



Forord

Vi ønsker å rette en stor takk til våre veiledere professor Ole Gjølberg og førsteamanuensis Marie Steen for god veiledning gjennom skriveprosessen. Videre vil vi takke Ola Madsstuen for hjelp under observasjon i Moss. Vi vil også takke alle som har vært med på å lese, og som har kommet med innspill underveis, det har vi satt stor pris på.

Ås, 11.05.2015

Anders J. Broch

Lars E. Fors

Sammendrag

Daglig opplever Moss at veinettet deres ikke strekker til i forhold til ankommende kjøretøy, et problem som blir forverret av en støtvis fergeankomst fra Bastø Fosen. I denne masteroppgaven har vi analysert trafikkflyten for hovedvegssystemet i Moss, i tillegg til å undersøke effekten av tiltak for å forbedre trafikkflyten. Problemstillingen vi har besvart er:

«Hva er resultatet av en køteoretisk tilnærming til trafikkflyten i flaskehalsene mellom fergetermet og E6?»

Det har i den sammenheng blitt sett på to tiltak. Det ene er en økning av hovedveisystemets kapasitet, herunder en ekstra kjørefil i veinettet, og det andre er flytting av fergetrafikken fra hovedveistrekket.

Tallenes tale er klare og sier at noe burde gjøres for å redusere køproblemene i Moss. Gjennom våre analyser har vi kommet frem til at begge tiltakene kan anbefales, da de har en positiv effekt på trafikkflyten. Av de to tiltakene var det en økning av kapasiteten som var mest effektiv.

Executive summary

Moss is experiencing a daily struggle with their road network being inadequate in the handling of arriving vehicles, a problem that is exacerbated by an intermittent ferry arrival from Bastø Fosen. In this Master Thesis, we have analyzed the traffic flow for the main thoroughfare of Moss, in addition to examining the effect of different measures to improve the traffic flow. The research question we sought to answer was:

“What is the result of a queue theoretical approach to the traffic flow in the bottlenecks between the ferry port and E6?”

In that context, we have looked at two measures. The first being an expansion of the main thoroughfare’s capacity, meaning an extra driving lane in the road network, and the second being a relocation of the ferry traffic.

The results are unambiguous in that something should be done to reduce the congestion problems in Moss. Through our analysis, we concluded that both measures could be recommended as they have a positive effect on the traffic flow. Between the two measures, an increase in the capacity was the most effective.

Innhold

Sammendrag	iii
Executive summary	iv
Tabell-liste	vi
Figurliste	x
1. Innledning	1
1.1 Problemstilling og hypoteser	2
1.2 Oppbygging av oppgaven	3
2. Grunnleggende køteori	3
2.2 Svakheter med teorien	14
3. Foreliggende litteratur der køteori anvendes på trafikkproblemer	14
4. Data for trafikkstrømmene gjennom Moss	20
4.1 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	21
4.2 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	23
4.3 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	24
4.4 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet.....	26
4.5 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen Mosseporten.....	27
5. Analyse av flaskehalsene i Moss	28
5.1 Analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av enkle modeller ...	28
5.2 Analyse av dagens trafikkavvikling	32
5.3 Analyse av en utvidelse av hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 Nord	58
5.4 Analyse av en flytting av hovedfartsåren til tunnel under Moss og utvidelse av Mosseporten fra to til fire kjørefelt.....	66
6. Sensitivitetsanalyse: Resultatene dersom forutsetningene endres	74
6.1 Endring i koeffisienten for variasjon til interankomsten, <i>CVA</i>	74
6.2 Endring i koeffisienten for variasjon til betjeningstiden, <i>CVS</i>	76

6.3	Endring i ankomsten	77
6.4	Endring i betjeningen.....	79
7.	Simulering med Arena.....	80
8.	Konklusjoner, anbefalinger og fremtidig forskning	86
	Litteraturliste.....	89

Tabell-liste

Tabell 1: Symboloversikt	5
Tabell 2: Oversikt over serveregenskaper	7
Tabell 3: Oversiktstabell for Kendall's notasjoner	11
Tabell 4: Oversiktstabell over egenskaper for fordeling av ankomst og betjeningstid	11
Tabell 5: Oversiktstabell for benevnelser og formler i køteori for en ubegrenset kapasitet ..	12
Tabell 6: Oversiktstabell for benevnelser og formler i køteori for en begrenset kapasitet	14
Tabell 7: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen 21. og 26. januar 2015.....	21
Tabell 8: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen 23. og 27. januar 2015.....	23
Tabell 9: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet 20. og 28. januar 2015.....	25
Tabell 10: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet 19. og 29. januar 2015.....	26
Tabell 11: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen Mosseporten 30. januar og 2. februar 2015.....	27
Tabell 12: Input og resultater ved bruk av $M M 1$ modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	28
Tabell 13: Input og resultater ved bruk av $M M 2$ modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	29
Tabell 14: Input og resultater ved bruk av $M G 1$ modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	29

Tabell 15: Input og resultater ved bruk av M G 1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	29
Tabell 16: Input og resultater ved bruk av M G 1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	30
Tabell 17: Input og resultater ved bruk av M D 1 modellen på flaskehalsen	30
Tabell 18: Input og resultater ved bruk av M E 1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med form parameter = 1	31
Tabell 19: Input og resultater ved bruk av M E 1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med form parameter = 2	31
Tabell 20: Input og resultater ved bruk av M E 1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med form parameter = 3	31
Tabell 21: Input i M M 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	33
Tabell 22: Resultater fra M M 2 K analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen	34
Tabell 23: Input for 100 simuleringer av G G 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.....	35
Tabell 24: Resultater fra G G 2 K analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen	36
Tabell 25: Input i M M 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen.....	38
Tabell 26: Resultatene av en simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en M M 2 K-modell.....	38
Tabell 27: Input i en G G 2 K- modell for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	39
Tabell 28: Resultat for G G 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen.....	40
Tabell 29: Input til M M 1 K-modellen for kjørefelt øst til nord for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	42
Tabell 30: Resultater til M M 1 K-modellen for kjørefelt øst til nord for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	42
Tabell 31: Input til M M 2 K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest i flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet	42
Tabell 32: Resultater fra M M 2 K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet	43
Tabell 33: Input til M M 3 K-simulering for kjørefeltene vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	43

Tabell 34: Resultater fra M M 3 K-simulering for kjørefeltene vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	44
Tabell 35: Input til G G 1 K-simulering for kjørefeltet øst til nord i flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	45
Tabell 36: Resultater fra G G 1 K-simulering for kjørefeltet øst til nord for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	45
Tabell 37: Input til G G 2 K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	46
Tabell 38: Resultater fra G G 2 K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	46
Tabell 39: Input til G G 3 K-simulering for kjørefeltene fra vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	47
Tabell 40: Resultater fra G G 3 K-simulering for kjørefeltene fra vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet.....	47
Tabell 41: Input til M M 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet	49
Tabell 42: Resultater fra simulering av M M 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet.....	50
Tabell 43: Input til simulering med G G 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet.....	51
Tabell 44: Resultater av simulering med G G 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet	51
Tabell 45: Input til simulering med M M 2 K-modellen for flaskehalsen Mosseporten	53
Tabell 46: Resultatet av analysen for flaskehalsen Mosseporten med en M M 2 K-modell	53
Tabell 47: Input til simulering med G G 2 K-modellen for flaskehalsen Mosseporten	54
Tabell 48: Resultatet av analysen for flaskehalsen Mosseporten med en G G 2 K-modell ..	55
Tabell 49: Input for en M G 1 K-modell for flaskehalsen Mosseporten med halvert trafikkflyt	56
Tabell 50: Resultatet av analysen for flaskehalsen Mosseporten med en M G 1 K-modell med halvert trafikkflyt.....	57
Tabell 51: Input til G G 3 K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen	58

Tabell 52: Resultater fra G G 3 K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen	59
Tabell 53: Input til G G 3 K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen.	60
Tabell 54: Resultater fra G G 3 K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen..	60
Tabell 55: Input til G G 4 K-simulering for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet fra øst til vest og vest til øst.....	61
Tabell 56: Resultater fra G G 4 K-simulering for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet fra øst til vest og vest til øst	62
Tabell 57: Input til G G 3 K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet	63
Tabell 58: Resultater fra G G 3 K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet.....	63
Tabell 59: Input til G G 4 K-simulering når flaskehalsen Mosseporten blir utvidet med 2 kjørefelt	64
Tabell 60: Resultater fra G G 4 K-simulering når flaskehalsen Mosseporten blir utvidet med 2 kjørefelt	65
Tabell 61: Input til G G 2 K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet	67
Tabell 62: Resultater fra G G 2 K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet	68
Tabell 63: Input til G G 2 K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet	69
Tabell 64: Resultater fra G G 2 K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet	69
Tabell 65: Input til G G 3 K-simulering av flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet	70
Tabell 66: Resultater fra G G 3 K-simulering av flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst når fergetrafikken er flyttet ut av systemet.....	71
Tabell 67: Input til G G 2 K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet.....	72
Tabell 68: Resultater fra G G 2 K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet.....	72

Tabell 69: Input til sensitivitetsanalyse for variasjonen til interankomsten	74
Tabell 70: Input til sensitivitetsanalyse på koeffisienten for variasjon til betjeningstiden	76
Tabell 71: Input til sensitivitetsanalyse for variasjonen i ankomstraten for Kanalen.....	77
Tabell 72: Inputet ved endring av betjeningsraten for flaskehalsen Kanalen	79

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av Statens vegvesen sitt forslag til utbedring av veisystemet (Vinje 2015)	1
Figur 2: Et eksempel på et køsystem. Kunder kommer til en server, hvor de blir betjent. Når en kunde er ferdigbehandlet vil kunden forlate serveren, slik at neste kunde kan bli betjent.	5
Figur 3: Poisson-fordeling.....	8
Figur 4: En Erlang-fordeling.....	10
Figur 5: Oversiktsfigur for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen	21
Figur 6: Oversiktsfigur for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	23
Figur 7: Oversiktsfigur for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet	24
Figur 8: Oversiktsfigur for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet	26
Figur 9: Sannsynlighetsfordeling for antall biler i systemet ved 100 simuleringer av $M M 2 K$ -modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.	34
Figur 10: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet ved 100 simuleringer av $G G 2 K$ -modellen ved flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen	37
Figur 11: Sannsynlighetsfordeling for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med en $G G 2 K$ - og $M M 2 K$ -modellene ved 100 simuleringer sammenlignet	37
Figur 12: Sannsynlighetsfordeling av antall biler i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en $M M 2 K$ -modell	39
Figur 13: Sannsynlighetsfordeling av antall biler i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en $G G 2 K$ -modell.....	40
Figur 14: Sannsynlighetsfordelingene av antall biler for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en $G G 2 K$ -modell og en $M M 2 K$ -modell sammenlignet.....	41
Figur 15: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet for $M M 3 K$ -simulering av kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	44
Figur 16: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet for $G G 3 K$ -simulering av kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	48

Figur 17: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet sammenlignet for M M 3 K- og G G 3 K-simuleringene av kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet	48
Figur 18: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy med simulering av M M 2 K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet.....	50
Figur 19: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet med simulering av G G 2 K-modellen	52
Figur 20: Sannsynlighetsfordelingene for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet med M M 2 K- og G G 2 K- modellene	52
Figur 21: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet med en M M 2 K-modell for flaskehalsen Mosseporten	54
Figur 22: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet med en G G 2 K-modell for flaskehalsen Mosseporten	55
Figur 23: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet sammenlignet for M M 3 K- og G G 3 K-simuleringene for flaskehalsen Mosseporten	56
Figur 24: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen sammenlignet for 2- og 3-server systemer.	59
Figur 25: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i to- og tre-server systemene for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen sammenlignet	61
Figur 26: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i tre- og fire-server systemene for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet i kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst	62
Figur 27: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet sammenlignet for to- og tre-server systemene for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet sammenlignet .	64
Figur 28: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet ved simulering av to- og fire-server systemene for flaskehalsen Mosseporten	65
Figur 29: Illustrasjon av Statens vegvesen sitt forslag til utbedring av veisystemet (Vinje 2015).	67
Figur 30: Sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved simuleringen med og uten trafikken til og fra fergeleiet	68
Figur 31: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet ved G G 2 K-simuleringene med og uten trafikken til og fra fergeleiet	70

Figur 32: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst med og uten fergetrafikken.	71
Figur 33: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet ved G G 2 K-simuleringene med og uten trafikken til og fra fergeleiet ...	73
Figur 34: Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter med endring i koeffisienten for variasjonen til interankomsten	75
Figur 35: Gjennomsnittlig ventetid i sekunder ved endring i koeffisienten for variasjon til interankomsten	75
Figur 36: Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter med endring i koeffisienten for variasjonen til betjeningstiden	76
Figur 37: Gjennomsnittlig ventetid i sekunder ved endring i koeffisienten for variasjon til betjeningstiden.....	77
Figur 38: Sannsynlighet for kø med mer enn 50 bilister som venter med en endring i ankomstraten for Kanalen.....	78
Figur 39: Gjennomsnittlig ventetid i sekunder ved endring i ankomstraten for Kanalen	78
Figur 40: Sannsynlighet for mer enn 50 kjøretøy som venter ved flaskehalsen Kanalen ved endring av betjeningsraten	79
Figur 41: Gjennomsnittlig ventetid for flaskehalsen Kanalen ved endring av betjeningsraten	80
Figur 42: Arena-oppsett av innkjøring sør for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	81
Figur 43: Arena-oppsett av selve rundkjøringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	82
Figur 44: Arena-oppsett av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	83
Figur 45: Simuleringsresultater fra Arena for kjøretøy i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	84
Figur 46: Simuleringsresultater fra Arena for køer i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen	85

1. Innledning

Strekningen fra Moss sentrum til E6 opplever til stadighet kødannelse som følge av støtvis ankomst fra fergesambandet mellom Horten og Moss. Denne oppgaven som tar for seg flaskehalsene i systemet som fører til en slik kødannelse og vise resultatet av tiltak for å redusere slike kødannelser. Flaskehalsene er rundkjøringene ved kanalen og Kransen, lyskrysset og rundkjøringen ved Flemminghjørnet, og Mosseporten. Vi vil ikke se på kostnader av å gjennomføre eventuelle tiltak og hvordan disse burde bli fordelt. Tallmateriale kan sendes interesserte ved forespørsel.



Figur 1: Illustrasjon av Statens vegvesen sitt forslag til utbedring av veisystemet (Vinje 2015)

Av den totale trafikken utgjør fergetrafikken en mindre andel. I 2011 var den beregnet til ca. 3300 kjøretøy per døgn i januar, økende til ca. 6200 i juli, før det avtar frem til desember. Ettersom tilførselen fra fergesambandet kommer støtvis påvirkes trafikkbildet. Dette kan medføre at selv om fergetrafikken kun utgjør mellom ca. 17% og 30% av den totale trafikkstrømmen så kan denne trafikken være en vesentlig årsak til køproblemet. Samtidig har fergesambandet Horten-Moss ulik avgangsfrekvens i løpet av dagen og ingen avganger 24:00-05:00 (Rutetider 2015). Ved utarbeidelsen av KVVU (2012) ble det registrert forsinkelser mellom Patterød og fergeleiet på ettermiddagen. Tidsforsinkelsene ble målt onsdag 17. og

Statens vegvesen har på oppdrag fra Samferdselsdepartementet utarbeidet en konseptvalgutredning (heretter KVVU) for hovedvegsystemet i Moss og Rygge (KVVU 2012). Analysene i KVVU tar utgangspunkt i årsdøgntrafikk (heretter ÅDT) (Weum et al. 2012). Ved bruk av nummerskiltregistrering ble det kartlagt ÅDT som viser at hovedtyngden av trafikken fra havneområdet går til Patterødkrysset, E6 Nord, med 20500 kjøretøy per døgn (KVVU 2012, s.16). I KVVU anbefales tiltakene fremstilt i figur 1, til venstre.

torsdag 18. november, 2010, og er målt i forhold til uhindret ferdsel på strekningen, som tar ca. 6 minutter. De maksimale forsinkelsene er på henholdsvis 4 minutter og 56 sekunder til, 11 minutter 9 sekunder fra havna. Kollektivtrafikk til og fra Moss sentrum blir også berørt ettersom den bruker det samme veinettet som øvrig trafikk. ÅDT som utgangspunkt kan by på problemer ettersom det er mindre trafikk på visse tider av døgnet. For å analysere systemets begrensninger tar vi i denne oppgaven derfor utgangspunkt i perioden med høyest belastning på vegnettet, nemlig 15:00-17:00 (Vågane 2011).

Som følge av at vi ser på andelen kjøretøy som passerer flaskehalsene i løpet av perioden med høyest belastning på vegnettet fremfor hele døgnet, får vi et klarere bilde av trafikkstrømmene og problemene. Analysene i denne oppgaven vil forhåpentligvis kunne brukes til å analysere trafikkproblemet og å gjennomføre tiltak for å redusere dette. Når vi senere i oppgaven ser på effektene av endringer i ankomst, betjening og variasjon vil ulike tiltak for å tydeliggjøre hvordan trafikkflyten kan forbedres. Det er spesielt viktig å være observant når det gjelder variasjon. Variasjon i ankomst og variasjon i betjeningstid er viktige faktorer for hvordan trafikkflyten er i et trafikksystem. Dette vil si at dersom alle kjøretøyene som kommer til en rundkjøring har ankomst med like lang tid mellom hver, og bruker like lang tid på å kjøre gjennom rundkjøringen, vil det være mindre sannsynlighet for at det oppstår kø, gitt at total ankomst for perioden er lavere enn betjeningsraten.

