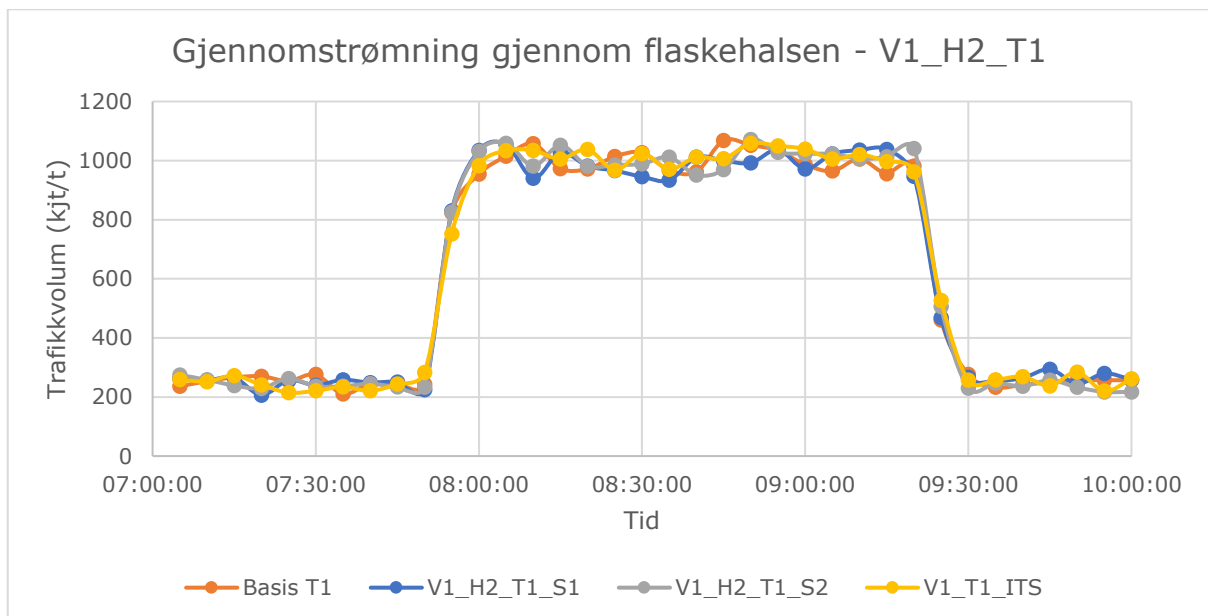
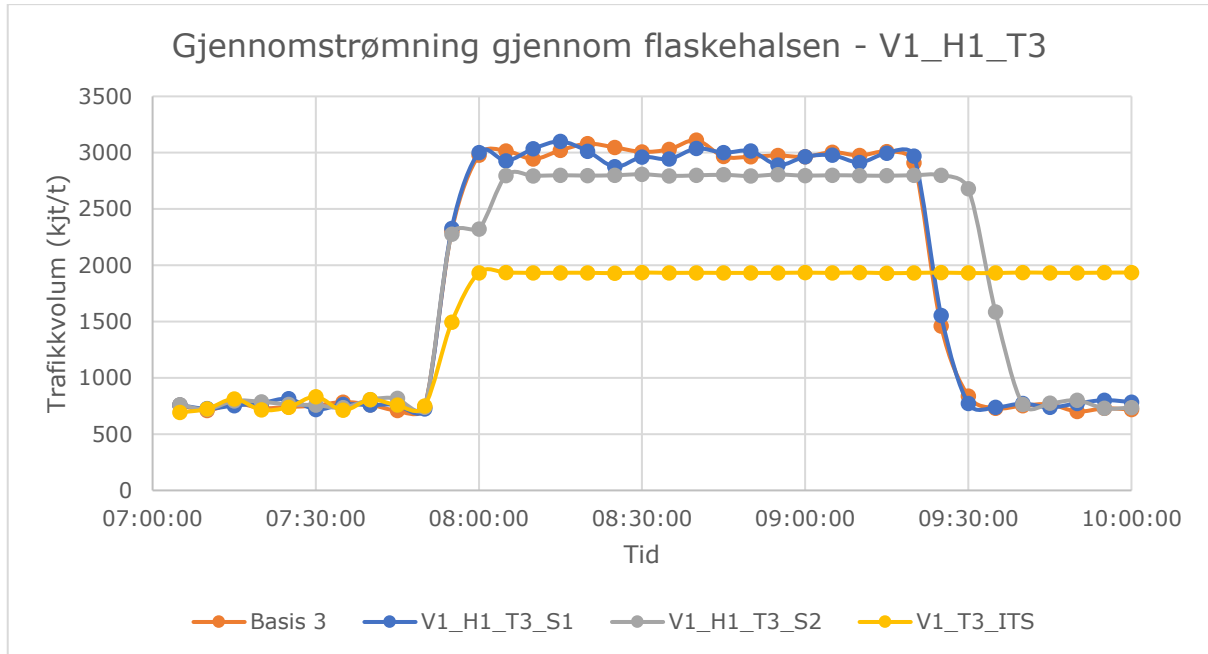
		H3											
		T1				T2				T3			
		S1		S2		S1		S2		S1		S2	
<b>CAF</b>		0.92		0.38		0.92		0.38		0.92		0.38	
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	3809		1573		3809		1573		3809		1573	
<b>Kjørefelt</b>		<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>
<b>CAF</b>		0.95	0.9	0.54	0.22	0.95	0.90	0.54	0.22	0.95	0.90	0.54	0.22
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	1967	1863	1118	455	1967	1863	1118	455	1967	1863	1118	455