1.1 Problemstilling og hypoteser

I denne oppgaven vil vi forsøke å belyse hvordan en køteoretisk tilnærming til trafikkflyten i flaskehalsene mellom fergeleiet og E6 kan forklare trafikkproblemene som jevnlig oppstår i Moss sentrum. Problemstillingen kan bli fordelt på flere ulike hypoteser. Vi velger å fokusere på tre, vår hypotese 1 er at en begrenset reduksjon av ankomst til køsystemet vil redusere trafikkproblemene signifikant. Grunnen til at vi velger å fokusere på dette er at det kan være en effekt av tiltaket anbefalt av Statens Vegvesen i konseptvalgutredningen for hovedvegssystemet i Moss og Rygge (KVU 2012). Vår hypotese 2 er at en mindre variasjon i tiden det tar å passere flaskehalsene vil redusere problemet signifikant. Hypotese 2 tar for seg om sjåførene selv kan ta grep for å gjøre noe med køproblemene. Vår hypotese 3 er at en økning i kapasiteten til trafikksystemet vil redusere problemet signifikant. Hypotese 3 tar for seg et alternativt tiltak for å få bukt med køproblemene i hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6.

1.2 Oppbygging av oppgaven

Opgaven er bygget opp av 8 hovedkapitler. I introduksjonskapittelet har vi presentert et situasjonsbilde av trafikksystemet gjennom Moss sentrum i dag. I kapittel 2 vil vi gå gjennom grunnleggende køteori. Kapittel 3 er litteraturkapittel som tar for seg eksisterende funn i litteraturen vedrørende trafikkflyt. Kapittel 4 tar for seg trafikkflyten i de ulike flaskehalsene, og viser innsamlingen av data. I kapittel 5 foretar vi flere analyser av trafikkflyten gjennom flaskehalsene. Kapittel 5.1 er en gjennomgang av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med enkle modeller. I kapittel 5.2 foretar vi analyser av dagens trafikkavvikling i flaskehalsene ved bruk av avanserte modeller og simuleringer. I kapittel 5.3 analyseres trafikkavviklingen ved å utvide kapasiteten til flaskehalsene. I kapittel 5.4 analyserer vi effekten av en redusert ankomst til flaskehalsene. I kapittel 6 presenterer vi resultatene fra sensitivitetsanalysenes. Ved å bruke sensitivitetsanalyser vil vi forsøke å illustrere effekten av endringer i input til serverne, endringer i standardavvikene, og endringer som følge av en økning i kapasiteten til serveren. I kapittel 7 presenterer vi et mer avansert simuleringsprogram og gjennomfører en simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen. I kapittel 8 presenteres en oppsummering med konklusjoner.

2. Grunnleggende køteori

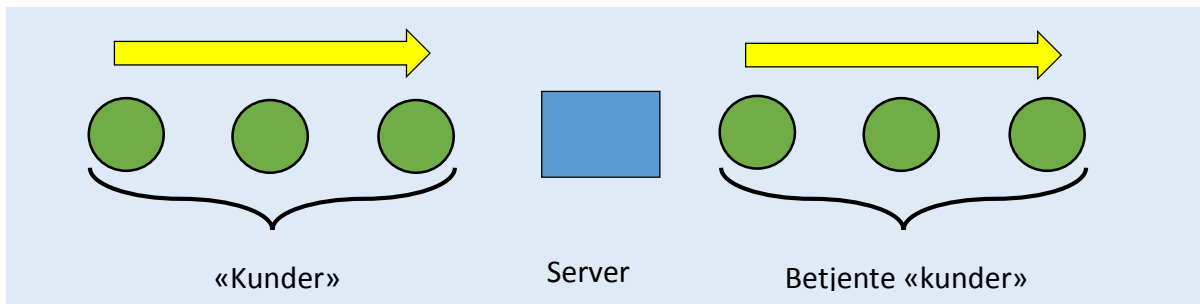
Vi vil i dette kapittelet, som et bakteppe for analyse av køproblemene i Moss, redegjøre for grunnleggende køteori. Kapittelet tar for seg den grunnleggende teorien og antakelsene bak metodene som vil bli benyttet under analysen. Det meste av teorien nevnt under dette kapittelet er dekket av de fleste innføringsbøker i operasjonsanalyse.

I bunn av nesten enhver teori om kø ligger det en grunnstein som bygger på en enkel interaksjon mellom to parter, henholdsvis «kunden» og «serveren». Kunden kan ses på som et individ som etterspør noe – en tjeneste – f.eks. å se en film på kino. Kunden er i vår oppgave de kjøretøy som benytter seg av veinettet i Moss, hvor tjenesten de etterspør er ønsket om å komme seg fra et sted til et annet. Serveren har som jobb å håndtere kundens etterspørsel – f.eks. å selge kinobilletter. Serveren er i oppgaven representert av veiene, rundkjøringene og lyskryssene gjennom Moss. Hvis den som selger kinobilletter bruker for lang tid per kunde, eller det plutselig kommer veldig mange kunder på en gang, kan det fort bli kø ved billettluken.

Kø er den fysiske manifestasjonen av kunders venting, og vil oppstå når det antallet som ønsket å benytte seg av en tjeneste er større enn serverens evne til å håndtere kundene. Om en kø oppstår, og om den blir større eller mindre avhenger generelt av to parametere, «ankomst» og «betjeningsrate». Ankomst er betegnelsen på hvor mange kunder det i gjennomsnitt kommer innen en gitt periode, for eksempel at det kommer 100 kunder til kinoluken per time. Betjeningsraten vil si noe om hvor mange kunder som i gjennomsnitt kan bli betjent av én server innenfor en gitt periode, for eksempel at én billettselger klarer å ferdigbehandle 80 kinokunder i løpet av en time. For å forbedre betjeningsevnen kan man øke antallet servere slik at man kan behandle flere kunder på samme tid. Å sette inn en ekstra server vil være det samme som å hyre inn en ekstra billettselger. Ankomst- og betjeningsrate benevnes som gjennomsnitt per tidsenhet fordi kundene kommer ofte sporadisk, og ikke i en jevn strøm. Det samme gjelder kundebehandling, hvor hver betjening kan ta lang eller kort tid avhengig av situasjonen. Vi forventer likevel at sannsynlighetsfordeling til ankomst og betjening er samlet rundt gjennomsnittet. Det innebærer at det er en ankomst- og betjeningsrate som er mer sannsynlig enn andre. Det kan komme flere eller færre kunder enn gjennomsnittet, men det antas å være mindre sannsynlighet for det. En køs kapasitet er enten uendelig eller endelig: Det er plass til uendelig mange kunder i køen, eller så er det begrenset plass i køen. I en kø med begrenset kapasitet vil noen kunder velge ikke å stille seg i køen i det hele tatt hvis køen er for lang.

Man kan se på antall kunder i en kø på to måter: én hvor man ser på hvor mange som er i køen, og én hvor man ser på hvor mange som er i systemet. Forskjellen ligger i at sistnevnte inkluderer kunder som blir betjent i tillegg til de som er i køen. Oppgaven vil se på hvor mange kjøretøy som er i systemet.

For å finne ut hvilke effekter man kan oppleve ved de forskjellige hypotesene, vil oppgaven benytte fremgangsmåter beskrevet under disiplinen køteori. Køteori er studiet av kø, hvor man benytter kømodeller for å representere ulike køsystemer, som eksemplifisert i figur 2, under. (Hillier & Hillier 2014, s. 433).



Figur 2: Et eksempel på et køsystem. Kunder kommer til en server, hvor de blir betjent. Når en kunde er ferdigbehandlet vil kunden forlate serveren, slik at neste kunde kan bli betjent.

Under vil vi forklare de ulike symbolene vi bruker under analysedelen.

Tabell 1: Symboloversikt

Antall kjøretøy blir representert av bokstaven n , og viser til hvor mange kjøretøy vi har observert. I begrepet har det ikke blitt hensyntatt kjøretøyets lengde, bredde eller antall passasjerer ombord. Hvor mange servere man har, blir betegnet av bokstaven s og gir en indikasjon på hvor mange kunder som systemet kan behandle samtidig. En rundkjøring med ett kjørefelt har én server, mens en rundkjøring med to felt har to servere. Samme prinsipp gjelder for veier og lyskryss. Hvor mange kjøretøy det totalt er plass til i køen er representert av bokstaven K . Hvor mange kjøretøy som i gjennomsnitt ankommer en server per tidsenhet,

Symbol Beskrivelse

n	Antall kjøretøy
s	Antall servere
K	Maksimalt antall plasser i systemet
λ	Forventet kjøretøyankomst
μ	Forventet betjeningshyppighet
L_q	Forventet antall i kø
L	Forventet antall i systemet
W_q	Forventet ventetid i kø
W	Forventet ventetid i systemet
ρ	Utnyttelsesgrad
P_n	Sannsynligheten for n i systemet
P_0	Sannsynligheten for 0 i systemet
σ	Standardavvik
CV_A	Variasjonskoeffisient for ankomst
CV_S	Variasjonskoeffisient for betjening
B_p	Sannsynlighet for at systemet er fullt / Prosentandeler som balkler
B_n	Antall kjøretøy som balkler

representeres av lambda (λ). Antall biler som én server i gjennomsnitt klarer å betjene per tidsenhet betegnes av my (μ). Bokstavene L_q og L viser henholdsvis hvor mange som venter i kø og hvor mange som venter i systemet. Bokstavene W_q og W viser forventet ventetid i kø og forventet ventetid i systemet. For å kunne si noe om hvor godt systemet yter, har vi den

greske bokstaven rho (ρ). For en uendelig kø vil ρ være hvor stort forholdet mellom ankomst (λ) og betjening multiplisert med antall servere ($\mu * s$) er. I tilfellet med endelig kø må man i tillegg trekke fra andelen som velger å forlate køen fra betjeningen. Ved en rho på mindre enn 1, vil det ikke dannes kø, ettersom evnen til å betjene er større enn antall ankommende kunder. Med en rho større enn 1 vil kødannelsen være større enn betjeningen av køen, hvor resultatet er større og større kø. Sannsynligheten for at n antall kjøretøy er i systemet, blir representert av P_n . For øvrig er utregningen av sannsynligheten for 0 i systemet forskjellig fra sannsynligheten for flere enn 0 i systemet. Det vil derfor bli benyttet to forskjellige symboler for sannsynlighet, henholdsvis P_0 og P_n . Standardavviket blir representert av sigma (σ). Variasjonskoeffisienten for ankomst og betjening, bruker henholdsvis symbolene CV_A og CV_S , som representerer forholdet mellom standardavviket og gjennomsnittet til den respektive variabelen (λ eller μ). Under antakelsen om endelig kø vil kunder ha muligheten til å ikke entre køen hvis de mener den er for lang, såkalt «balking». Sannsynligheten for at et kjøretøy ikke entrer køen (balking) har blitt satt lik sannsynligheten for at systemet er fullt og betegnes B_p . Hvor mange kjøretøy som balket er regnet ut som antall ankommende kjøretøy fratrukket den andelen som ikke balket, og betegnes B_n .

Benevnelsen på hvor ofte en kunde trer inn i en kø refereres til som ankomst, og blir ofte sett på som hvor mange kunder det i gjennomsnitt kommer. Forventet antall ankommende kunder har symbolet λ (lambda), hvor den gjennomsnittlige fordelingen av λ blir definert som:

$$\frac{1}{\lambda} = \textit{interankomst} \quad (1)$$

Tjenesten som en server tilbyr for å håndtere kundens etterspørsel, ses på som betjeningen. Tiden en server benytter på å betjene kunden blir referert til som betjeningstid. Hvor mange betjeninger en kontinuerlig opptatt server kan håndtere blir representert av symbolet μ (my), hvor forventet gjennomsnittlig betjeningstid er definert følgende:

$$\frac{1}{\mu} = \textit{gjennomsnittlig betjeningstid} \quad (2)$$

Et system av servere kan ha to forskjellige egenskaper: enkel-kanal og multippel-kanal, hvor kanalen(e) kan bli delt inn i en- og fler-fase (Hillier & Lieberman 2005, s. 767). Antall kanaler forteller hvor mange servere som kan håndtere køen på en gang. Antall faser angir hvor mange

serverledd kunden må gjennom for å komme ut av køen. De forskjellige egenskapene blir oppsummert i tabell 2, under.

Tabell 2: Oversikt over serveregenskaper

		Fase	
		En	Fler
Kanal	Enkel	Køen blir betjent av én server	Køen blir betjent av én rad av sammenkoblede enkeltservere
	Multipel	Køen blir betjent av flere servere	Køen blir betjent av flere rader av sammenkoblede servere

En server kan betjene kundene forskjellig: FCFS (first come, first serve), FIFO (first in, first out), LIFO (last in, first out), tilfeldig rekkefølge, prioritert rekkefølge med flere. Oppgaven legger til grunn de gjeldende trafikkregler i Norge og ser bort fra hasardiøs og nølende atferd i købildet. På bakgrunn av dette, vil det bli antatt en FCFS-rekkefølge.

Servere kan operere med to forskjellige prioriteter, preemptive og non-preemptive. Ved en preemptive kø, vil kunder med en høyere prioritet, som kanskje er lengre bak i køen, kunne komme før en med lavere prioritet. For eksempel ved et sykehus, kan en som har en akutt skade, komme før andre pasienter. Ved motsatt tilfelle, at alle har lik prioritet, er køen non-preemptive. Det er alltid en mulighet for at nødetaten vil ha behov for prioritet langs strekningen, men det antas at behovet vil inntreffe så sjeldent at det ikke kan ses på som en normal hendelse. Følgelig vil vi anta at køen er non-preemptive i våre analyser.

Kapasiteten til en kø kan enten være uendelig eller endelig. Situasjonen som strekningen opplever i dag sammenfaller med en endelig kø på grunn av en begrenset plass for kjøretøy. Hvordan endelige køer differensieres fra uendelige køer blir fremhevet under seksjonen *endelige køer*.

Fordelingen av kunder sier noe om i hvilke intervaller og med hvilken intensitet kundene ankommer og blir betjent i. Å velge en fordeling som gjengir trafikken i Moss ned til minste detalj vil ikke være mulig, da teorien kun representerer en forventet oppførsel. Vi søker likevel etter en modell som i størst mulig grad gjenspeiler trafikkbildet i Moss, for å få med det viktigste uten at påliteligheten blir satt på prøve.

De fire vanligste tilnærminger til fordeling av ankomst og betjening av kunder er generell-, deterministisk-, Erlang- og Poisson-fordeling.

2.1.1 Generell fordeling

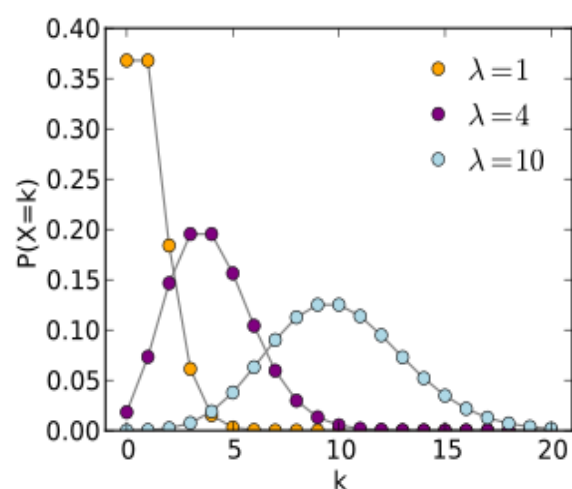
En generell fordeling antar en vilkårlig fordeling av en hendelse (Hillier & Lieberman 2005, s. 769). Analyseteknisk vil denne fordelingen skape noen problemer, da noen av resultatene man finner under en Poisson-fordeling ikke vil være tilgjengelig under en generell fordeling. Dette kommer av at det er enkelte resultater under en generell fordeling som mangler en «closed form»-løsning. En av disse utilgjengelige resultatene, er fremgangsmåten for å regne ut sannsynligheten mer enn 0 i systemet (P_n). Sannsynligheten for 0 i systemet (P_0) er så langt den eneste som har blitt regnet ut (Hillier & Hillier 2011, s. 451-52). Et annet hinder er at det i teorien ikke har blitt funnet en løsning til en generell fordeling for mer enn én server (Hillier & Lieberman 2005, s. 797). For å løse disse problemene, har det blitt foretatt simuleringer som en tilnærming til teorien. Den generelle fordelingen legger også vekt på et fast standardavvik, som i vårt tilfelle vil være gjenstand for stor variasjon. Det vil likevel være nyttig å benytte en slik fordeling under analysen, blant annet ved å kunne belyse mulige utfall ved ulike grader av trafikkintensitet.

2.1.2 Deterministisk fordeling

En deterministisk fordeling antar at antallet kjøretøy i systemet er forhåndsbestemt eller konstant. For en kømodell vil dette være uegnet, da man under ingen omstendigheter har mulighet til å forutsi nøyaktig hvor mange kjøretøy som vil benytte veinettet.