		Ved trafikketterspørsel 07:00-07:45 og 09:15-10:00											
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	125				250				375			
<b>Vp/C</b>	[%]	6	7	11	27	13	13	22	55	19	20	34	82
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	6	94	21	79	11	89	37	63	16	84	46	54
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	16	234	53	197	57	443	183	317	123	627	349	401
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	1	13	5	43	3	24	16	70	6	34	31	88
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	0	2	1	9	0	5	3	14	1	7	6	18
<b>Hastighet</b>	[km/t]	114	107	113	100	113	104	111	82	113	104	107	49
		Ved trafikketterspørsel 07:45-09:15											
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	500				1000				1500			
<b>Vp/C</b>	[%]	25	27	45	100	51	54	114	114	76	81	145	145
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	21	79	54	46	36	64	74	26	46	54	78	22
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	210	790	545	455	722	1278	1483	517	1380	1620	2338	662
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	11	42	49	100	37	69	133	114	70	87	209	145
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	2	9	10	21	7	35	82	124	14	18	82	124
<b>Hastighet</b>	[km/t]	112	102	101	4	107	91	14	4	98	76	14	4

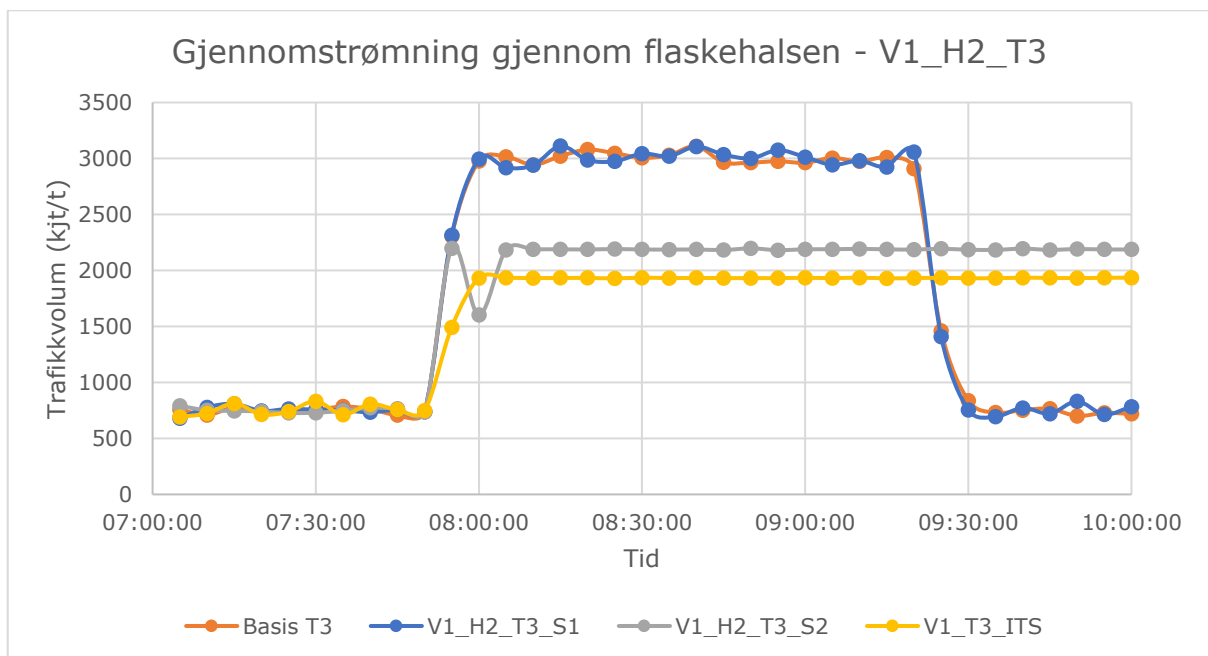
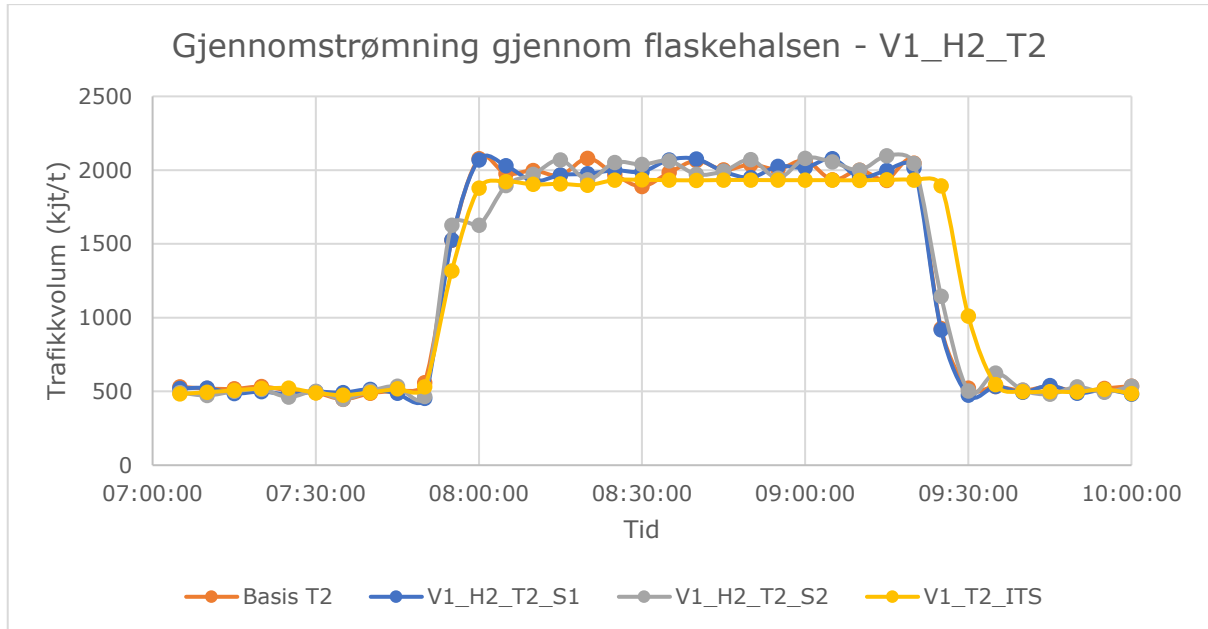
		H4					
		T1		T2		T3	
		S1/S2		S1/S2		S1/S2	
<b>CAF</b>		0.35		0.35		0.35	
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	1449		1449		1449	
<b>Kjørefelt</b>		<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>	<b>VF</b>	<b>HF</b>
<b>CAF</b>		0.70	0	0.70	0	0.70	0
<b>Kapasitet (C)</b>	[kjt/t]	1449	0	1449	0	1449	0