2.1.3 Poisson-fordeling

Poisson-fordelingen angir sannsynligheten for at en hendelse inntreffer innen et gitt intervall. Denne sannsynlighetsinndelingen baserer seg på antakelsene om en gjennomsnittlig ankomst og uavhengighet til andre hendelser (Hillier & Hillier 2011, s. 562). En slik fordeling er en del av en Poisson-prosess, som er en tellefunksjon for antall hendelser innen et gitt intervall. Under en Poisson-fordeling, se figur 3 til høyre,



Figur 3: Poisson-fordeling

er standardavviket til ankomsten gitt ved $\sigma_\lambda = \sqrt{\lambda}$. Standardavviket til betjeningen er gitt ved $\sigma_\mu = 1/\mu$.

Følgende egenskaper er knyttet opp mot en Poisson-fordeling:

1. Fordelingen av interankomst vil være eksponentiell. Dette kan ses gjennom formel (3), hvor X har en eksponentiell fordeling med hyppighet λ :

$$P(X = n) = \frac{e^{-\lambda} * \lambda^n}{n!}, \text{ for } n > 0 \quad (3)$$

hvor,

$X = \text{antall kunder som ankommer}$

Ved å skjerpe inn betjeningen av systemet, f.eks. gjennom flere servere, blir betjeningstiden forbedret eksponentielt.

2. Ankomsten vil være tilfeldig. Det vil si at det vil være umulig å predikere akkurat når fremtidige ankomster vil finne sted, og innebærer at sannsynligheten for en ankomst er like stor uansett tidligere hendelser.

En Poisson-fordeling vil være passende hvis følgende tre antakelser (Anokye et al. 2013, s. 25) er oppfylt:

1. Det er et stort antall kunder i systemet
2. En enkeltkundes påvirkning på systemet er ubetydelig
3. Alle kunder er uavhengige av hverandre

Vi vurderer antakelsene i forhold til *ankomst*:

1. Det var et stort antall kjøretøy i systemet under observasjonsperioden.
2. Et enkelt kjøretøy har en liten påvirkning på systemets ytelse.
3. Kjøretøyene opererer innfartsåren og serveren uavhengig av hverandre.

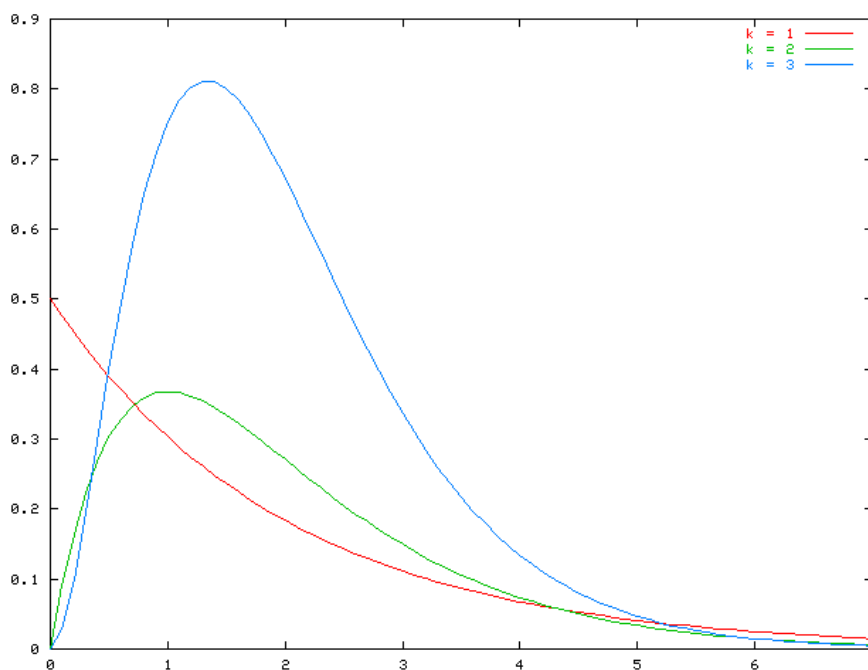
For *betjening* gjelder samme antakelser som ankomsten. Vi vurderer antakelsene:

1. Antall kjøretøy som blir betjent samtidig er relativt mange, avhengig av tidspunkt.
2. Ett kjøretøy i en rundkjøring eller lyskryss har en minimal påvirkning på ytelsen.
3. Valget å benytte en rundkjøring eller et lyskryss blir bestemt av hver enkelt sjåfør.

Et punkt som er verdt å ta opp, er om det eksisterer stasjonaritet i det observerte systemet. Stasjonaritet innebærer at sannsynlighetsfordelingen vil være konstante over en hel dag (Nymoen 1999, s. 2). Implikasjonene til ikke-stasjonaritet er større variasjonen i målingene enn det som er modellert (dispersjon) (Simon 2011). Siden rush-tiden og fergetrafikken treffer køen på ujevne tidspunkt og forstyrrer trafikkflyten, er det mulig at antakelsen om stasjonaritet brytes. Samtidig, på bakgrunn av at vi simulerer trafikkflyten over en hel dag, vil det være mulig å anta stasjonaritet.

2.1.4 Erlang-fordeling

En Erlang-fordeling brukes til å predikere ventetid i et køsystem hvor det er en Poisson-prosess, på samme måte som en generell fordeling. Hvordan Erlang-fordelingen skal se ut kan bestemmes ved å variere formparameteret. I figur 4, under ser vi et eksempel med tre ulike form parametere og alt annet likt.



Figur 4: En Erlang-fordeling

I køteori vil man i noen systemer anta at det brukes litt tid på å komme i gang – at de første gjennomkjøringene ses på som oppvarming eller en overgangsfase. Under en slik antakelse, vil antall i systemet i stor grad være påvirket av startstilstand («initial state») og påløpt tid. Denne fasen kalles «transient condition». Etter tilstrekkelig tid forventes det for øvrig at systemet blir uavhengig av startstilstand og tid. Motsetningen til ovennevnte fase kalles «steady-state». Her vil man anta at det ikke er behov for oppvarming, følgelig vil

sannsynlighetsfordelingen til ankomst og betjening ikke endres over tid (Hillier & Lieberman 2005, s. 770). Det forventes ikke at serverene i Moss behøver en oppvarmingsfase, og oppgaven vil følgelig anta en steady-state-tilstand. Implikasjonene av dette er at det ikke er mulig å modellere variasjoner i ankomst på forskjellige tidspunkt. Resultatene vil også være gjennomsnittsverdier. For at en generell fordeling skal nå en «steady-state», må $\rho < 1$ (Hillier & Lieberman 2005, s. 797). De forskjellige fasene har ulike formelløsninger. For øvrig vil vi kun ta for oss tilfeller med steady-state, følgelig vil ikke formlene for transient-condition bli nevnt.

For å enkelt kunne forklare en køs egenskaper, vil vi benytte «Kendall's notasjoner» (Beasley 1996) – $A|S|s|K$, hvor de forskjellige bokstavene representerer følgende:

Tabell 3: Oversiktstabell for Kendall's notasjoner

Betegnelse	Forklaring
A	Fordeling til ankomstene
S	Fordeling til betjeningstiden
s	Antall servere
K	Maksimalt antall plasser i systemet

Hvor A og S kan ha følgende egenskaper:

Tabell 4: Oversiktstabell over egenskaper for fordeling av ankomst og betjeningstid

Betegnelse	Forklaring
M	Poisson – fordeling/eksponentiell fordeling
D	Deterministisk: Konstant fordeling
G	Generell: Vilkårlig sannsynlighetsfordeling
E	Erlang: Erlang – fordeling med k som formparameter

Det vil blant annet bli benyttet følgende oppsett « $M|M|s|K$ ». Med dette oppsettet vil kundenes interankomst ha en eksponentiell fordeling, kundenes betjening bli fordelt eksponentielt, systemet blir håndtert av s servere og kapasiteten til systemet er K. En annen variant er « $M|G|1$ », hvor ankomsten er eksponentiell, det er en vilkårlig betjening av kunden, systemet har én server og kapasiteten til systemet er uendelig. Når vi har en eksponentiell fordeling vil variasjonskoeffisienten være 1. Ved en variasjonskoeffisient ulik 1, regner vi med å ha en generell fordeling.

Under antakelsen om uendelig kapasitet antar man at det vil være plass til uendelig mange kunder i køen, hvilket kan bli formulert (Hillier & Lieberman 2005, s.785) på følgende vis:

$$\lambda_n = \lambda, \quad n = 0,1,2, \dots \quad (4)$$

og

$$\mu_n = n\mu, \quad n = 0,1,2, \dots \quad (5)$$

Systemer med evig kapasitet antas å operere under steady-state. Det betyr at forventningene til L, L_q, W og W_q er uavhengig av når på dagen en befinner seg. Rho vil under dette systemet være begrenset til 1, da en verdi over dette vil føre til en evig lang kø som aldri blir ferdigbetjent. Formlene som blir benyttet under en slik antakelse er listet under i tabell 5 (Hillier & Lieberman 2005, s. 785-90). I tabellen er W og W_q beregnet ut ifra Little's flytlikning $L = \lambda W$ (Hillier & Hillier 2011, s. 439-40). De har blitt regnet ut på følgende vis:

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (6)$$

$$W_w = \frac{L_q}{\lambda} \quad (7)$$

Tabell 5: Oversiktstabell for benevnelse og formler i køteori for en ubegrenset kapasitet

Benevnelse	Forklaring	Formel
P_0	Sannsynlighet for 0 i systemet	$\left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \left(\frac{1}{1 - (\lambda/s\mu)} \right) \right]^{-1}$
P_n	Sannsynlighet for n i systemet	$\begin{cases} P_0 \frac{(s\rho)^n}{n!}, & \text{hvis } 0 < n < s \\ P_0 \frac{\rho^n s^s}{s!}, & \text{hvis } s < n \end{cases}$
CV_A	Variasjonskoeffisienten for ankomst	$\frac{\sigma_a}{\bar{\lambda}}$
CV_S	Variasjonskoeffisienten for betjening	$\frac{\sigma_s}{\bar{\mu}}$
L_q	Forventet antall i kø	$\frac{(\lambda\sigma)^2 + (\lambda/\mu)^2}{2(1 - (\lambda/\mu))}$
L	Forventet antall i systemet	$L_q + (\lambda/\mu)$
W_q	Forventet ventetid i kø	$\frac{L_q}{\lambda}$
W	Forventet ventetid i systemet	$\frac{L}{\lambda}$
ρ	Utnyttelsesgrad	$\frac{\lambda}{s\mu}$

Forutsetningene for en endelig kø er at det totalt ikke kan være mer enn K kjøretøy som blir betjent i tillegg til de som står i kø. Hvis $n > K$, vil det ikke være plass i systemet, og kunden må forlate køen, såkalt «balking». En kunde i systemet har også muligheten til å forlate køen, hvis en mener ventetiden i køen er for lang, det kalles «renegeing». Forutsetningene for en endelig kø (Stewart 2009, s. 433) kan bli formulert følgende:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & 0 \leq n < K \\ 0, & n > K \end{cases} \quad (8)$$

og

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu, & 1 \leq n \leq s \\ s\mu, & s \leq n \leq K \end{cases} \quad (9)$$

Rho (ρ) er forholdet mellom forventet ankomst per tidsenhet og forventet betjening per tidsenhet, og representerer systemet utnyttelsesgrad. Under uendelig kapasitet vil en ρ over 1 ikke være tillatt. Med en endelig kapasitet kan for øvrig ρ overstige 1, med den implikasjonen at når køen blir for lang, så vil kjøretøy forlate den. Man må under en endelig kapasitet i tillegg trekke vekk antall kjøretøy som må forlate køen (balkere), da disse ikke vil bli behandlet av systemet. I motsetning til uendelig kapasitet, kan man anta både steady-state og transient-state under endelig kapasitet.

Formlene for forventet gjennomsnittlig ankomst og betjening under forutsetningen om endelig kø vil være forskjellige fra en situasjon med uendelig kø. Sannsynligheten for at henholdsvis 0 og n kunder befinner seg i systemet vil også endres (Hillier & Lieberman 2005, s.793). Hvordan formlene under endelige køer er utformet vises i tabell 6, under. I tabellen under er W og W_q beregnet ut ifra Little's flytlikning $L = \lambda W$ (Hillier & Hillier 2011, s. 439-40). De har blitt regnet ut på følgende vis:

$$W = \frac{L}{\bar{\lambda}} \quad (10)$$

$$W_w = \frac{L_q}{\bar{\lambda}} \quad (11)$$

hvor,

$$\bar{\lambda} = \lambda(1 - P_{fullt\ system})$$

Formlene for endelig kapasitet (Hillier & Lieberman 2005, s. 791-94) er listet i tabell 6 under:

Tabell 6: Oversiktstabell for benevnelser og formler i køteori for en begrenset kapasitet

Benevnelse	Forklaring	Formel
P_0	Sannsynlighet for 0 i systemet	$\left[\sum_{n=0}^s \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \sum_{n=s+1}^K \left(\frac{\lambda}{s\mu} \right)^{n-s} \right]^{-1}$
P_n	Sannsynlighet for n i systemet	$\begin{cases} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} P_0, & \text{for } n = 1, 2, \dots, s \\ \frac{(\lambda/\mu)^n}{s! s^{n-s}} P_0, & \text{for } n = s, s+1, \dots, K \\ 0, & \text{for } n > K \end{cases}$
CV_A	Variasjonskoeffisienten for ankomst	$\frac{\sigma_a}{\bar{\lambda}}$
CV_S	Variasjonskoeffisienten for betjening	$\frac{\sigma_s}{\bar{\mu}}$
B_p	Andelen kunder som forlater kø (balk)	$P_{\text{fullt system}} = P_K$
B_n	Antall kunder som forlater kø (balk)	$\lambda - \lambda(1 - B_p)$
L	Forventet antall i systemet	$\sum_{n=0}^{s-1} nP_n + L_q + s \left(1 - \sum_{n=0}^{s-1} P_n \right)$
L_q	Forventet antall i kø	$\frac{P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^s \rho}{s! (1 - \rho)^2} [1 - \rho^{K-s} - (K - s)\rho^{K-s}(1 - \rho)]$
W	Forventet ventetid i systemet	$\frac{L}{\lambda(1 - B_p)}$
W_q	Forventet ventetid i kø	$\frac{L_q}{\lambda(1 - B_p)}$
ρ	Utnyttelsesgrad	$\frac{\lambda}{s\mu(1 - B_p)}$

Under en modell med begrenset kapasitet, vil ikke λ_n være lik for alle n -er, og man vil derfor ikke få de nøyaktige verdiene til λ gjennom likningen. I stedet vil man få de *forventede* verdiene (Hillier & Lieberman 2005, s. 793).

2.2 Svakheter med teorien

Det har blitt gjort enkelte antakelser under teorikapittelet. Blant annet har det ikke blitt hensyntatt lengde og bredde på kjøretøyene – det antas at alle kjøretøy er homogene. I tillegg er definisjonen på prosentandelen som balket meget rigid, da det antas at man forlater køen kun i de tilfeller hvor systemet er fullt; det er ikke nødvendigvis alltid tilfellet. Det er i tillegg uklart om observasjonene har stasjonaritet.

3. Foreliggende litteratur der køteori anvendes på trafikkproblemer

Det foreligger en omfattende mengde litteratur der køteori anvendes på trafikkproblemer.

Vickrey (1969) har vurdert en dynamisk styring av trafikk, hvor det har blitt sett på en matematisk modell for å finne en pris slik at køen, på kort sikt, blir eliminert. Det blir diskutert om effektene på en kapasitetsøkning mot en regulering styrt av pris, hvor det blir argumentert for at bompenger vil ha en bedre effekt. Vickrey mener at ved en likevekt i formelen sin, vil en som betaler bompenger, og som ikke har kø, komme like godt ut av det som en som ikke betaler, men som får kø. Inntekten gjennom bompenger vil derfor være ren gevinst, altså en situasjon uten en belastning av bilister. Han er likevel forsiktig med å avskrive en kapasitetsøkning helt, og mener man må vurdere situasjonen nøye. Ifølge Vickrey, så kan det være at en økning av kapasiteten kun tiltrekker mer trafikk, som fører trafikkbildet tilbake til samme situasjon som før ekspansjonen. Gjennom sine analyser finner han at bompenger virker å ha en god effekt på både kort og lang sikt, og en økning av kapasitet vil kun overgå dette hvis det fører til en ny rute, eller en betydelig kortere rute. Disse resultatene er selvfølgelig gjenstand for usikkerhet ettersom trafikkbildet alltid vil være forskjellige fra det som er modellert.