Ved trafikketterspørsel 07:00-07:45 og 09:15-10:00							
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	125		250		375	
<b>Vp/C</b>	[%]	17	0	35	0	52	0
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	100	0	100	0	100	0
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	250	0	500	0	750	0
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	17	0	35	0	52	0
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	3	0	7	0	11	0
<b>Hastighet</b>	[km/t]	110	0	107	0	101	0
Ved trafikketterspørsel 07:45-09:15							
<b>Trafikkvolum (Vp)</b>	[kjt/t/felt]	500		1000		1500	
<b>Vp/C</b>	[%]	69	0	138	0	207	0
<b>Andel av Vp i felt</b>	[%]	100	0	100	0	100	0
<b>Vp i felt</b>	[kjt/t]	1000	0	2000	0	3000	0
<b>Vp/C i felt</b>	[%]	69	0	138	0	207	0
<b>Tetthet</b>	[kjt/km]	14	0	61	0	61	0
<b>Hastighet</b>	[km/t]	90	0	24	0	24	0

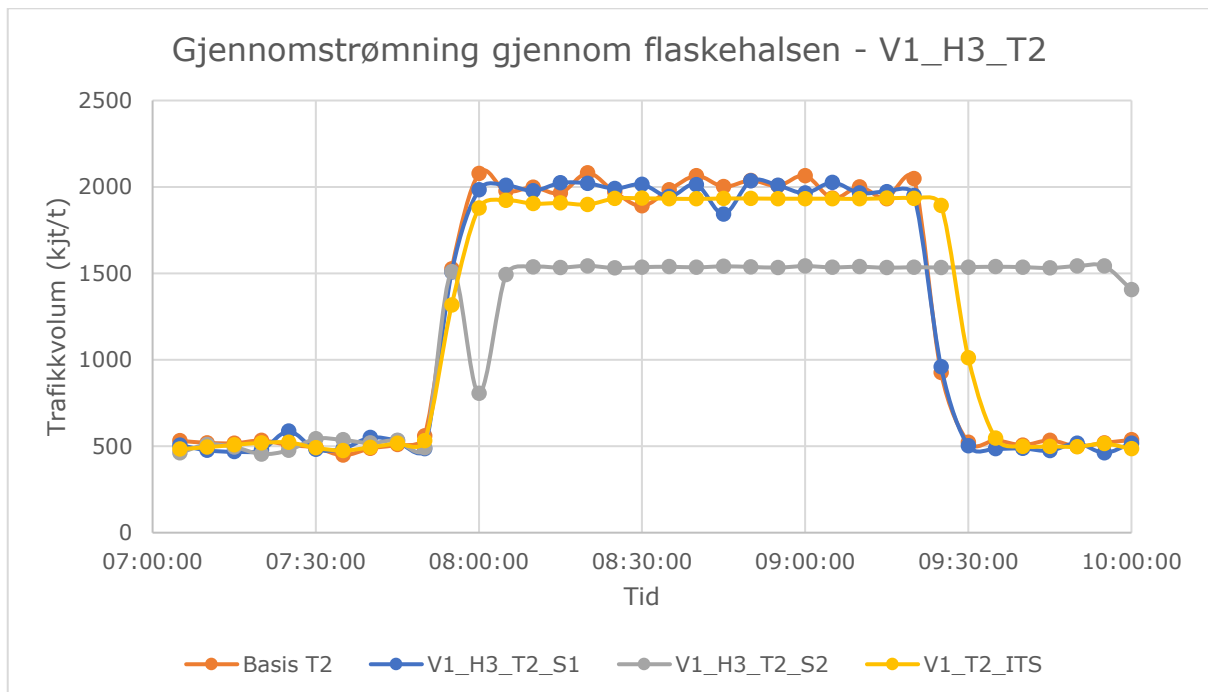
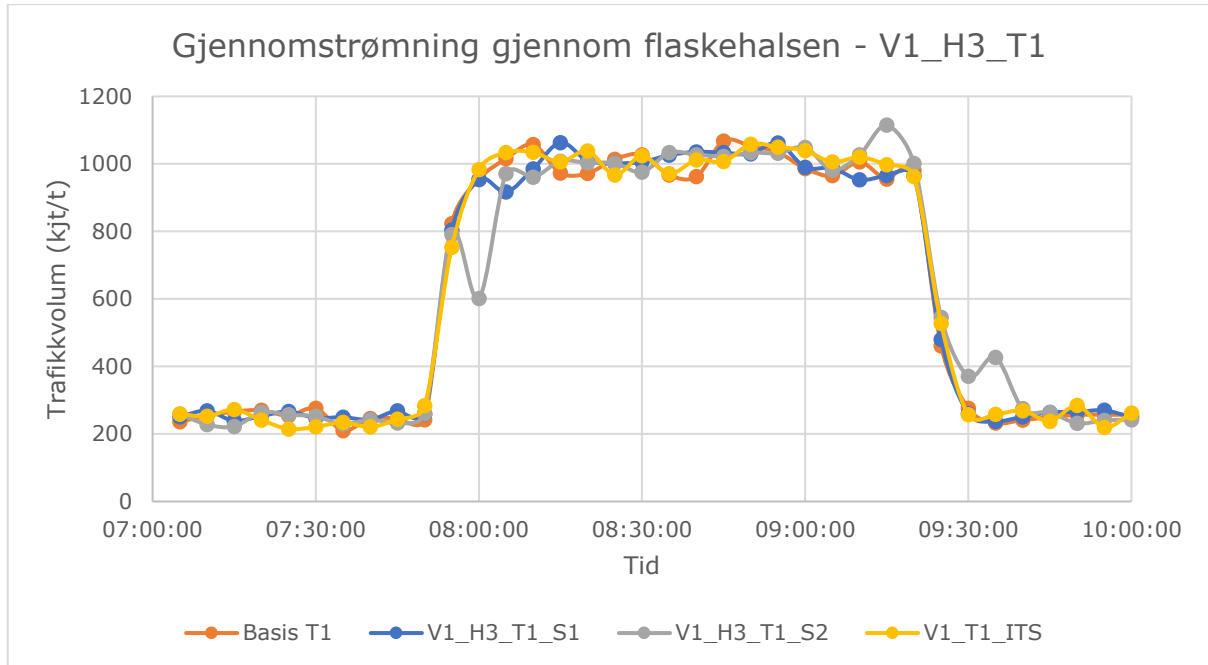
# Vedlegg D - Gjennomstrømning gjennom flaskehals

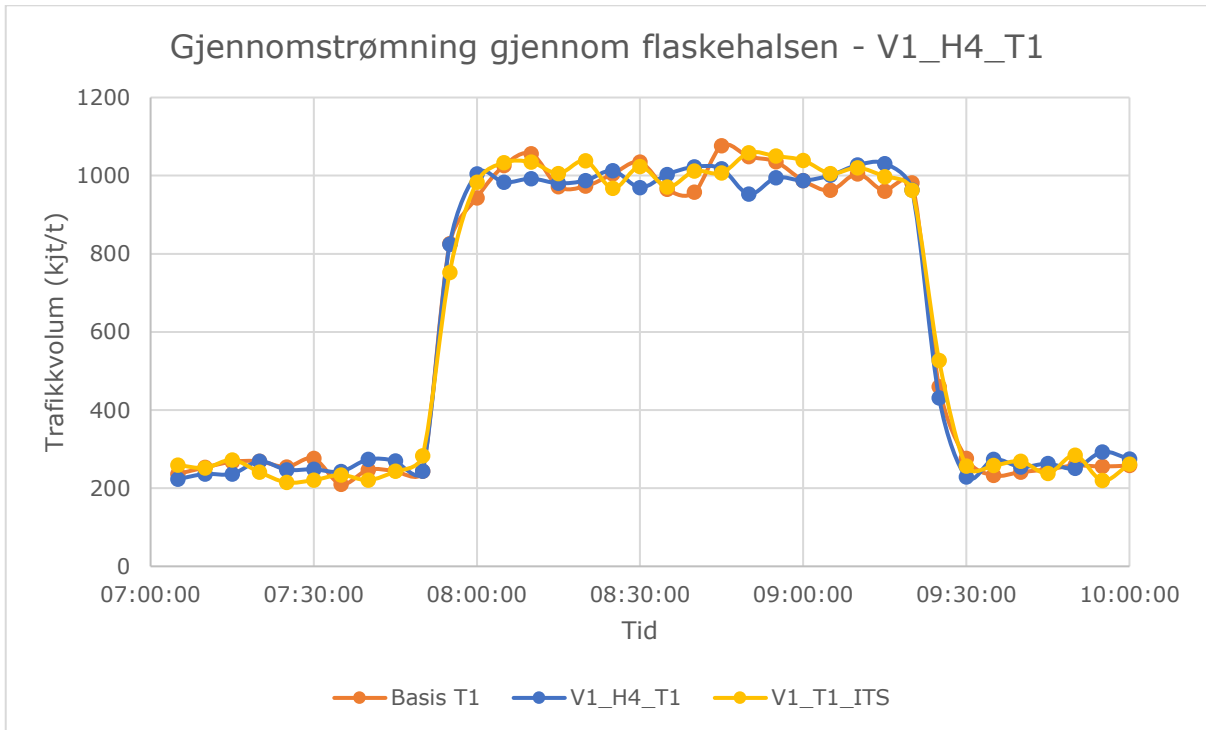
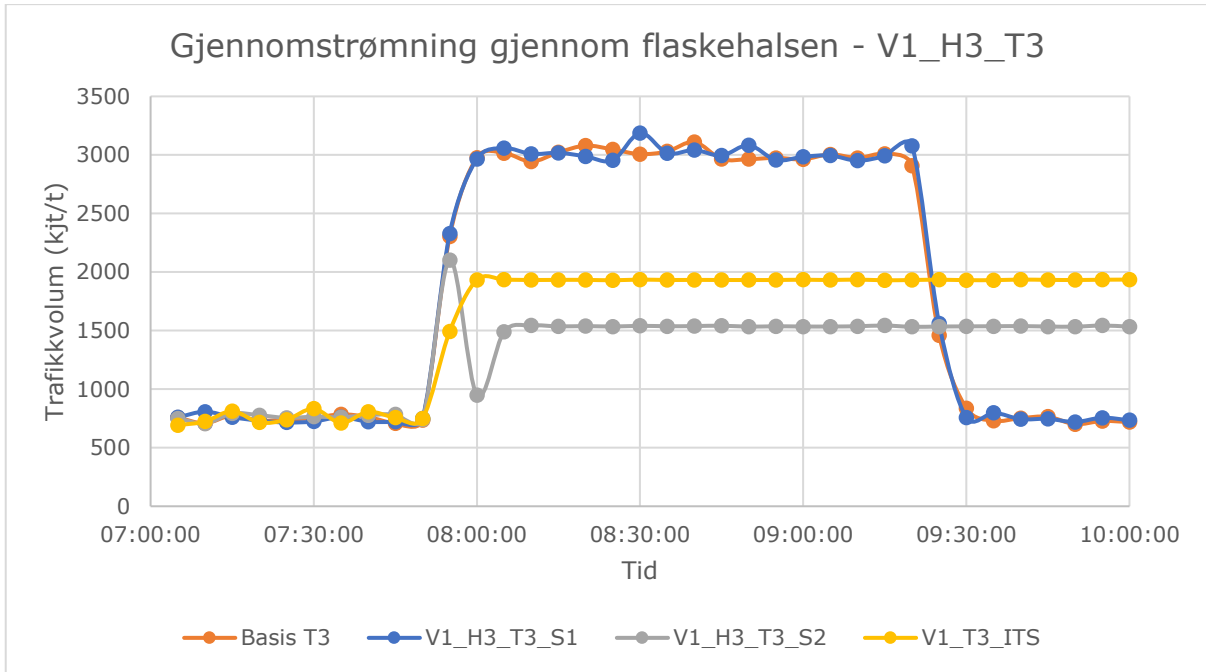
D1

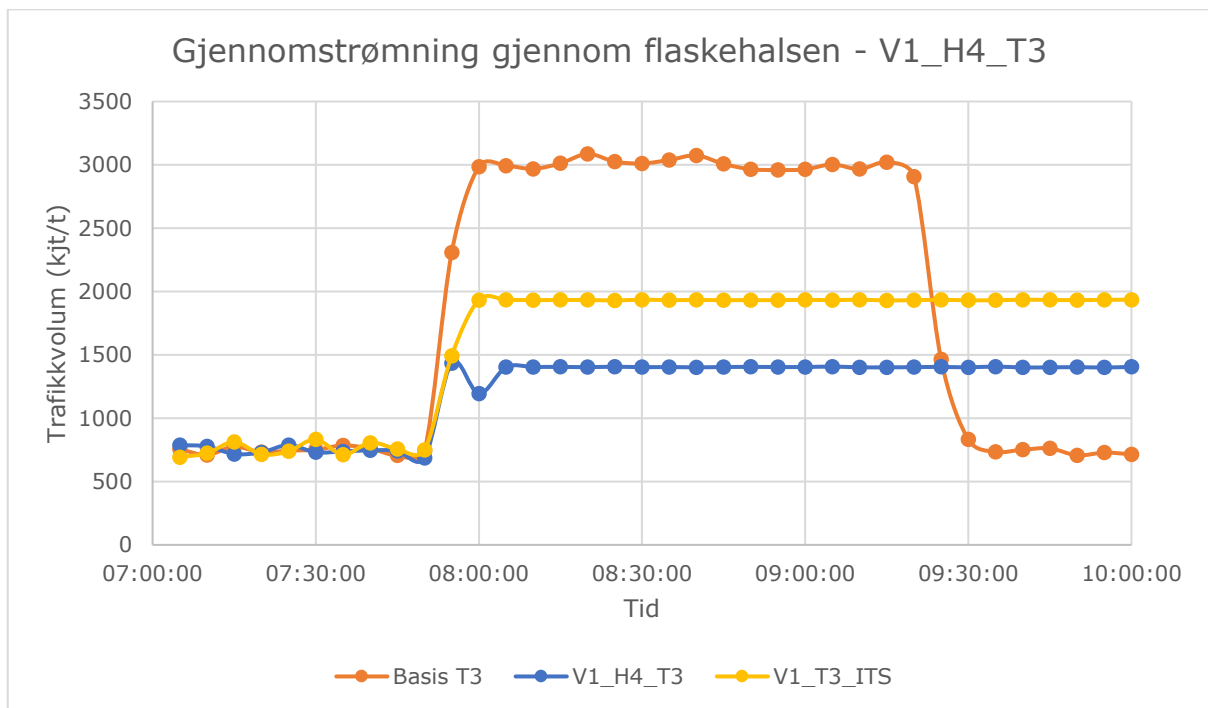