Larson (1987) tar for seg de psykologiske aspektene for kø – hvordan forskjellige køattributter påvirker en kunde. Egenskapene artikkelen ser på er: sosial rettferdighet, kømiljø, tilbakemelding og forsinkelse. Sosial rettferdighet tar for seg om kunden opplever sin betjening som rettferdig, f.eks. at den som kommer først, er den som blir betjent først. Blir dette brutt, vil kunden oppleve urettferdighet, som vil endre opplevelsen av ventingen. På motsatt side vil han som blir behandlet før han egentlig skal, sikkert føle seg fornøyd med sitt resultat. Det blir ofte fokusert på å redusere ventetiden på køer, men det er ikke alltid er like viktig som det omliggende miljøet til køen. Larson drar frem blant annet «The Manhattan Savings Bank», hvor kundetilfredshet ikke blir styrt av antall personer i skranken, eller ny datateknologi, men at de tilbyr underholdning i form av musikk. De har dermed lyktes i å gjøre kjøplevelsen til en positiv en – tiden i kø ble ikke opplevd som bortkastet. Ved å bidra med tilbakemeldinger til kunder, f.eks. med forventet ventetid, føler kundene seg mer fornøyd når de står i kø. Det ble blant annet foretatt flere studier på politiets responstid og medfølgende tilfredshet. Det viste seg at de som ringte inn (som ikke var i et nødtilfelle) ikke var misfornøyd med betjeningen, så lenge de fikk et anslag på hvor lenge de måtte vente. For de som ikke fikk et estimat, var det mye større sannsynlighet for at de sendte inn et klagebrev. Dette var også tilfellet i situasjoner hvor politiet opererte etter prioritet, f.eks. at ledige

patroljebiler ikke ble sendt, slik at det alltid var biler ledig i tilfelle mer alvorlige hendelser oppstod. I teorien, så vil man under «steady-state» anta en lineær sammenheng mellom forsinkelse og ulempe. I virkeligheten er dette ofte ikke tilfellet, f.eks. ved en responstid på 5 minutter i stedet for 2,5 minutter på et hjerteinfarkt, så vil ulempen være mer enn dobbelt så stor. Forfatteren mener derfor at en ikke nødvendigvis bør fokusere på ventetid, men forventet ulempe for kunden. Larson konkluderer med at det finnes mange attributter, ved siden av forsinkelse, som er styrende for en kundes kjøppplevelse. I tillegg antas det at mange systemer ikke har et lineært forhold mellom ventetid og fordel eller ulempe.

Arnott et al. (1993) videreførte modellen til Vickrey for å kunne se på prissensitivitet, og for å kunne gjøre en økonomisk analyse. Før Vickrey revolusjonerte køteorieverdenen med sin modell, brukte man standardmodellen (Arnott et al. 1993, s. 1-2); en eldre modell brukt til å illustrere forskjellige trafikksituasjoner. Modellen har for øvrig noen uklarheter, slik som spørsmålet om hva som skal ses på som antall brukere – antall brukere som entrer køen, eller de som går gjennom flaskehalsen? Problemene til standardmodellen har blitt omgått ved å eksplisitt se på brukerens atferd, hvor det har blitt fokusert på bruk av tid, altså at man ser på hvor mye en kunde er villig til å betale for å slippe unna kø. Artikkelen tar for også for seg hvorvidt en vei bør være selvfinansierende, altså at bompenginntektene burde være lik kostnaden ved å bygge og ha veien. Gitt at kostnaden har et lineært forhold til økning i kapasitet og bruk, ble tesen om selvfinansiering bevist av Mohring og Harwitz (1962) og Strotz (1965) (MHS heretter). Arnott et al. viser videre at MHS sine resultater kan utvides til enkle flaskehals situasjoner, uavhengig av tollregime. Et tollregime er hvilken tilnærming man har til innsamling av bompenger. De fire diskuterte regimene er: ingen avgift, konstant avgift, stegvis avgift og tidsvarierende avgift. Det vil si at ved konstante kostnader, burde veien være selvfinansierende; ved økende kostnader, burde veien skape merinntekter; og ved synkende kostnader burde det opereres med tap. Forfatterne konkluderes med to hovedfunn: for det første, med identiske individer, kan resultatene fra MHS bli anvendt uavhengig av prisregime. Så hvis en veis kapasitet burde være selvfinansierende med en optimal tidsvarierende toll, så bør den også være selvfinansierende i tilfeller med kun en beskatning av drivstoff (gitt at skattenivået er optimal). For det andre fant de fordelene med en effektiv prising til å være mye bedre enn det tidligere litteratur foreslo. Det henger sammen med at det tidligere ikke

har blitt hensyntatt hvor effektivt bompengene klarte å fordele kjøretøy. Å gå i dybden ved etableringen av et tollregime på urbane strekninger, vil derfor kunne gi store fordeler.

Dirk (2003) har utviklet en modell, som han mener er enklere og mer effektiv enn de kømodellene som vanligvis benyttes. Han konstruerte en teoretisk kømodell for å simulere ankomst og gjennomsnittlig reisetid, som er uavhengig av strekningens hastighet. Modellen hans skiller seg ut ved at den beregner reisetid gjennom differansen mellom ankomst- og avgangsraten. Andre modeller benytter tid (kjøretøyhastighet) og rom (deler inn veien i seksjoner), hvor veien blir sett på som lange, helt like veiseksjoner. Så i stedet for å se på enkelthastigheter, så blir det fokusert på flyt og gjennomsnittlig reisetid. Dette ble gjort ved å dele veinettet inn i strekninger med lik kapasitet og lengde, men som endte ved et område med en økning eller reduksjon av kapasitet. Dirk gjorde dette fordi han mente trafikk i stor grad oppstod på strekninger med varierende seksjonsstørrelse og at kø som regel ikke skjedde ved lavkapasitetsstrekninger. I tillegg har han utviklet en seksjonsbasert modell, som virker lovende for vurdering av trafikk i nettverk og en for problemer med en dynamisk fordeling. Videre så er modellen meget fleksibel i forhold til å inkorporere trafikkhendelser. Man kan blant annet legge til uhell, tilfeldige hendelser, prognoser for reisetid og trafikklys.

Zhang et al. (2007) så gjennom en modell, bestående av tre undermodeller, hvordan man kan oppnå en god flyt mellom fotgjengere og kjøretøy på en vei med et gangfelt styrt av et signalanlegg. Undermodellene bestod av en matematisk modell for henholdsvis kjøretøy, fotgjengere og interaksjonen mellom dem. Resultatene av analysene kan brukes til en bedre håndtering av kombinasjonen av vei og overgang for en bedre sikkerhet, effektivitet og reduksjon av kø. I simuleringen ble det lagt inn forskjellige påvirkningselementer, slik som antall fotgjengere, antall risikovillige fotgjengere (de som tar sjanser, f.eks. ved å gå over på rødt) og trafikklysenes timing. Analysene ble gjennomført ved å legge inn forskjellige sannsynligheter for de ulike tetthetene inn i de forskjellige undermodellene, for å se hvordan det påvirket flyten. Ved en lav fotgjengertetthet økte kjøretøyflyten lineært, men etter hvert som tettheten økte, ble flyten redusert. Antall risikovillige viste samme tendenser som ovennevnte analyse, et lavt antall risikovillige fotgjengere hadde en lav påvirkning på flyten, men ved en økning så ble trafikken i større grad hindret. Av analysene kom det frem at fotgjengere har en stor effekt på trafikkeffektivitet og –flyt. Forfatterne foreslo forskjellige måter å forbedre flyten, f.eks. å bygge en under- eller overgang. Det ble også sett på trafikens

kapasitet og effektivitet, og hvordan de ble påvirket av trafikksignalenes timing. Ved en kort rødlys-fase for biler (0 til 20 sekunder) øker flyten lineært til et punkt mellom 40 og 80 sekunder hvor en metning av trafikken skjedde. For analysene av signalanleggstiming, kom det frem at man generelt bør unngå en metning av trafikken. Studiet konkluderer med at en bør vurdere over- eller underganger, hvis fotgjengertettheten treffer et kritisk punkt. Det kom også frem at andelen risikotakere påvirket trafikkapasiteten negativt, men at fotgjengervolumet var den største påvirkningsfaktoren. Til slutt ble det konkludert med at man bør justere timingen til signalanleggene slik at man unngår en metning av trafikken, slik at man får en god fotgjenger- og kjøretøyflyt.

Rehborn et al. (2010) så på et rammeverk av Kerner, kalt «Kerners tre-fases trafikkteori» (Kerner (2004) og Kerner (2009)), som satte spørsmålsteget ved en rekke tidligere køteorier og modeller (blant annet Dirk Helbing sin (Dirk 2003)). Kerner skilte i sin forskning mellom tre faser når det kom til kø: «fri flyt» (F), «synkronisert flyt» (S) og «bred bevegelig opphopning» (J), som er de tre forskjellige fasene en motorveikø kunne være i. Det har da blitt sett på når trafikken går fra en fase til en annen, altså at man overgår et visst kritisk punkt. Et slikt punkt kan for eksempel være ved mindre enn 60 km/t, hvor trafikken går over fra F til S. Studien starter med å teste ut rammeverket i tre forskjellige land – USA (Oregon), England (M42 motorveien) og Tyskland (hele Tyskland), for å se etter fellestrekk med det som Kerner fant i sin forskning. Deretter har forfatterne sammenlignet forskjellige metoder (grafisk, detektor, korrelasjon og flyt-tetthet) for å oppnå de samme karakteristikkene til «bevegelig kø» som ble brukt av Kerner. Gjennom studiet kom man frem til flere konklusjoner: Trafikken vil kunne gå fra «fri flyt» (F) til en «synkronisert flyt» (S), men ikke direkte fra «fri flyt» til en «bred bevegelig opphopning» (J). Det kommer av at J er et resultat av overgangen fra F til S. I tillegg ble det også funnet ut at de forskjellige fasene fant sted i samtlige land de observerte, så fasene og resultatene er et globalt fenomen. Av de fire metodene, så var detektormetoden den mest effektive, som gikk ut på måle tid mellom forskjellige punkt i veien. Dette muliggjorde utregning av hastigheten på køen, og ga et detaljert bilde av både opp- og nedstrøms aktivitet, som var bedre enn de hvor man kun så på korrelasjon mellom fart og flyt.

Geroliminis og Skabardonis (2011) så på viderespredning av kø i veinettverk styrt av trafikksignalanlegg. En spredning av kø (Vickrey (1969, s. 3) kaller det «triggernecks») kjennetegnes av voksende køer på grunn av blokkeringer i et veinett som hindrer kjøretøy fra

andre seksjoner i å entre det samme veinettet. Gjennom studiet kommer de med en metode for å identifisere slike triggernecks ved å analysere Lincoln Avenue i Los Angeles. Data til studiet ble innhentet blant annet fra manuell telling og sensorteknologi i bakken. En viderespredning av kø har forståelig nok en stor negativ effekt på trafikken effektivitet, og det blir anslått at reisetiden kan øke mellom 50-100% for korte distanser. For å kunne styre dette, anbefalte de å styre trafikk etter prioritet (preemptive køer) eller ved å forutse kødannelse og begrense tilgangen på en måte som opprettholder flyten. Det ble også funnet bevis for at en utjevning av trafikk tettheten virket fordelaktig. I tillegg blir det fremhevet at ny teknologi for sensorene kan gi en betydelig forbedring i målinger av flyt. En forbedring av viderespredning av kø, kan ifølge forfatterne, føre til en bedre systemutnyttelse og forbedre fremkommelighet og mobilitet.

Anokye et al. (2013) konstruerte en modell for kjøretøystrafikk med bakgrunn i køteori, hvor de ønsket å finne de beste tidsrommene for trafikksignal med det formål å redusere kø. Studiet ble gjennomført i Ghana, hvor det ble observert trafikk på veiene inn mot et lyskryss plassert i Oforikrom. Analysen ble gjennomført ved å telle antall kjøretøy som benyttet veien inn til Oforikrom på morgenen, ettermiddagen og kvelden. Gjennom studiet av Anokye et al. ble det observert en velfungerende trafikkflyt på morgenen og ettermiddagen; serverene hadde en bedre betjeningsevne enn antall biler som ankom. Problemene oppstod på kvelden hvor hensynsløs atferd, slik som ulovlig parkering og av- og pålemping av passasjerer ved server, førte til redusert betjeningsevne. Det ble derfor konkludert med at staten burde engasjere seg i aktiviteter som hindrer slik oppførsel. Av nevneverdige kritiske punkter, så kan det trekkes frem at studiet føles noe inkonsekvent. Det nevnes tidlig at veien mellom Oduom til det sentrale markedet tok 15 minutter, mens det nå tar en time. Likevel mener forfatterne at trafikksignalsystemet i dag fungerer optimalt. Videre blir det nevnt flere steder at de ønsker å se på tid mellom trafikklyssignalene for å optimalisere trafikkflyten, likevel ble dette ikke blitt diskutert videre.

Lartey (2014) ønsket å se på måter å forbedre trafikkproblemene i Accra, Ghana. Han observerte at veinettet ikke klarer å støtte et økende antall kjøretøy. Det ble derfor foreslått å modellere hvordan veinettet til motorveien Malam opererer, for å bistå i å lette på trykket til omkringliggende forsteder og lokalsamfunn. Tanken er at modellen skal ha et verktøy som kan forutse og gi tilbakemelding på trafikkflyten for å bekjempe kødannelsen. Analysen ble

gjennomført ved å telle kjøretøy gjennom et signalisert kryss på Malam mellom 07.30 og 8.00 i bolker på fem minutter. Observasjonsdataene, slik som antall biler inn og ut av krysset, har deretter blitt prosessert for å finne diverse køstatistikk. Gjennom analysen ble det funnet lange køer, høy trafikkintensitet (ρ på 0,97) og medfølgende lange ventetider, hvilket ga signaler om store fremtidige problemer. På bakgrunn av en økende kjøretøysstatistikk konkluderer Lartey med at det nåværende køsystemet ikke er godt nok og man vil kunne forvente en økning i kølengde og ventetider. Det ble derfor anbefalt å iverksette tiltak, slik som en justering av signalanleggenes timing eller en forbedring av veiens infrastruktur.

Dalene et al. (1993) så på flere mulige tiltak for å bedre trafikken over «Sarpebruen». Første tiltak var å se på en tredje fil som var reversibel, som åpnet en fil der hvor presset var størst. Dette tilsvarer å gjøre bruen om fra en enkelt-kanal til en multippel-kanal. Under dette tiltaket vil ventetiden ha en vesentlig reduisering, mer enn en dobling. De antok også at selv om antall filer dobles, så vil ikke trafikken dobles, ettersom lyskryssene i nærheten er en begrensende faktor. Et slikt alternativ ville også være relativt billig, med en prislapp på rundt 235 millioner kroner. Det ble også raskt vurdert fordeler og ulemper ved å ha en reversibel fil i midten dedikert til kollektivtrafikk. Det andre tiltaket var å bedre flyten – redusere trafikken – i området hvor trafikken var mest fremtredende. De fant da ut at en reduksjon på rundt 10% (fra 1010 til 900) av trafikken reduserte ventetiden med omtrent 45% (fra 11 til 6 minutter). For øvrig fant de at for å komme ned på samme nivå som man kan forvente med en tredje fil, så måtte trafikken reduseres med rundt 50%. Av de to tiltakende, så var løsningen med multiple kanaler den beste for å redusere ventetiden, med en ventetid på 1 minutt og 26 sekunder kontra 5 minutter og 55 sekunder. Likevel er det interessant hvor stor effekt en reduksjon på 10% av trafikken hadde.

4. Data for trafikkstrømmene gjennom Moss

Etter kontakt med Statens Vegvesen, som ikke kunne hjelpe oss med detaljerte trafikkdata gjennom de ulike flaskehalsene i veisystemet, kom vi frem til at vi måtte foreta feltarbeid og manuelt telle kjøretøyene som kom inn i flaskehalsene. Vi tok plass på punkter ved de ulike flaskehalsene, hvor vi hadde god oversikt over innkommende kjøretøy. Hver innfartsåre i hver server ble telt mellom 07:00 og 09:00, samt 15:00 og 17:00, i løpet av en to-ukers periode.

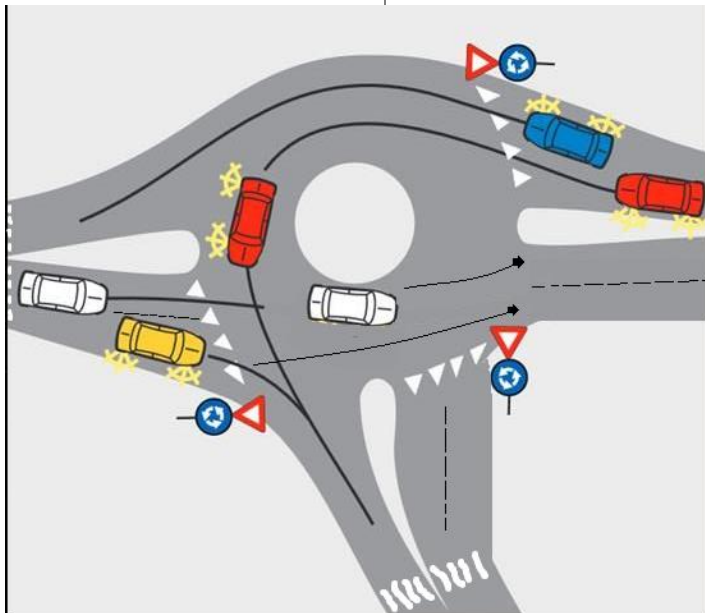
4.1 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

En rundkjøring er et veikryss som er designet slik at det skal ha en kort behandlingstid og som skal kunne behandle flere brukere simultant. Karakteristikk ved rundkjøringer er at de har en hindring i fartsretningen ved innkjøringene, krumninger i veibanen som reduserer brukeres hastighet gjennom rundkjøringen og vikeplikt for brukere som allerede blir betjent. For at en rundkjøring skal fungere optimalt må vikeplikten overholdes. Samtidig må ikke kjøretøy stoppe i rundkjøringen, men vente til det er plass til å kjøre ut av rundkjøringen. Rundkjøringen som ligger ved kanalen, heretter Kanalen, er en trearmet tofelts rundkjøring.

Kanalen har tofelts innkjøringer fra sør, vest og øst, med tofelts utkjørsel østover og enkeltfelts utkjørsler mot vest og sør, som vist i figur 5 under. Inne i rundkjøringen er det to kjørefelt.

Tabell 7: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen 21. og 26. januar 2015

Innkjøring	Kjøretøy 15:00-17:00	Kjøretøy 07:00-09:00
	21/1/2015	26/1/2015
1. Sør	763	332
2. Vest	1783	1991
3. Øst	2148	1367
4. Øst til Fergeleiet	332	348



Figur 5: Oversiktsfigur for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Innkjøringen fra sør kommer fra havneområdet. Trafikken har en prosentvis høy differanse mellom ettermiddagsrushet og morgenrushet, hvor trafikken i løpet av morgenrushet kun

utgjør 44% av trafikken i løpet av ettermiddagsrushet. Rett før innkjøringen inn i serveren er det et forkjørsviregulert T-kryss hvor det er en ankomst kjøretøy fra deler av Moss sentrum. Umiddelbart etter dette følger en fotgjengerovergang som hindrer ankomsten via innkjøring sør. Det ble observert færre fotgjengere som brukte denne overgangen enn overgangen i innkjøring vest. Ankomsten fra innkjøringen var sterkt preget av ankomsten trafikk fra fergesambandet Bastø Fosen, som på observasjonsdagen for morgenrushet hadde en støtvis ankomst av kø på henholdsvis 44; 50; 47; 19 og 29 kjøretøy fra de fem fergeankomstene i løpet av måleperioden, 07:00-09:00.

Innkjøringen fra vest kommer fra Jeløy. Trafikken fra Jeløy er høy med 1783 kjøretøy i ettermiddagsrushet og 1991 kjøretøy i morgenrushet. Trafikken fra Jeløy blir hindret av fotgjengere som tar i bruk overgangen som ligger tett mot rundkjøringen. Ankomsten fra Jeløy var ved observasjonene rimelig stabil, med en liten økning av ankomster kl. 16:00-16:15 og 08:00-08:15.

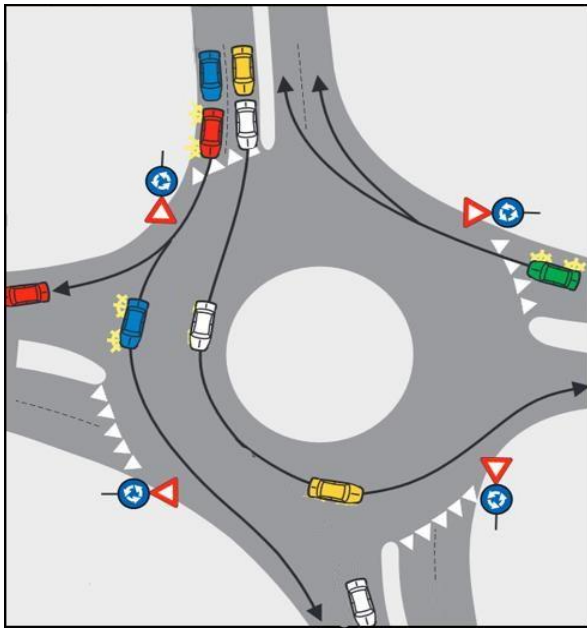
Innkjøringen fra øst kommer nedstrøms fra Kransen. Det ble observert en betydelig forskjell fra ettermiddagsrushet til morgenrushet, henholdsvis 2148 og 1367 og med en differanse på 781 kjøretøy. Ser vi derimot på differansen kjøretøy som tok utkjøringen mot havneområdet er denne kun på 16 kjøretøy. Ankomsten til rundkjøringen via innkjøring øst var stabil med liten variasjon gjennom observasjonsperiodene.

Betjeningstiden til rundkjøringen er avhengig av tjenesten utført av serveren. Ved målinger gjennomført ved bruk av egen bil og stoppeklokke kom vi frem til at tjenestetiden er to sekunder for hver 90 grader brukere av serveren trenger. Betjeningstiden ble målt til seks sekunder ved innkjøring fra øst og utkjøring mot sør (havneområdet).

Flaskehals i veisystemet har lavere kapasitet enn oppstrøms strekninger, kryss og strukturer. En flaskehals kan være både strekninger, kryss eller strukturer og vil i perioder med høy kjøretøystetthet kunne skape kø i innfartsårene siden ankomsten til flaskehalsen da vil være høyere enn flaskehalsen kan betjene.

Kanalen er en flaskehals i seg selv. Rundkjøringen har lavere kapasitet enn de tilknyttede veiene, noe som resulterer i kø i innkjøringene til rundkjøringen. Det er en nedstrøms påvirkning fra kanalen til Kransen.

4.2 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen



Figur 6: Oversiktsfigur for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Flaskehalsen som ligger ved Kransen er en firearmet tofelts rundkjøring. Rundkjøringen har fire innkjøringer, fra sør, vest, nord og øst, med tilhørende utkjørsler, alle er enkeltfelts, som illustrert i figur 6, over. Inne i rundkjøringen er det to kjørefelt.

Tabell 8: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen 23. og 27. januar 2015

Innkjøring	Kjøretøy 15:00-17:00	Kjøretøy 07:00-09:00
	23/1/2015	27/1/2015
1. Sør	1096	876
2. Vest	1290	1592
3. Nord	777	337
4. Øst	1547	1207

Innkjøringen fra vest kommer fra Malakoff/Melløs områdene sør i Moss sentrum. Det er lav differanse i ankomstene mellom ettermiddagsrushet og morgenrushet, med henholdsvis 1096 og 876 kjøretøy. Ankomsten i denne innkjøringen var jevn i begge periodene, med noen få unntak i slutten av periodene hvor ankomsten reduseres mot to til tre kjøretøy per minutt.

Innkjøringen fra vest kommer nedstrøms fra Kanalen og blir derfor påvirket av den støtvide ankomsten fra Bastø Fosen. Ankomsten er likevel mer jevn enn innkjøring sør i flaskehalsen ved kanalen, dette som følge av at den dominante retningen fra innkjøring sør og vest i flaskehalsen er utkjøring øst.

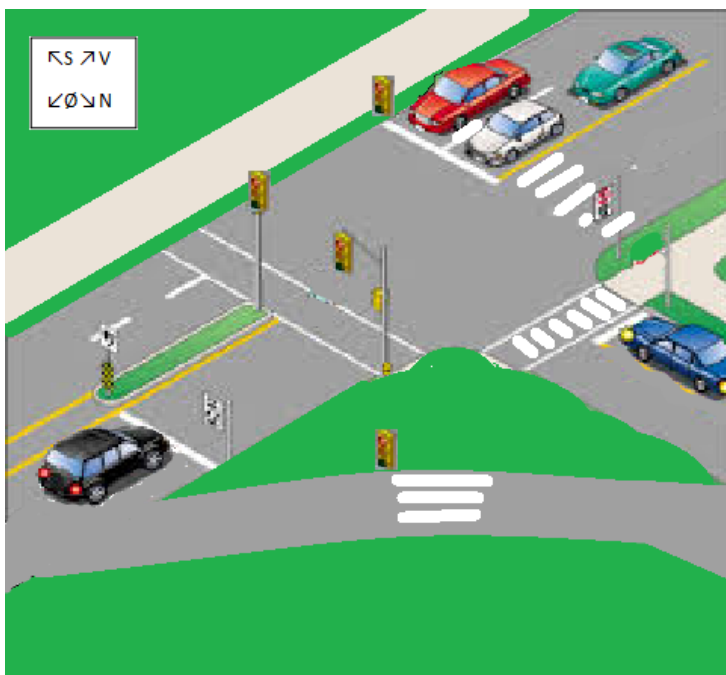
Innkjøringen fra nord kommer fra deler av Moss sentrum og har en høy observert forskjell i ankomst mellom ettermiddags- og morgenrushet, med trafikk på henholdsvis 777 og 337 kjøretøy. At ankomsten i løpet av ettermiddagsrushet er betydelig høyere er som forventet da det er mye næring i området som ankomstene kommer fra. Ankomsten til innkjøringen var forholdsvis jevn, men med en tydelig topp kl. 16:00-16:15 i løpet av ettermiddagsrushet.

Innkjøringen fra øst kommer nedstrøms fra lyskrysset ved Flemminghjørnet. Som følge av kryssets trafikkregulerende egenskaper er ankomsten observert støtvis både i ettermiddagsrushet og i morgenrushet, med henholdsvis 1547 og 1207 kjøretøy.

Betjeningstiden ble målt til fire sekunder ved innkjøring fra øst og utkjøring mot vest.

Kransen er en flaskehals ettersom rundkjøringen har lavere kapasitet enn de tilhørende vegelementer. Den har også en oppstrøms påvirkning fra Kanalen til vest og fra lyskrysset ved Flemminghjørnet fra øst.

4.3 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet



Figur 7: Oversiktsfigur for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet

Et lyskryss er et veikryss som er designet slik at det skal tillate trafikk fra to motsatte retninger samtidig. Det regulerer automatisk trafikken ved bruk av lyssignaler for kjøør og stans. Lyskrysset behandler flere brukere fra motsatte fartsretninger samtidig og følger ikke en først-inn/først-ut metode, men har trykksensorer i innkjøringene som registrerer når et kjøretøy

kommer og hvor lenge det står (Grimsmo 2008). På denne måten sikrer man at en konstant ankomst fra to fartsretninger ikke resulterer i en uendelig ventetid for andre fartsretninger med en maksimal ventetid før signalkift. Som følge av at lyskryss kun håndterer to motsatte fartsretninger samtidig vil det ved høy kjøretøystetthet oppstå kø. Kjøretøystetthet er antall kjøretøy per kilometer for en gitt periode. Flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet er et T-formet lyskryss, som illustrert i figur 7, over.

Tabell 9: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet 20. og 28. januar 2015

Innkjøring	Kjøretøy 15:00-17:00	Kjøretøy 07:00-09:00
	20/1/2015	28/1/2015
1. Vest	1628	1358
2. Nord	829	369
3. Øst	1335	1322

Innkjøringen fra vest kommer nedstrøms fra Kransen. Det er en lav differanse på trafikken mellom ettermiddagsrushet og morgenrushet, med henholdsvis 1628 og 1358 kjøretøy. Ventetiden for brukerne som har ankomst via innkjøring vest reguleres også via den korte avstanden mellom lyskrysset og den påfølgende rundkjøringen ved Flemminghjørnet. Brukerne har kun en mulig utkjøring, nemlig østover. Ankomsten via innkjøringen var jevn i ettermiddagsrushet, men mer støtvis i morgenrushet.

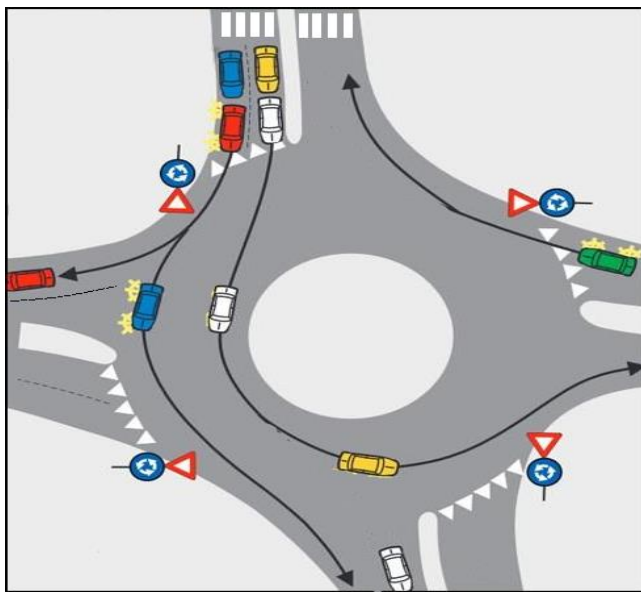
Innkjøringen fra nord kommer fra Moss sentrum og brukere av bensinstasjonen ved Flemminghjørnet. Den samme effekten ble observert her som i innkjøring nord ved Kransen, hvor det er en betydelig lavere ankomst i løpet av morgenrushet, sammenlignet med ettermiddagsrushet. Ventetiden for brukerne av denne innkjøringen i løpet av ettermiddagsrushet var også høyere, igjen, som følge av den korte avstanden mellom denne flaskehalsen og rundkjøringen ved Flemminghjørnet.

Innkjøringen fra øst kommer nedstrøms fra rundkjøringen ved Flemminghjørnet. De observerte ankomstene i ettermiddagsrushet og morgenrushet var jevne og virket ikke å bli påvirket av rundkjøringen ved Flemminghjørnet, men snarere av den korte avstandene mellom lyskrysset og rundkjøringen.

Betjeningstid ble målt til fire sekunder ved innkjøring fra øst og utkjøring mot vest. Tid mellom signalskift for kjørt og stans ble ikke målt da denne er avhengig av teknikk utenfor vårt fagområde.

Flaskehalsen i lyskrysset er utkjøringen som går østover. Siden avstanden mellom flaskehalsene ved Flemminghjørnet er såpass kort er kapasiteten direkte påvirket oppstrøms fra rundkjøring og trafikkstrømmen gjennom denne.

4.4 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet



Figur 8: Oversiktsfigur for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Flaskehalsen som ligger ved Flemminghjørnet er en firearmet tofelts rundkjøring. Rundkjøringen har fire innkjøringer, fra sør, vest, nord og øst, med tilhørende utkjørsler, innkjøringene fra nord og vest er tofelts, som illustrert i figur 8, over. Inne i rundkjøringen er det to kjørefelt.

Tabell 10: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet 19. og 29. januar 2015

Innkjøring	Kjøretøy 15:00-17:00	Kjøretøy 07:00-09:00
	19/1/2015	29/1/2015
1. Sør	972	935
2. Vest	2010	1677
3. Nord	1862	1518
4. Øst	200	185

Innkjøringen fra sør kommer fra Melløs. Ankomsten var jevn i både ettermiddagsrushet og morgenrushet, med en svært liten differanse på kun 37 kjøretøy mer i løpet av ettermiddagsrushet.

Innkjøringen fra vest ligger nedstrøms til lyskrysset ved Flemminghjørnet. Ankomsten til rundkjøringen via denne innkjøringen ble observert å være jevn. Dette skyldes at innkjøringen samtidig er den eneste utkjøringen for brukere av lyskrysset ved Flemminghjørnet med ankomst fra vest og den dominante utkjøringen for brukere av lyskrysset med ankomst fra nord.

Innkjøringen fra nord ligger nedstrøms til Mosseporten og oppstrøms til lyskrysset ved Flemminghjørnet. Ankomsten via denne innkjøringen var jevn, men med tydelige toppe 16:00-16:15 i ettermiddagsrushet og 07:45-08:00 i morgenrushet. Ankomsten ble også kraftig redusert ved slutten av begge måleperiodene. Innkjøringen blir også påvirket av en fotgjengerovergang som ble brukt hyppig i morgenrushet.

Innkjøringen fra øst kommer fra et lite boligfelt. Ankomsten via denne innkjøringen var svært lav sammenlignet med de andre innkjøringene, og mer uregelmessig i begge periodene.

Betjeningstiden ble målt til to sekunder ved innkjøring fra nord og utkjøring mot vest.

Det er to flaskehalseffekter mot rundkjøringen. Den første er den korte avstanden mellom lyskrysset ved Flemminghjørnet og rundkjøringen for utkjøring vestover. Den andre flaskehalseffekten er rundkjøringens kapasitet.

4.5 Trafikkstrømmen gjennom flaskehalsen Mosseporten

Flaskehalsen Mosseporten er en 290 meter lang tofelts tunnel. Mosseporten har innkjøringer fra øst og vest, med fartsgrense på 60 km/t. Sett i forhold til andre strukturer i veisystemet er kjørefeltene smale og ved hendelser som skaper hindringer i veibanen blir kapasiteten derfor mer redusert.

Tabell 11: Observert antall kjøretøy for flaskehalsen Mosseporten 30. januar og 2. februar 2015

Innkjøring	Kjøretøy 15:00-17:00	Kjøretøy 07:00-09:00
	2/2/2015	30/1/2015
1. Vest	1738	1543
2. Øst	1347	1139

Innkjøringen fra vest er nedstrøms til hovedfartsåren fra Bastø Fosen til E6. Ankomsten ble observert til å være jevn i begge måleperiodene.

Innkjøringen fra øst er den første i hoved fartsåren mellom E6 nord og Bastø Fosen. Det ble observert jevn ankomst i begge periodene. Betjeningstiden ble målt til 22 sekunder ved innkjøring fra øst og utkjøring mot vest. Flaskehalseffekten som er tydeligst er tunnelen selv. Den har redusert hastighet fra innkjøringene med 20 km/t som følge av den smale traséen.