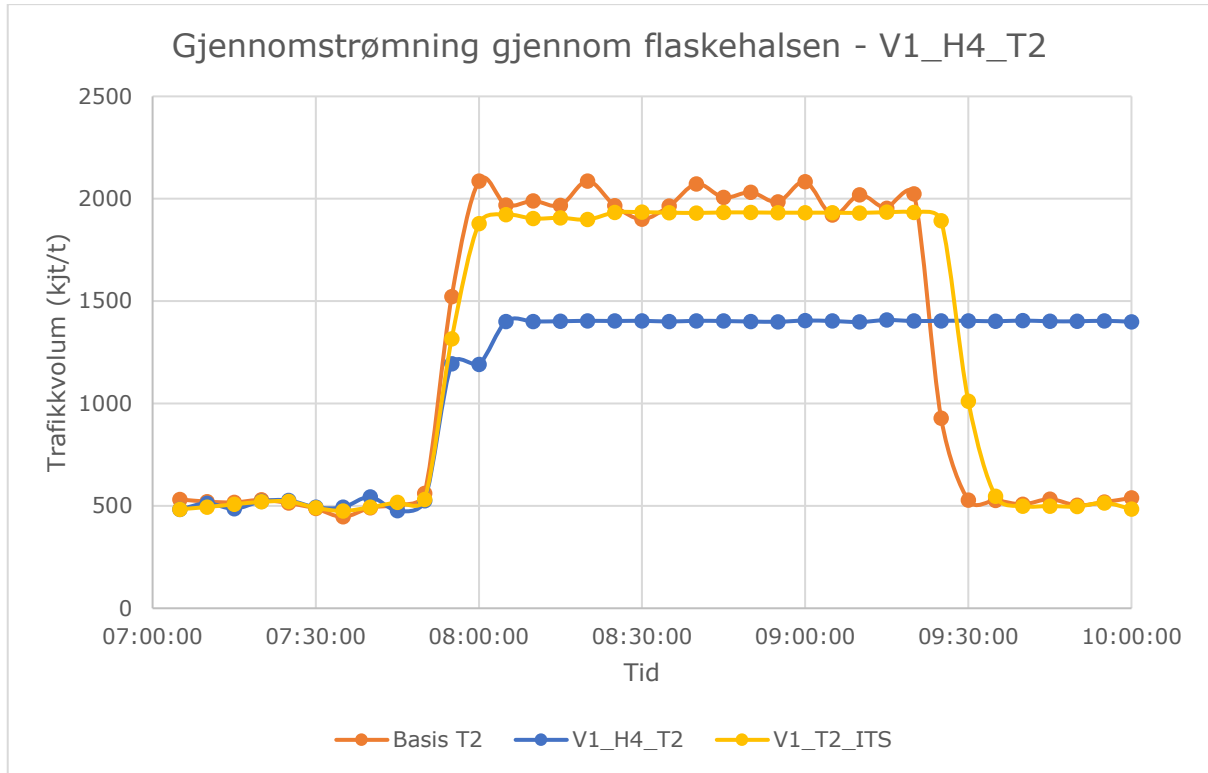




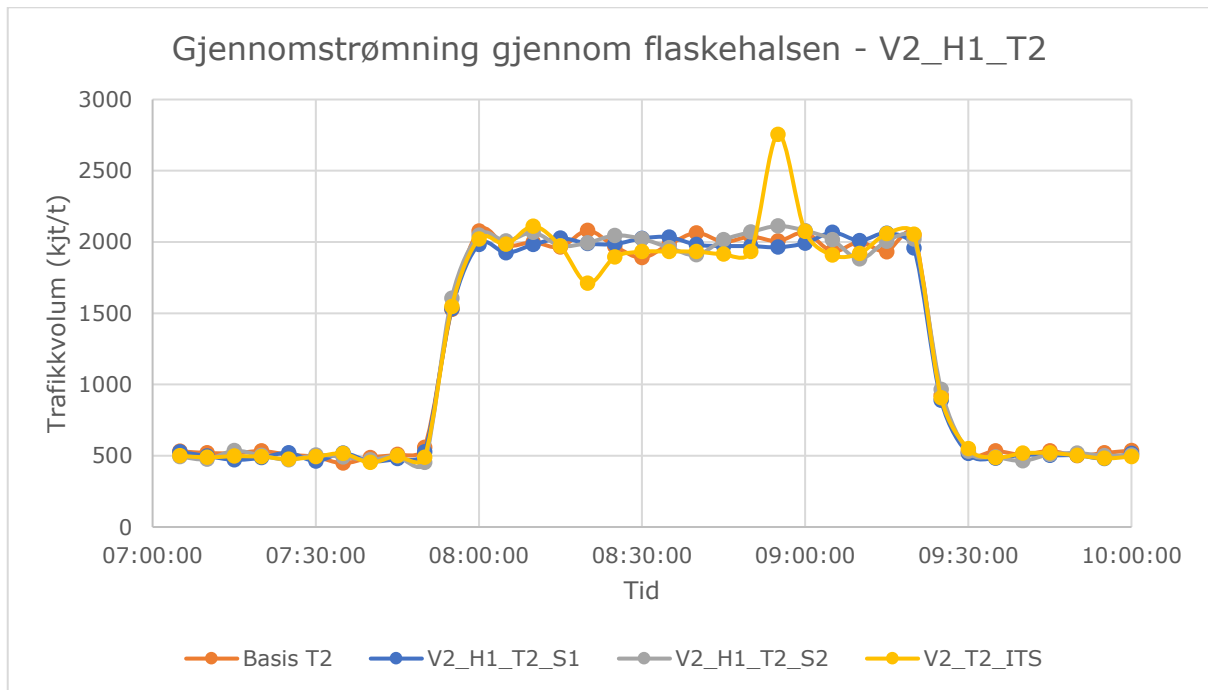
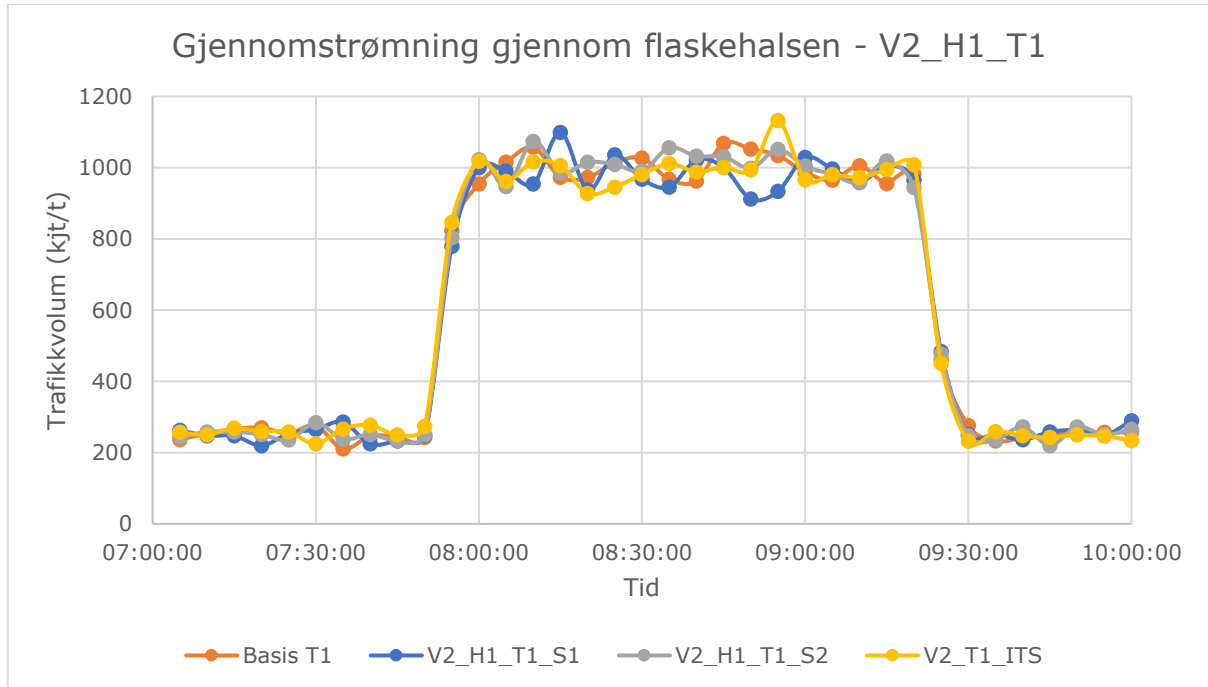


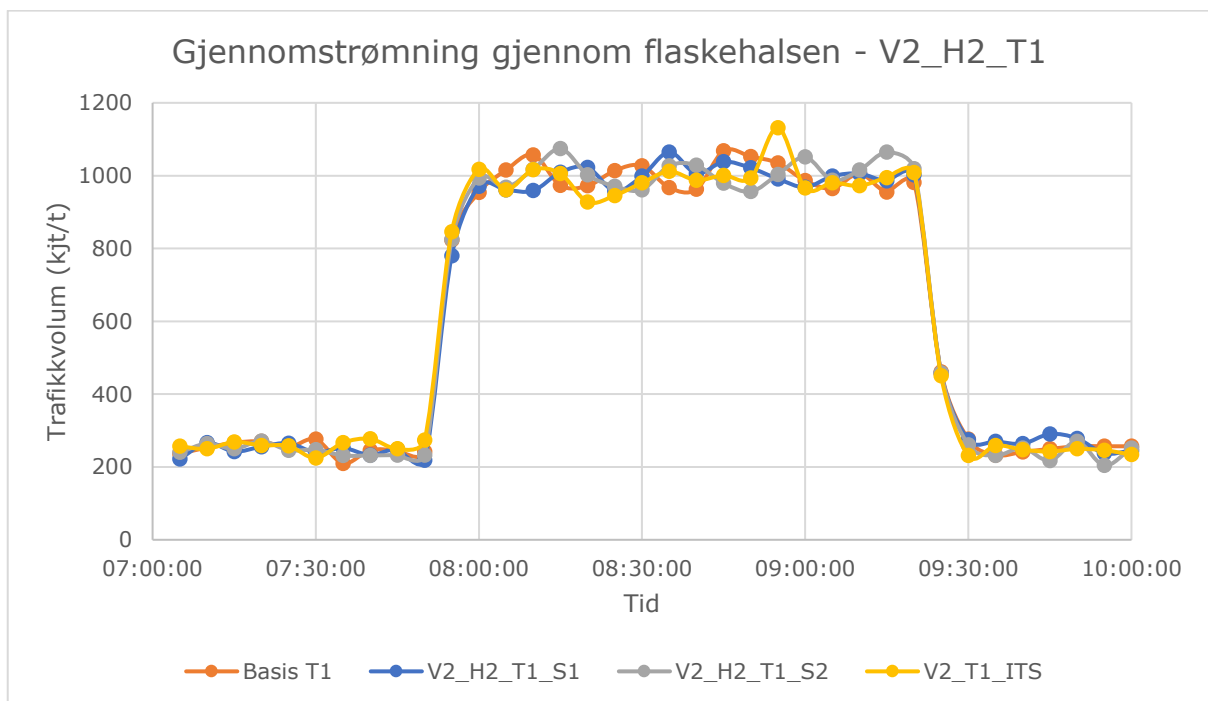
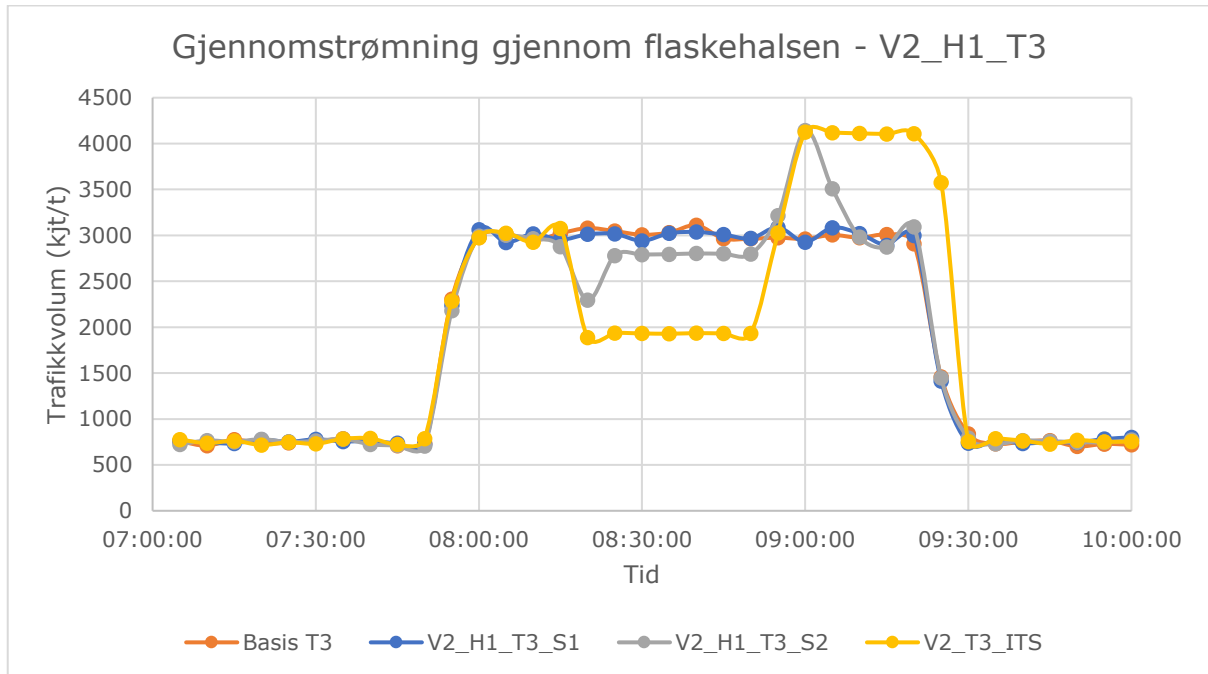


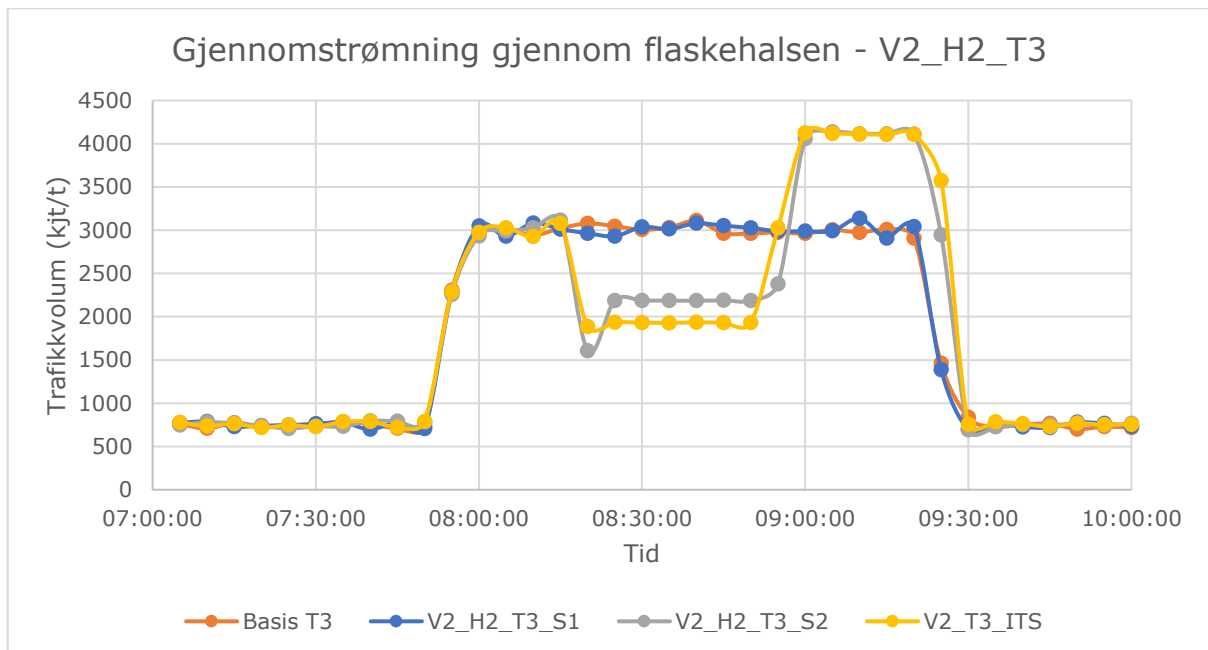
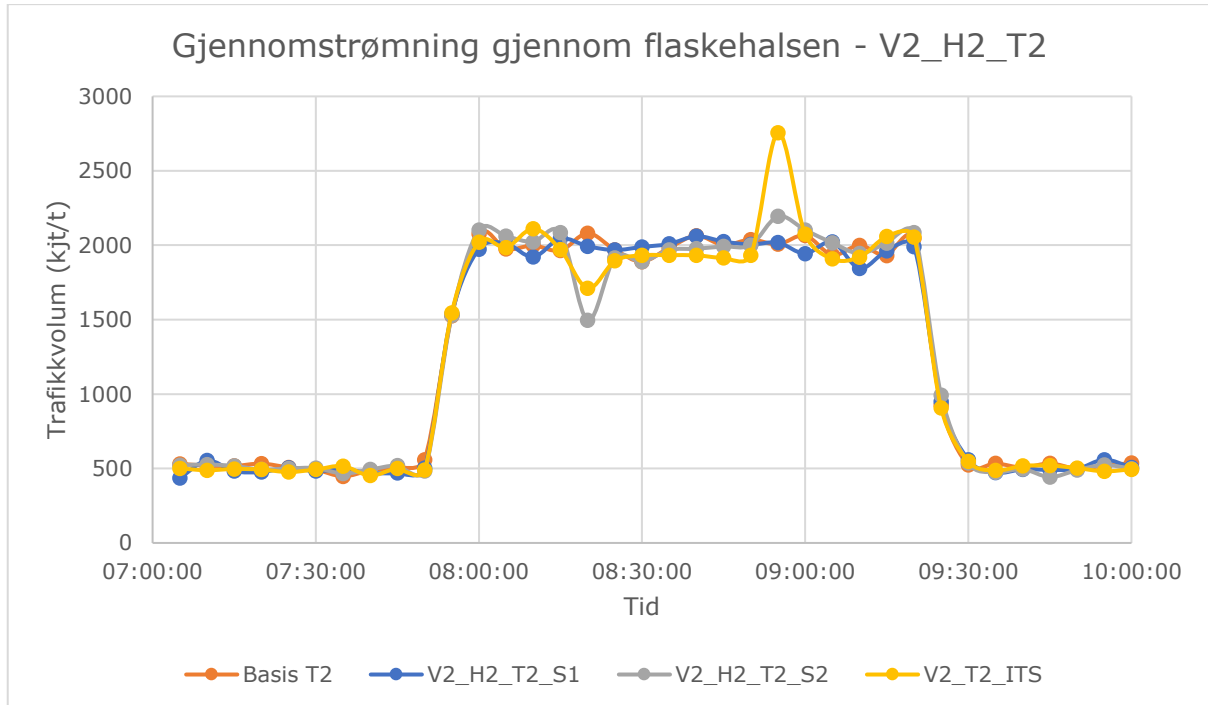


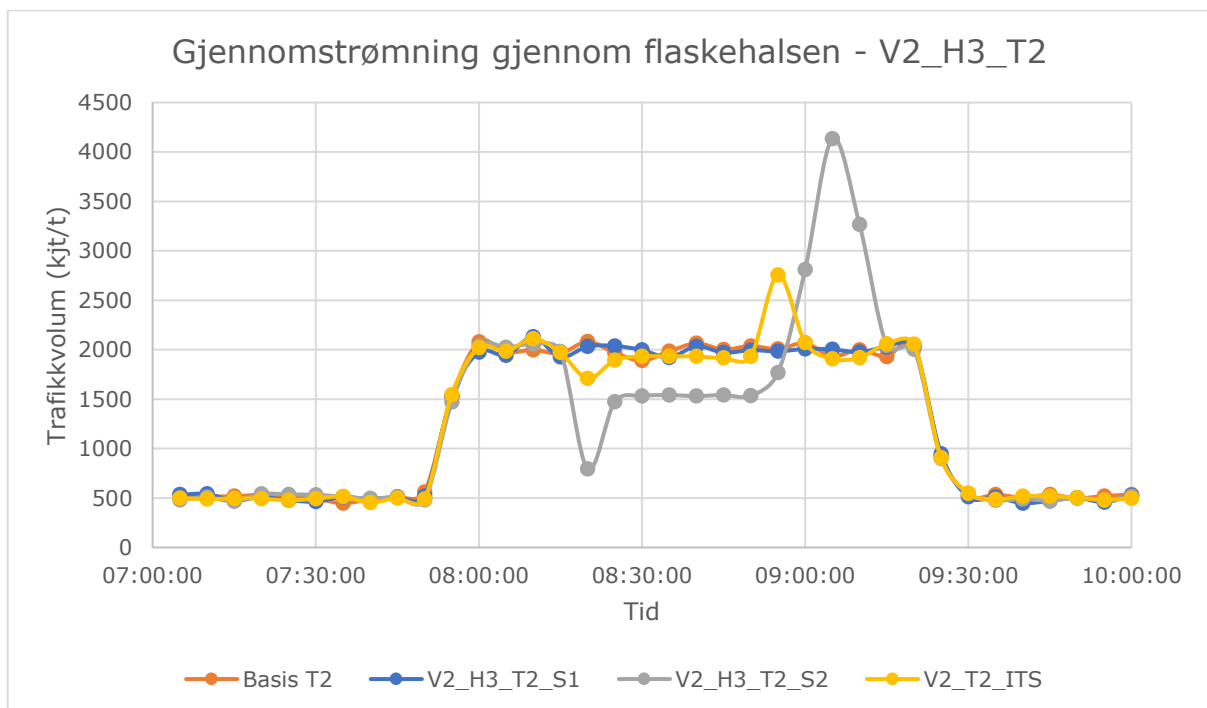
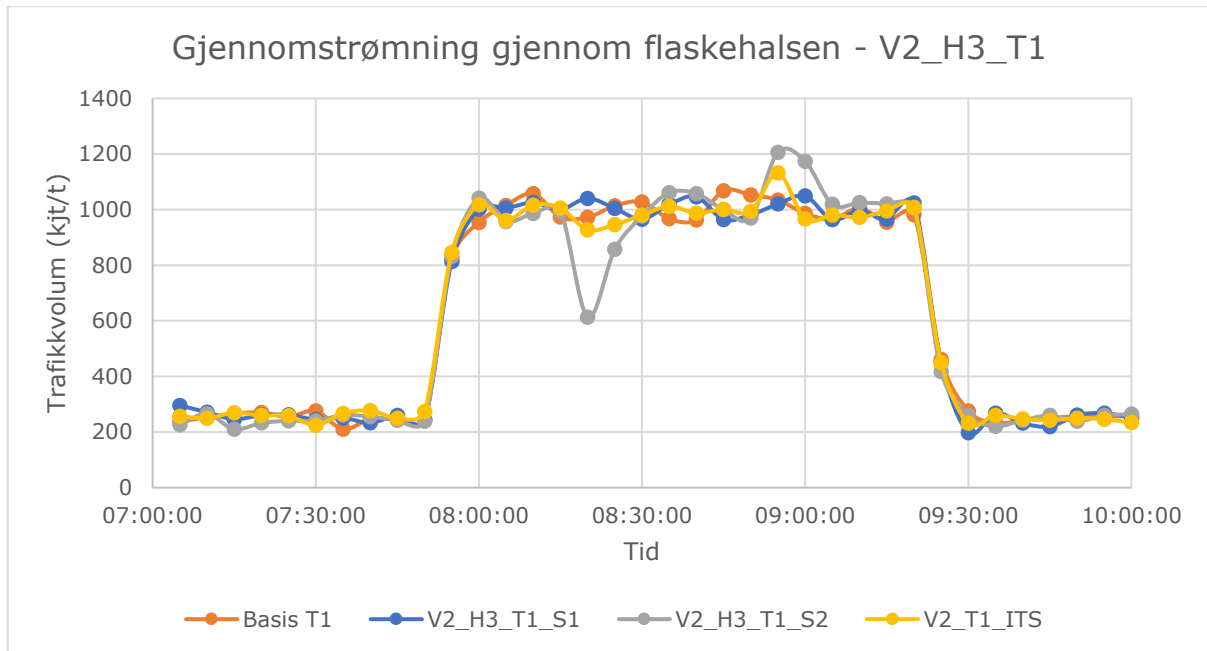


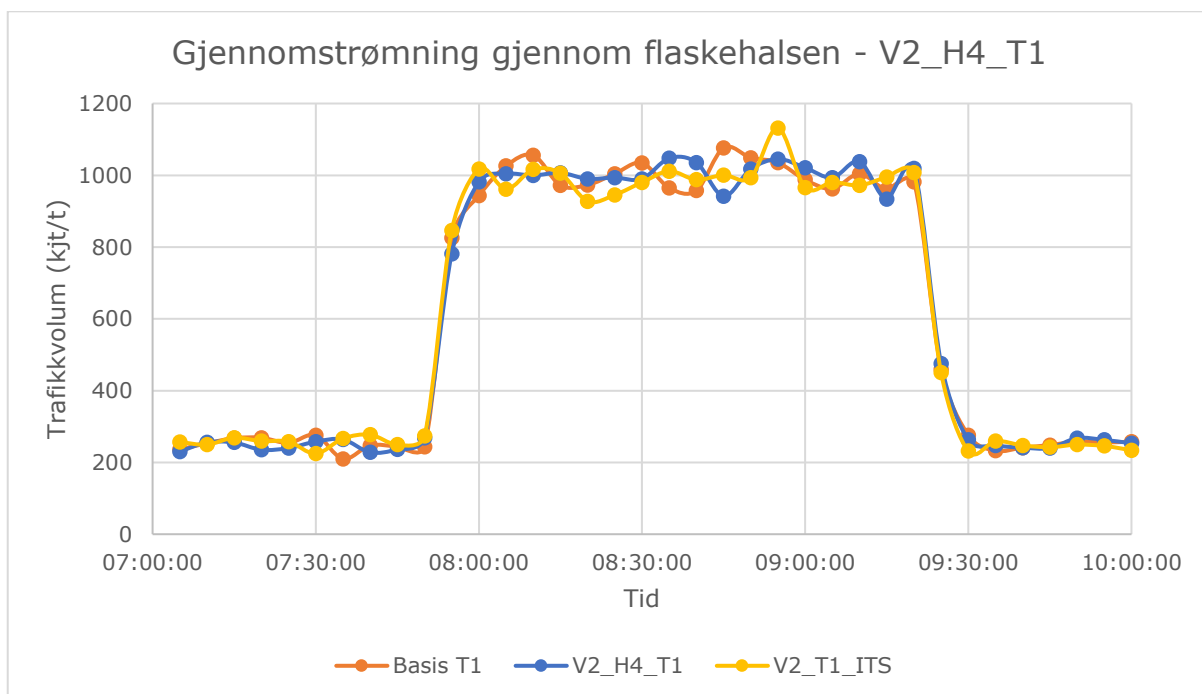
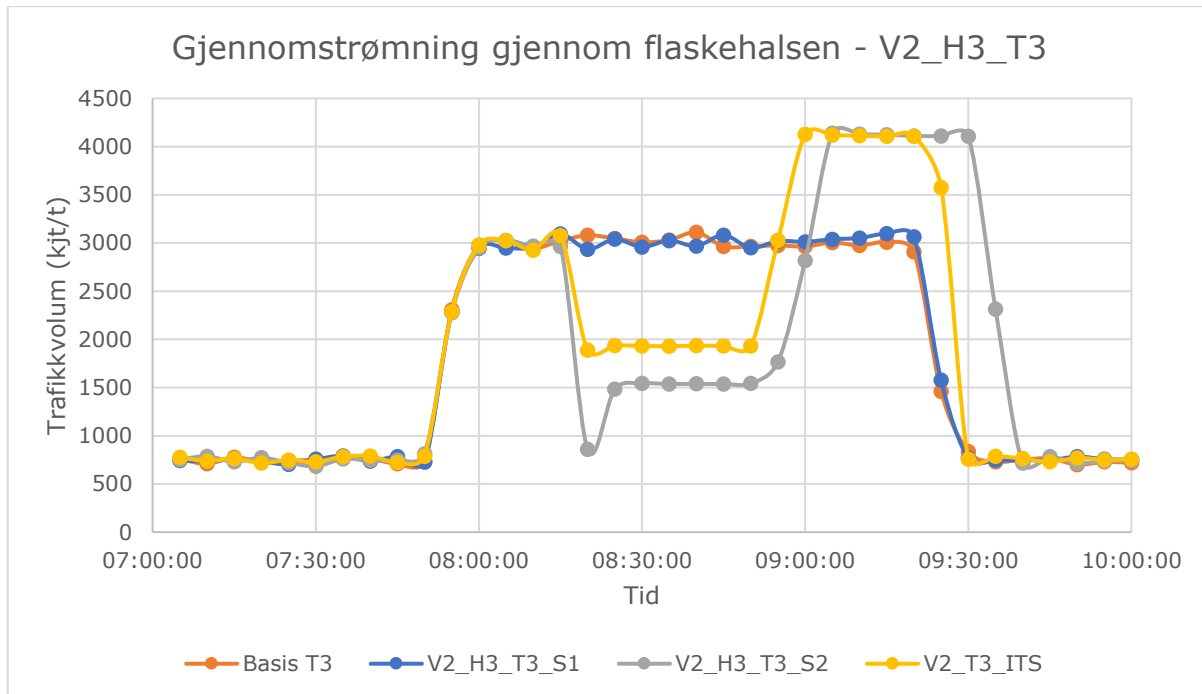


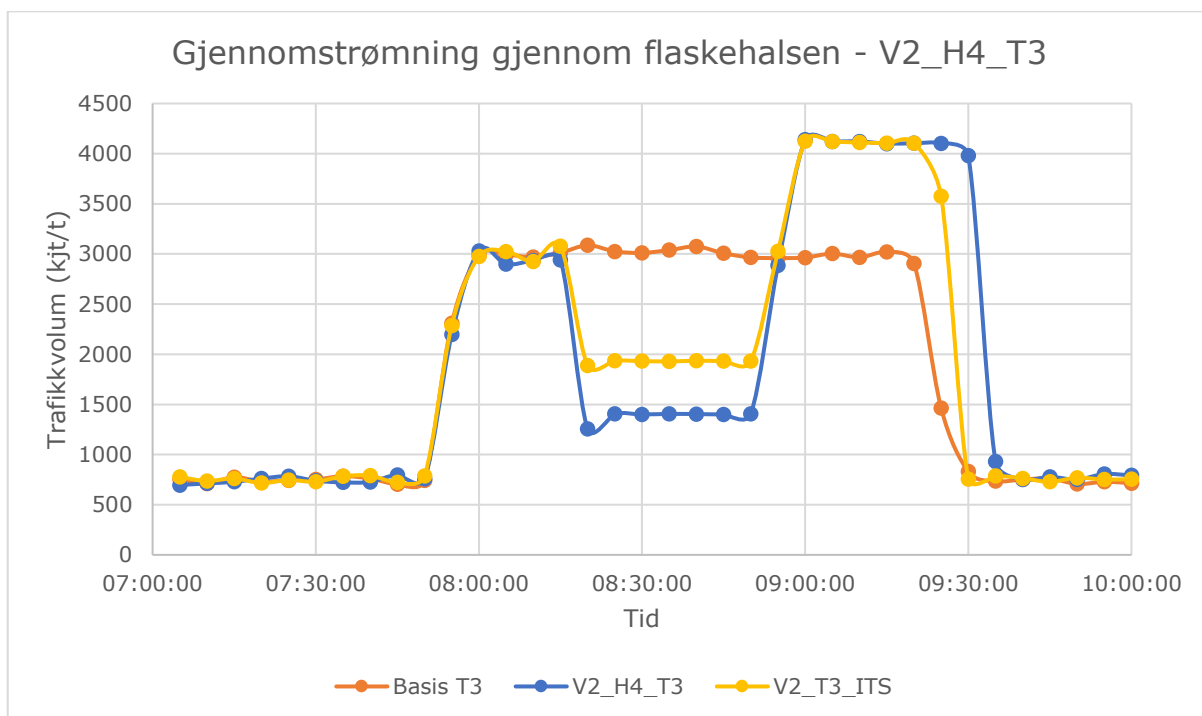