5. Analyse av flaskehalsene i Moss

5.1 Analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av enkle modeller

I dette kapitlet vil vi analysere flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med bruk av enkle modeller og utvider disse etter hvert som vi ser at modellene blir for upresise og vi trenger større tilpasningsmuligheter og mer informasjon fra modellene. Vi starter med å bruke en $M|M|1$ modell, som vi utvider til en $M|M|2$ -modell før vi tar for oss $M|G|1$, $M|D|1$ og $M|E|1$. Det blir avsluttet med å benytte en mer avansert Excel-modell av John O. McClain fra Cornell University (McClain 2003) fra kapittel 5.2. Vi ser på ti-minutters perioder.

5.1.1 Analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av $M|M|s$

En $M|M|1$ -modell forutsetter eksponentiell fordeling på interankomst og betjeningstid, med én server. Input og resultater fra modellen er gitt i tabell 12, under.

Tabell 12: Input og resultater ved bruk av $M|M|1$ modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	49
$\mu =$	400	$L_q =$	48,02
$s =$	1	$W =$	75
$\Pr(w > t) =$	0,034 %	$W_q =$	73,5
when $t =$	600	$\rho =$	0,98
$\text{Prob}(w_q > t) =$	0,033 %		
when $t =$	600		

Som man ser av tabell 12 over, er det en forventet kø på 48 kjøretøy ved bruk av denne modellen. Modellen gir en forventet gjennomsnittlig ventetid i kø (W_q) på 73,5 sekunder og en gjennomsnittlig utnyttelse av serveren på 98%.

Vi utvider den foregående $M|M|1$ -modellen med en ekstra server og lavere betjeningsrate per server. En $M|M|2$ -modell forutsetter eksponentiell fordeling på interankomst og betjeningstid, med to servere. Input og resultater fra modellen er gitt i tabell 13, under.

Tabell 13: Input og resultater ved bruk av M|M|2 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	49,49
$\mu =$	200	$L_q =$	47,53
$s =$	2	$W =$	75,76
$\Pr(W > t) =$	0,034 %	$W_q =$	72,76
when $t =$	600	$\rho =$	0,98
$\text{Prob}(W_q > t) =$	0,033 %		
when $t =$	600		

Som man ser av tabell 13 over, er det en forventet kø på 47,5 kjøretøy ved bruk av denne modellen altså en liten forandring fra M|M|1-modellen. Modellen gir en forventet gjennomsnittlig ventetid i kø (W_q) på 72,8 sekunder, ned fra 73,5 sekunder. Den gjennomsnittlig utnyttelse av serveren er fortsatt på 98%.

5.1.2 Analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av M|G|1

Ved å bruke M|G|1-modellen kan vi en generell fordeling på standardavviket til betjeningstiden. Dersom standardavviket er det samme som forventet betjeningstid så vil vi ha en eksponentiell fordeling i M|G|1-modellen. Vi vil gå gjennom M|G|1-modellen med tre ulike forhold mellom standardavviket til betjeningstiden og betjeningstiden, nemlig på 1, 0,5 og 1,5.

Tabell 14: Input og resultater ved bruk av M|G|1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	49
$1/\mu =$	0,0025	$L_q =$	48,02
$s =$	1	$W =$	75
$\sigma =$	0,0025	$W_q =$	73,5
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Som man ser av tabell 14 over, blir resultatene de eksakt samme som i M|M|1 modellen. I tabell 15, under, har vi derfor halvert standardavviket i forhold til forventet betjeningstid for å kunne se utslaget dette vil ha på resultatene.

Tabell 15: Input og resultater ved bruk av M|G|1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	49,49
$1/\mu =$	0,0025	$L_q =$	47,53
$s =$	2	$W =$	75,76
$\sigma =$	0,00125	$W_q =$	72,76
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Av tabell 15, over, ser vi at ved å halvere standardavviket vil forventet antall kjøretøy i kø reduseres fra 48 til 30. Samt vil ventetiden reduseres fra 73,5 sekunder til 46 sekunder. Gjennomsnittlig utnyttelse av serveren forblir uendret ved å endre standardavviket. I tabell 16, under, vil vi øke standardavviket til betjeningstiden til 1,5 ganger forventet betjeningstid.

Tabell 16: Input og resultater ved bruk av M|G|1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	79
$1/\mu =$	0,0025	$L_q =$	78
$s =$	1	$W =$	121
$\sigma =$	0,00375	$W_q =$	119,4
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Ved å endre standardavviket til 1,5 ganger forventet betjeningstid økes den forventede køen fra 48 til 78 kjøretøy og gjennomsnittlig forventet ventetid økes fra 73,5 til 119,4 sekunder.

5.1.3 Analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av M|D|1

Tabell 17: Input og resultater ved bruk av M|D|1 modellen på flaskehalsen

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	24,99
$\mu =$	400	$L_q =$	24,01
$s =$	1	$W =$	38,25
		$W_q =$	36,75
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Ved å bruke en M|D|1-modell har vi en deterministisk betjeningstid. Dette vil si at alle kjøretøy bruker eksakt like lang tid gjennom systemet, altså har modellen et standardavvik på null. Vi forventer at denne modellen gir resultater som er sterkt underdrevet i forhold til hva som ble observert under målingene.

Tabell 17, over, viser input og resultater ved bruk av M|D|1-modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen. Forventet antall i kø er redusert til 24 fra 48 kjøretøy og gjennomsnittlig forventet ventetid er redusert fra 73,5 til 36,75 sekunder. Med andre ord har både forventet antall i kø og forventet gjennomsnittlig ventetid blitt halvert.

5.1.4 Analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av M|E|1

Ved å bruke en M|E|1-modell kan vi bestemme hvilken fordeling betjeningstiden skal ha. Når vi setter formparameteret til ulike verdier får vi ulike Erlang-fordelinger på ventetiden mellom betjeningene. Vi vil bruke form parameterne én, to og tre.

Tabell 18: Input og resultater ved bruk av M|E|1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med form parameter = 1

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	49
$\mu =$	400	$L_q =$	48,02
$s =$	1	$W =$	75
$k =$	1	$W_q =$	73,5
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Som er tydelig av tabell 18, over, vil vi ved å bruke formparameteret én få de samme resultatene som med en vanlig M|M|1-modell. Ser vi til tabell 19, under, hvor vi bruker formparameteret to har gjennomsnittlig antall som venter i kø blitt redusert fra 48 til 36 kjøretøy og gjennomsnittlig forventet ventetid har blitt redusert fra 73,5 sekunder til 55,1 sekunder.

Tabell 19: Input og resultater ved bruk av M|E|1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med form parameter = 2

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	37
$\mu =$	400	$L_q =$	36,02
$s =$	1	$W =$	56,62
$k =$	2	$W_q =$	55,12
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Tabell 20: Input og resultater ved bruk av M|E|1 modellen på flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med form parameter = 3

Input		Results	
$\lambda =$	392	$L =$	33
$\mu =$	400	$L_q =$	32,01
$s =$	1	$W =$	50,50
$k =$	3	$W_q =$	49,00
		$\rho =$	0,98
		$P_0 =$	0,02

Dersom vi bruker formparameter lik tre ser vi av tabell 20, over, at forventet antall kjøretøy i kø er redusert ytterligere ned fra 36 til 32 kjøretøy og gjennomsnittlig forventet ventetid har blitt redusert ytterligere fra 55,1 til 49 sekunder.

Selv om resultatene fra alle modellene kan brukes for grunnleggende analyser av trafikkflyten i flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen, er vi av den oppfatning at de er for enkle til å gi et godt helhetlig bilde av systemet. Vi vil derfor i videre i oppgaven bruke mer avanserte modeller på systemene som skal analyseres, hvor vi har muligheten til å simulere trafikkflyten i

systemene. Ved å simulere kan vi få et større utvalg og bedre belyse hvordan systemene fungerer i praksis.

5.1.5 Oppsummering av analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved bruk av enkle modeller

Modellene som er brukt over for å analysere flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen kan være med på å gi en grunnleggende oversikt over trafikkavviklingen i hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 i Moss. Av modellene som er brukt over er det kun en modell som tillater mer enn én server, $M|M|s$, og denne forutsetter eksponentiell fordeling i interankomst og betjeningstid. For modellen ser vi en ut fra resultatene en forskjell i forventet antall kjøretøy i systemet på 0,5 kjøretøy ved en økning fra én til to servere. Ved å sammenligne denne med modellen hvor vi kan øke eller redusere standardavviket til betjeningstiden ser vi en forskjell på -18 og +30 kjøretøy ved å endre til 0,5 og 1,5 ganger forventet betjeningstid. Dersom vi fjerner standardavviket helt, slik som i $M|D|1$ -modellen vil vi redusere antall kjøretøy i systemet med 24. Ved å ta i bruk en Erlang-fordeling på betjeningstiden kan vi se hvordan forbestemte avvik i betjeningstiden påvirker antall kjøretøy i systemet, og ved å endre forparameteret til to og tre vil vi redusere antall kjøretøy i systemet med 12 og 16. For modellene som er brukt over er det problematisk for vår analyse av vi får lite informasjon ut av dem, samt at vi ikke kan simulere effektene, men kun får teoretiske resultater.

5.2 Analyse av dagens trafikkavvikling

I dette kapittelet vil vi analysere dagens situasjon i de forskjellige serverne ved hjelp av ulike kø-modeller. Vi vil først ta for oss trafikken i rundkjøringen ved Kanalen, deretter i rundkjøringen ved Kransen, deretter i lyskrysset ved Flemminghjørnet, før i rundkjøringen ved Flemminghjørnet og til slutt i Mosseporten.

5.2.1 Analyse av trafikkavviklingen i flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Som nevnt ovenfor er Kanalen en tre-armet rundkjøring med to felt i selve rundkjøringen, to felt i alle innkjøringene og ett felt i utkjøring mot øst. Det vil si at Kanalen har to servere. Derfor vil vi starte med å bruke en $M|M|2|K$ -modell for å analysere rundkjøringen. Denne modellen forutsetter en eksponentiell fordeling på ankomsten og betjeningstiden, samt en maksimal lengde på køen før eventuelle bilister snur og velger bort bilreisen. En av fordelene med en $M|M|2|K$ -modell er at vi kan se begrensningene til rundkjøringen i forhold til ankomstrate og

betjeningsrate. Tabell 21 under viser input i modellen for en ti-minutters periode i ettermiddagsrushet, og simuleringer av denne modellen.

Tabell 21: Input i M/M/2/K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	392	392	470 631
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	200	470 410
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringenslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

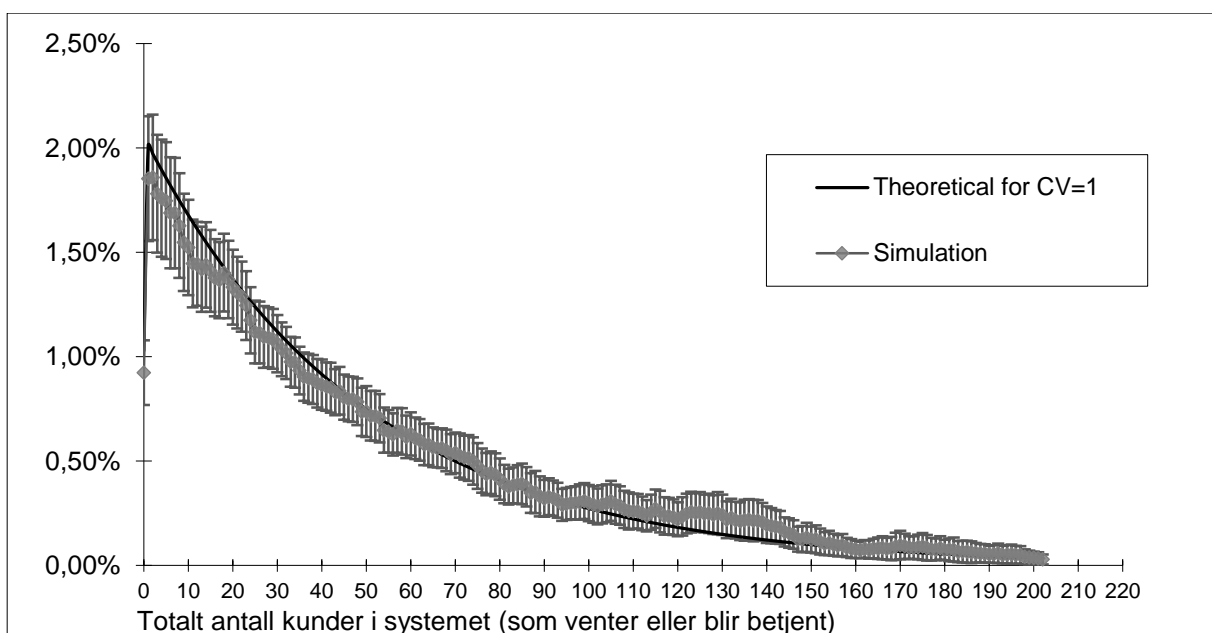
Kapasiteten, K , er satt til 200 ved estimering av lengdene på innkjøringene og ut fra observerte køer, fra fergeleiet har man eksempelvis en alternativ rute til Kransen som bilister har muligheten til å skifte til dersom de opplever at det er dårlig trafikkflyt ved Kanalen. Ankomstraten er beregnet ved å ta et ti-minutters gjennomsnitt av total ankomst for perioden 15.00-17:00, et problem ved å bruke et ti-minutters snitt for perioden er fergeankomstene som støtvis tilfører en kø på mellom 32 og 76 kjøretøy. Både koeffisienten for variasjon til interankomsten og til betjeningstiden er satt til én for å bruke eksponentiell fordeling. Betjeningsraten er satt til 200 per server. Dette vil si at i løpet av en ti-minutters periode skal hver server betjene 200 bilister, med en betjeningstid som blir tre sekunder. Vi har valgt å bruke tre sekunders betjeningstid fremfor fire sekunders betjeningstid fordi hver fil i en rundkjøring kan behandle mer enn én bil om gangen og dermed, ved å redusere betjeningstiden, kan vi bedre analysere hvor mange bilister hver server faktisk kan betjene i løpet av en ti-minutters periode. Simulert tid per repetisjon er satt til tolv, som vil si at for hver repetisjon kjøres det tolv ti-minutters perioder, altså to timer. Vi har valgt tolv siden rushtidsperiodene både morgen og kveld er på to timer. Vi har valgt å kjøre 101 repetisjoner hvor vi ignorerer den første repetisjonen for å ikke starte med tomt system, for å simulere 100 to-timers perioder. Resultatene av simuleringen er vist i tabell 22, under.

Av tabellen under ser vi at det både er høy teoretisk og høy simulert utnyttelse av serverne på henholdsvis 97,8 % og 98,15 %. Den høye utnyttelsen vil si at rundkjøringen går mot maksimal kapasitet for hvor mange bilister den kan betjene i løpet av perioden med normal betjeningsrate. Samt, både gjennomsnittlig ventetid i kø, 67,5 sekunder teoretisk og 74,5

sekunder simulert, og gjennomsnittlig antall som venter i kø, 44 bilister teoretisk og 48 bilister simulert, tyder på at rundkjøringen går mot maksimal kapasitet før betjeningsraten synker. Med en gjennomsnittlig teoretisk ventetid på 67,5 sekunder, samt en simulert ventetid på 74,5 sekunder, per bilist belyses tidskostnadene tydelig. I løpet av de to timene som ettermiddagsrushet varer kjører omtrent 4700 kjøretøy gjennom rundkjøringen. Dersom 4700 bilister venter 74,5 sekunder på å kjøre gjennom rundkjøringen tilsvarer det 97,3 timer ventetid for utvalget for den enkelte rundkjøringen.

Tabell 22: Resultater fra M|M|2|K analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	392	392
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0,1	0,1
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0,03 %	0,03 %
Andel som drar =	0,03 %	0,03 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	44,1	48,6
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	67,5	74,5
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	33,5 %	37,6 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	97,97 %	98,15 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,0	2,0
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	46,1	50,6
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	70,5	77,5
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0



Figur 9: Sannsynlighetsfordeling for antall biler i systemet ved 100 simuleringer av M|M|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen.

I figur 9, over, har vi illustrert de teoretiske og simulerte sannsynlighetene for antall kjøretøy i systemet. Vi har også lagt til et feilfelt for simuleringene som viser konfidensintervallet på 95%. Som er synlig av figuren over følger de simulerte sannsynlighetene den teoretiske forventningen rimelig jevnt.