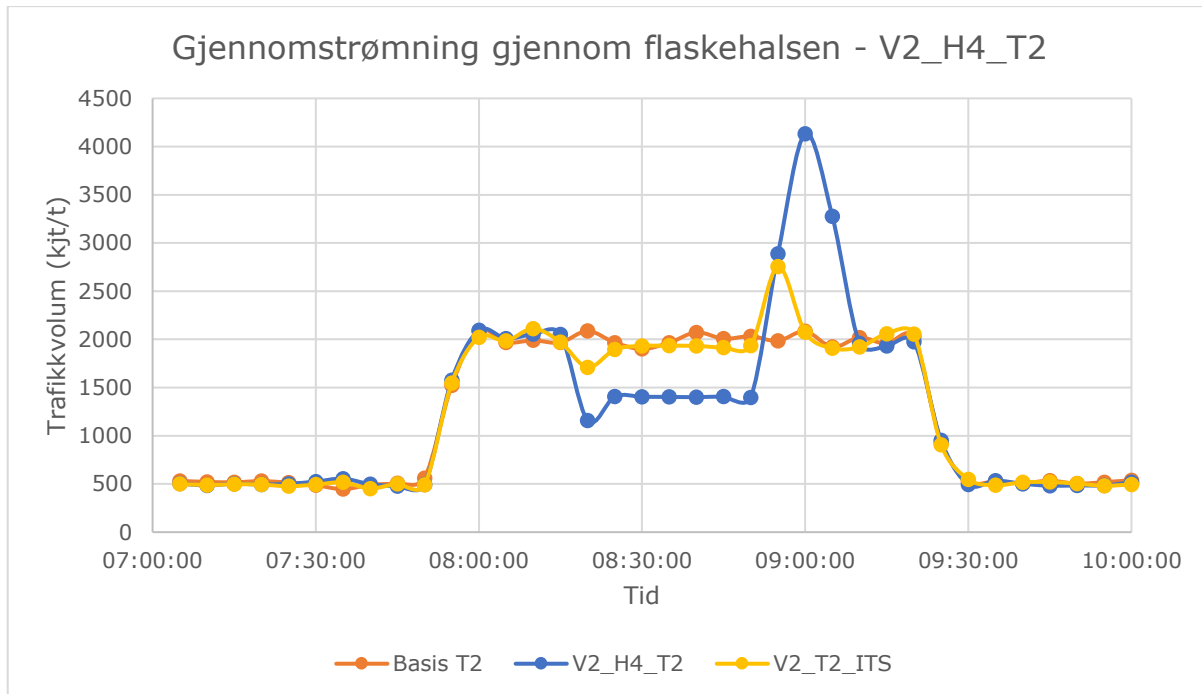












## **Vedlegg E** – *Oversikt over digitale vedlegg*

- **Masteroppgave\_Analyse.ang** - Aimsun-modellen som har produsert resultatene i oppgaven
- **Vedlegg\_justering av speed-flow.xlsx** - Excel-dokument for justering av speed-flow forhold
- **Vedlegg\_V#\_H#.xlsx** - Resultater av simuleringene av de ulike scenarioene. Hvert dokument er resultatene for kombinasjonen av varighet og hendelse.
- **Prosjektoppgave\_SiriVJensen.pdf** – Prosjektoppgaven utviklet som et forarbeid til masteroppgaven høsten 2020