Tabell 23: Input for 100 simuleringer av G|G|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	392	391,8	470 353
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,5	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	199,4	466 574
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

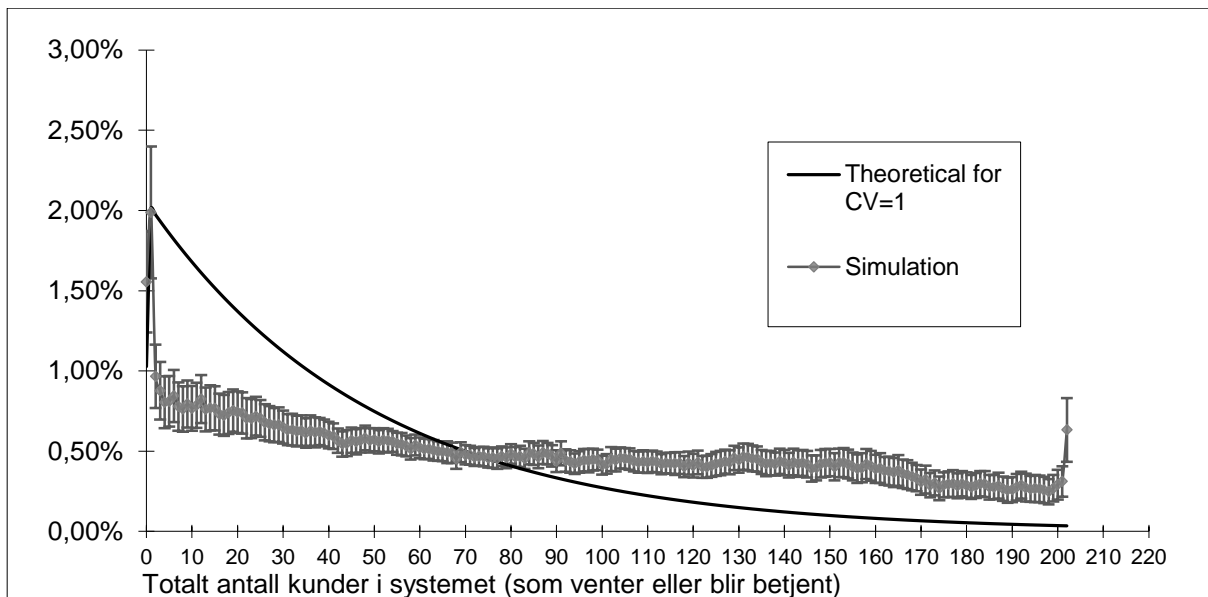
Ettersom betjeningstiden og interankomsten varierer mellom bilister vil vi også bruke en G|G|2|K-modell for å analysere rundkjøringen. Denne modellen forutsetter at vi legger inn en koeffisient for variansen til interankomsten og en koeffisient for variansen til betjeningstiden. Koeffisient for variansen til interankomst er standardavvik for interankomsten over gjennomsnittlig interankomst, altså med en koeffisient for varians som er 1 vil vi ha en eksponentiell fordeling. Ved å bruke denne modellen kan vi bedre observere effekten av variansene til interankomsten og betjeningstiden på køene. Inputet er gjengitt i tabell 23, over.

Vi setter koeffisienten for variasjonen til interankomsten til 1,5, som vil si at standardavviket til interankomsten er 50% høyere enn gjennomsnittlig interankomst. Koeffisienten for variasjonen til betjeningstiden til 2, som vil si at standardavviket til betjeningstiden er dobbelt så høyt som betjeningstiden. Koeffisienten til betjeningstiden er satt så høyt for å bedre illustrere effekten av problemer som kan oppstå i rundkjøringen. Dette kan være å kjøre inn i rundkjøringen uten mulighet til å kjøre ut i ønsket retning, og dermed sperre trafikken i andre retninger. Det kan også være brudd på vikeplikten som forårsaker nødbrems eller andre reduserende effekter på trafikkflyten gjennom rundkjøringen.

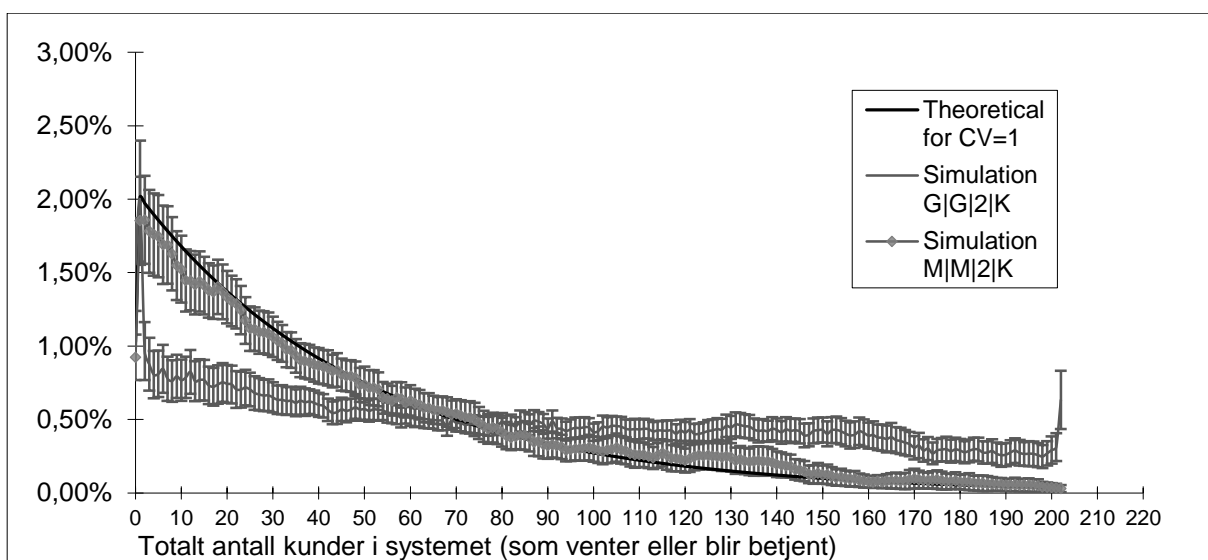
Tabell 24: Resultater fra G|G|2|K analyse av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	M M 2 K Simulert	G G 2 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	392	392	389
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0,1	0,1	3,1
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0,03 %	0,03 %	0,63 %
Andel som drar =	0,03 %	0,03 %	0,77 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	44,1	48,6	80,9
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	67,5	74,5	124,9
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	33,5 %	37,6 %	61,6 %
Sannsynlighet for kø med mer enn 100 kjøretøy som venter =	11,1 %		37,6 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	97,97 %	98,15 %	97,45 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,0	2,0	1,95
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	46,1	50,6	82,9
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	70,5	77,5	127,9
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0	3,0

Av tabell 24, over, ser vi at sammenlignet med den teoretiske har vi gjennomsnittlig tre flere kjøretøy som drar fra systemet fordi det er fullt, med en andel på 0,8%. Det er blitt en økning på gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter i kø på 37 kjøretøy. At det er en økning i belastningen på systemet ved bruk av høyere standard avvik for betjeningstiden og interankomsten er også belyst i sannsynligheten for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter, som har en økning i 24% sammenlignet med resultatet fra M|M|2|K-modellen. Med de økte standardavvikene må vi doble kravet til kø for å komme ned til 37,6% sannsynlighet for en kø som er større enn, til 100. Dette gjenspeiles også i figur 10 og 11, under, som viser sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet. Der ser vi at den øker for M|M|2|K-modellen opp til ca. 70 kjøretøy, hvor G|G|2|K-modellen har en høyere sannsynlighet for de resterende antallene i systemet. Gjennomsnittlig ventetid har økt med 50,4 sekunder, noe som resulterer i en økning i total ventetid for utvalget fra 97,3 timer til 163,1 timer. Denne økningen er et resultat av endringene i standardavviket til både betjeningstiden og interankomsten.



Figur 10: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet ved 100 simuleringer av $G|G|2|K$ -modellen ved flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen



Figur 11: Sannsynlighetsfordeling for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med en $G|G|2|K$ - og $M|M|2|K$ -modellene ved 100 simuleringer sammenlignet

5.2.2 Analyse av trafikkavviklingen i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Kransen er en firearmet rundkjøring med to felt i selve rundkjøringen, to felt i innkjøringen fra vest og ett felt i de resterende innkjøringene, samt utkjøringene. Det vil si at Kransen, som Kanalen, har to servere. Vi starter derfor, som i analysen av Kanalen, med en $M|M|2|K$ -modell. Av tabell 25, under, kan man se inputet i modellen for en 10 minutters periode, og medfølgende simulering.

Tabell 25: Input i M|M/2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	393	383	307 744
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	200	307 745
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

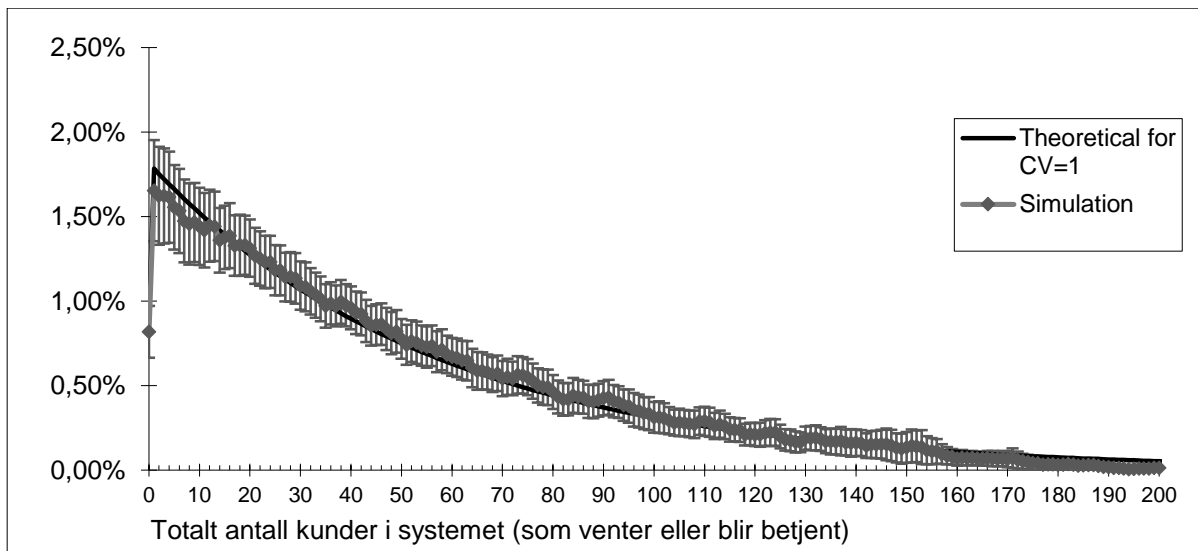
Resultatet av analysen kan ses nedenfor, i tabell 26.

Tabell 26: Resultatene av en simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en M|M/2|K-modell

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	393	393
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0,2	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0,05 %	0,01 %
Andel som drar =	0,05 %	0,01 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	48,8	47,6
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	74,6	72,7
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	37,8 %	38,0 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	98,20 %	98,35 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,0	2,0
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	50,8	49,6
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	77,6	75,7
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0

Av tabellen over kan man se en teoretisk og simulert ventetid på henholdsvis 74,6 sekunder og 72,7 sekunder, i tillegg til gjennomsnittlig kjøretøy i kø på henholdsvis 49 og 48. I likhet med Kanalen, har Kransen en høy teoretisk og simulert utnyttelsesgrad, hvor begge er på rundt 98%, som betyr at selv en liten trafikkøkning kan føre til at betjeningsgraden blir påvirket. Med 48 kjøretøy i gjennomsnitt og en 38% sannsynlighet for mer enn 50 kjøretøy i systemet, betyr det en høy sannsynlighet for stor kødannelse. Av analysen kommer det videre frem at et kjøretøy i gjennomsnitt må vente 73 sekunder gjennom hele systemet, som totalt tilsvarer rundt 95 timer i ventetid. Samtidig er det både en liten teoretisk og simulert sannsynlighet for at bilister kjører vekk, som er på 0,05% og 0,01%.

Under kan man av figur 12 se sannsynlighetsfordelingen til antall kjøretøy i systemet. Konfidensintervallet er satt til 95%.



Figur 12: Sannsynlighetsfordeling av antall biler i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en $M|M|2|K$ -modell

For å inkorporere ulike grader av trafikkintensitet, på bakgrunn av sjåførers ulike kjøremønstre, har vi analysert flaskehalsen Kransen med en $G|G|2|K$ -modell, hvor $CV_A = 1,5$ og $CV_S = 2$. Inputet vises i tabell 27, under.

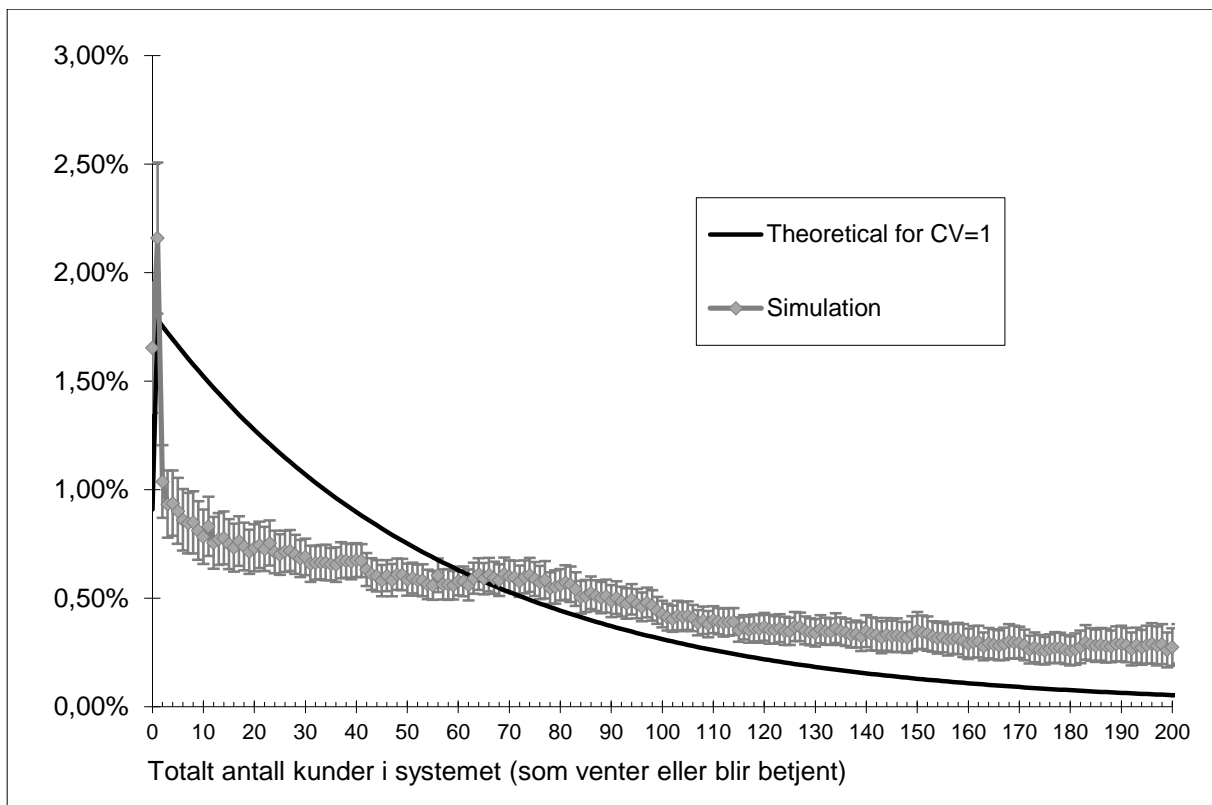
Tabell 27: Input i en $G|G|2|K$ -modell for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	393	391,081	469 505
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,5	1,5	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	199	465 714
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

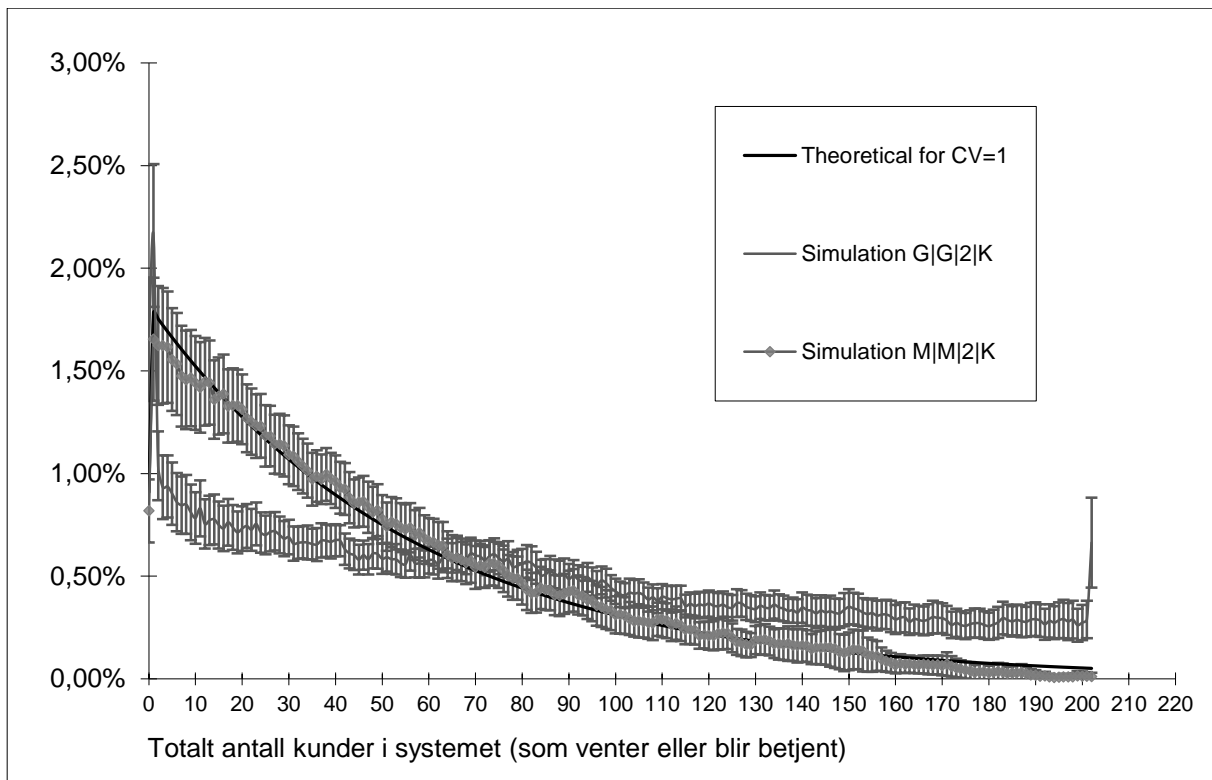
Resultatene av dette inputet kan ses av tabell 28, under. Med en økning i variasjonen får vi store utslag i alle resultatene sammenlignet med en $M|M|2|K$ -modell. Antall som venter i kø øker med nærmere 28 kjøretøy, samtidig som ventetiden går fra 74,6 til 118,4 sekunder; en markant økning med andre ord. Dette har også resultater for andelen som går fra køen, hvor det tidligere var tilnærmet 0%, men har nå beveget seg nærmere 0,8%, som tilsvarer en økning på 3 biler. Gjennomsnittlig ventetid har økt med 43,8 sekunder, hvilket tilsvarer en økning på 57 timer. Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet er gitt i figur 13, under, og sammenlignes med sannsynlighetsfordelingene fra $M|M|2|K$ i figur 14, under.

Tabell 28: Resultat for G|G|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	393	388
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0,2	3,1
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0,05 %	0,66 %
Andel som drar =	0,05 %	0,79 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	48,8	76,6
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	74,6	118,4
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	88,8 %	91,5 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	98,20 %	97,27 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,0	1,9
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	50,8	78,5
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	77,6	121,4
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0



Figur 13: Sannsynlighetsfordeling av antall biler i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en G|G|2|K-modell



Figur 14: Sannsynlighetsfordelingene av antall biler for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen med en G|G|2|K-modell og en M|M|2|K-modell sammenlignet

5.2.3 Analyse av trafikkavviklingen i flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet

For å analysere flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet er det nødvendig å analysere lyskrysset som separate system. Dette er nødvendig på grunn av hvordan lysreguleringen fungerer, som ved rødt lys stopper betjeningen til kjørefeltene. Vi vil derfor analysere lyskrysset i som tre ulike system, nemlig 1) kjørefelt øst til nord, 2) kjørefeltene nord til øst og vest, og 3) kjørefeltene øst til vest og vest til øst. Vi har valgt å dele opp lyskrysset på denne måten på grunn av hvilke kjørefelt som har gjennomkjøring samtidig og betjeningstidene til kjørefeltene. Vi starter med å analysere hvert system med M|M|s|K-modellen før vi simulerer hvert system med G|G|s|K-modellen.

Inputet til M|M|s|K-simuleringen for kjørefelt øst til nord er gjengitt i tabell 29, under. Som er tydelig av tabellen er forventet gjennomsnittlig betjeningsrate langt høyere enn ankomstraten. Dette gjør at vi forventer at det er svært liten sannsynlighet for kø. Resultatene fra simuleringen er gjengitt i tabell 30, under.

Tabell 29: Input til M|M|1|K-modellen for kjørefelt øst til nord for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	1	1	
Kø kapasitet, $K =$	10	10	n
Ankomstrate, $\lambda =$	6,8	7	8 123
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	42	42	8 123
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Tabell 30: Resultater til M|M|1|K-modellen for kjørefelt øst til nord for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	7	7
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	0,03	0,03
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	2,8	2,9
Sannsynlighet for kø med mer enn 2 bilister som venter =	2,6 %	0,4 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	16,19 %	16,11 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	0,2	0,2
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	0,2	0,2
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	17,0	17,3
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	14,3	14,4

Som er tydelig av tabellen over er det en lav gjennomsnittlig utnyttelse av serveren, med kun 16%. Det er svært lav sannsynlighet for kø, som også er tydelig av gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent på kun 0,2. Input for kjørefelt nord til øst og vest er gjengitt i tabell 31, under.

Tabell 31: Input til M|M|2|K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest i flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	50	50	n
Ankomstrate, $\lambda =$	73,25	73	88 050
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	42	42	88 047
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Som er tydelig av tabellen over er ankomstraten høyere opp mot den totale betjeningsraten. Vi forventer derfor at det gjennomsnittlig er litt kø gjennom hele perioden. Resultatene fra simuleringen er gitt i tabell 32, under.

Tabell 32: Resultater fra M|M/2/K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	73	73
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0
Bilister som drar: Sannsynlighet for at systemet er fullt, P_{full} =	0,01 %	0,01 %
Andel som drar =	0,01 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	5,5	5,4
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	45,0	44,2
Sannsynlighet for kø med mer enn 4 bilister som venter =	40,9 %	40,7 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	87,19 %	87,32 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,7	1,7
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	7,2	7,1
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	59,3	58,5
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	14,3	14,3

Kjørefeltene nord til øst og vest har gjennomsnittlig fem kjøretøy i kø med en sannsynlighet for kø med mer enn fire kjøretøy på 40%. Dette resulterer i en høyere gjennomsnittlig utnyttelse av serverne på 87% og en gjennomsnittlig ventetid i sekunder på 44 sekunder.

Tabell 33: Input til M|M/3/K-simulering for kjørefeltene vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

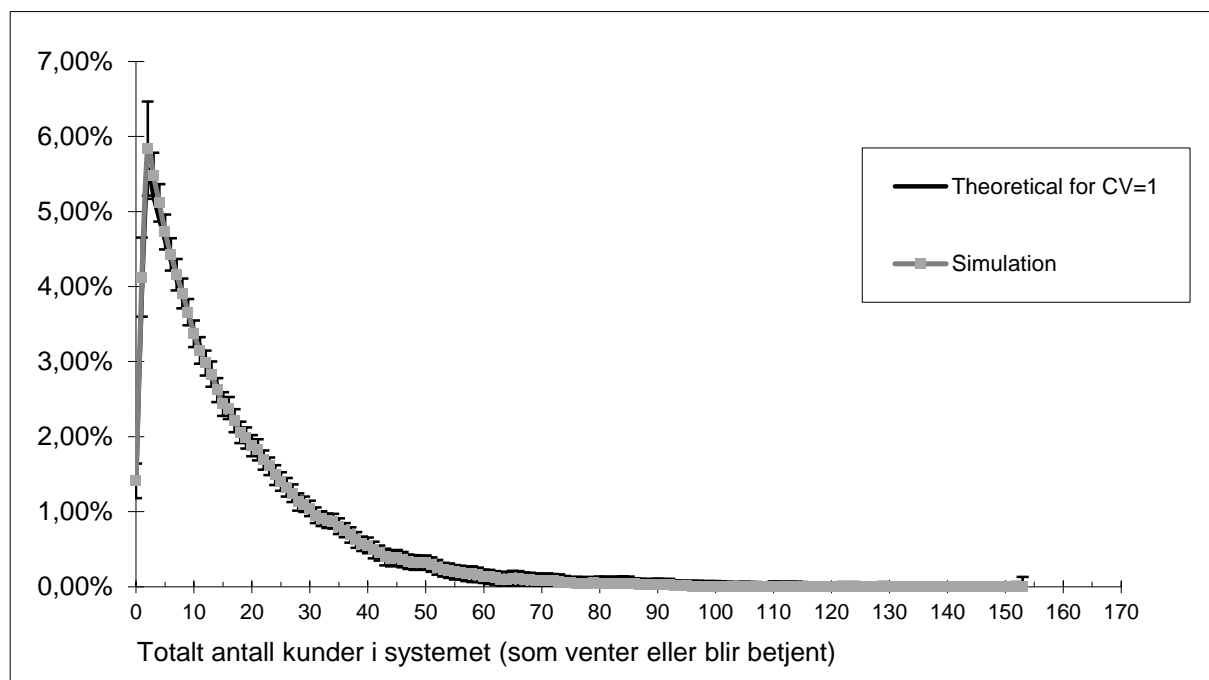
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, s =	3	3	
Kø kapasitet, K =	150	150	n
Ankomstrate, λ =	240	239	287 462
Koeffisient for variasjon til interankomsten, CV_A =	1	1,0	
Betjeningsrate, μ =	85	85	287 475
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, CV_S =	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Inputet til kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst er gjengitt i tabell 33, over. Kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst er en del av hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6. Ankomstraten er den høyeste blant systemene i lyskrysset og betjeningsraten, basert på være observasjoner, er også den høyeste. Vi forventer at det skal oppstå kø i dette systemet. Resultatene fra simuleringen er gjengitt i tabell 34, under.

Tabell 34: Resultater fra M|M|3|K-simulering for kjørefeltene vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	240	239
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	14,4	13,6
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	36,0	34,0
Sannsynlighet for kø med mer enn 15 bilister som venter =	34,1 %	33,1 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	94,17 %	93,89 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,8	2,8
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	17,2	16,4
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	43,0	41,1
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	7,1	7,1

Ut fra resultatene i tabell 34, over, kan vi se en simulert gjennomsnittlig kø på 14 kjøretøy med en gjennomsnittlig ventetid på 34 sekunder. Sannsynligheten for kø med mer enn 15 kjøretøy som venter er på 33,1% og gjennomsnittlig antall i kjøretøy som venter på å bli betjent er 2,8. Total ventetid for lyskrysset er 27,2 timer for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst, 9 timer for kjørefeltene fra nord til øst og vest og 0,05 timer for kjørefeltet fra øst til nord. Altså er den totale ventetiden for hele lyskrysset 36,25 timer. Sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy i systemet er gitt i figur 15, under.



Figur 15: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet for M|M|3|K-simulering av kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Inputet til G|G|1|K-modellen for kjørefeltet fra øst til nord er gjengitt i tabell 35, under.

Tabell 35: Input til G|G|1|K-simulering for kjørefeltet øst til nord i flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	1	1	
Kø kapasitet, $K =$	10	10	n
Ankomstrate, $\lambda =$	6,8	7	8 279
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,1	1,1	
Betjeningsrate, $\mu =$	42	42	8 279
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1,2	1,2	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Vi har valgt å beholde koeffisientene for variasjon til interankomsten og betjeningstiden forholdsvis lav. Dette er fordi under våre observasjoner ble opplevd jevn ankomst og en behandlingstid som varierte med fotgjengere som brukte fotgjengerovergangen i krysset. Resultatene fra simuleringer vises i tabell 36, under. Fra tabellen, ser vi at gjennomsnittlig ventetid har økt fra 2,9 til 4,1 sekunder, mens det er en økning i gjennomsnittlig antall som venter i kø fra 0,03 til 0,05 kjøretøy. Gjennomsnittlig utnyttelse av serveren har økt med 0,1%. Som vi forventet, basert på våre observasjoner, har ikke dette systemet i lyskrysset ved Flemminghjørnet noe kapasitetsproblem. Likevel skal det nevnes at det kan fungere som en triggerneck mot rundkjøringen ved Flemminghjørnet ved at de som skal til dette kjørefeltet må bryte trafikkflyten for de som skal bruke kjørefeltet fra øst til vest fra rundkjøring og gjennom lyskrysset ved Flemminghjørnet.

Tabell 36: Resultater fra G|G|1|K-simulering for kjørefeltet øst til nord for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	M M 1 K Simulert	G G 1 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	7	7	7
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	0,03	0,03	0,005
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	2,8	2,9	4,1
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0,4 %	0,4 %	0,8 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	16,19 %	16,11 %	16,22 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	0,2	0,2	0,2
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	0,2	0,2	0,2
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	17,0	17,3	18,3
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	14,3	14,3	14,3

I tabell 37, under, er inputet til G|G|2|K-simuleringen av kjørefeltene fra nord til øst og vest. Vi har økt koeffisienten for variasjon til interankomsten til 1,5 for å tillate en større ujevnheter i trafikkflyten til disse serverne. Samtidig har vi økt koeffisienten for variasjon til betjeningstiden til 2 for å bedre kunne belyse problemene med tregere gjennomkjøring i disse serverne på grunn av fotgjenger overgang mot vest og ofte saktegående trafikk mot øst på grunn av kort avstand til neste flaskehals.

Tabell 37: Input til G|G|2|K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	50	50	n
Ankomstrate, $\lambda =$	73,25	74	88 401
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,5	1,5	
Betjeningsrate, $\mu =$	42	41	87 227
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Resultatene fra simuleringen vises i tabell 38, under, og ut ifra den ser vi at sannsynligheten for kø med mer enn fire kjøretøy som venter har økt fra 40,7% til 65%. Dette gjenspeiles og i gjennomsnittlig antall som venter i kø som har økt fra 5,4 til 13,8 kjøretøy. Gjennomsnittlig ventetid har økt fra 44,2 til 114,5 sekunder, som er en kraftig økning. Denne kraftige økningen gir et resultat som er høyere enn vi har observert i forhold til gjennomsnittlig observerte hendelser.

Tabell 38: Resultater fra G|G|2|K-simulering for kjørefeltene nord til øst og vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	M M 2 K Simulert	G G 2 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	73	73	73
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0	1,0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0,01 %	0,01 %	1,10 %
Andel som drar =	0,01 %	0 %	1,34 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	5,5	5,4	13,8
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	45,0	44,2	114,5
Sannsynlighet for kø med mer enn 4 bilister som venter =	40,9 %	40,7 %	65 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	87,19 %	87,32 %	87,71 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,7	1,7	1,8
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	7,2	7,1	15,6
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	59,3	58,5	129,0
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	14,3	14,3	14,5

Tabell 39: Input til G|G|3|K-simulering for kjørefeltene fra vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	3	3	
Kø kapasitet, $K =$	150	150	n
Ankomstrate, $\lambda =$	240	240	288 170
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,2	1,2	
Betjeningsrate, $\mu =$	85	85	287 538
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringens lengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

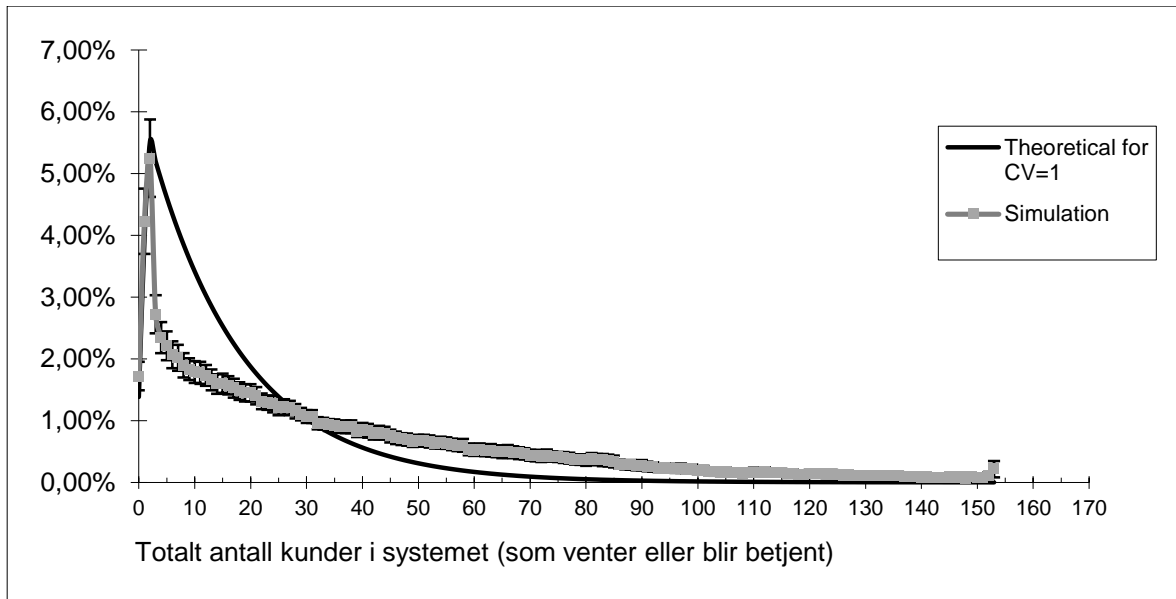
Tabell 39, over, viser inputet til G|G|3|K-simuleringen for kjørefeltene fra vest til øst og øst til vest i lyskrysset ved Flemminghjørnet. Koeffisienten for variasjon til interankomsten er satt til 1,2 fordi den korte distansen mellom rundkjøringen ved Flemminghjørnet og lyskrysset fører til en mindre jevn ankomst for kjøretøy som skal fra øst til vest. Samt, fordi det er flere kjøretøy som bruker det kjørefeltet fra vest som går videre i retning nord i rundkjøringen enn det som skal mot sør og øst. Koeffisienten for variasjon til betjeningstiden er satt til verdien to som følge av triggerneck-effekten rundkjøringen ved Flemminghjørnet har på kjøretøyene som kommer fra vest, med den korte distansen mellom de to serversystemene. Samt en mindre triggerneck-effekt fra rundkjøringen Kransen på kjøretøy som kommer fra øst i lyskrysset.

Tabell 40: Resultater fra G|G|3|K-simulering for kjørefeltene fra vest til øst og øst til vest for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

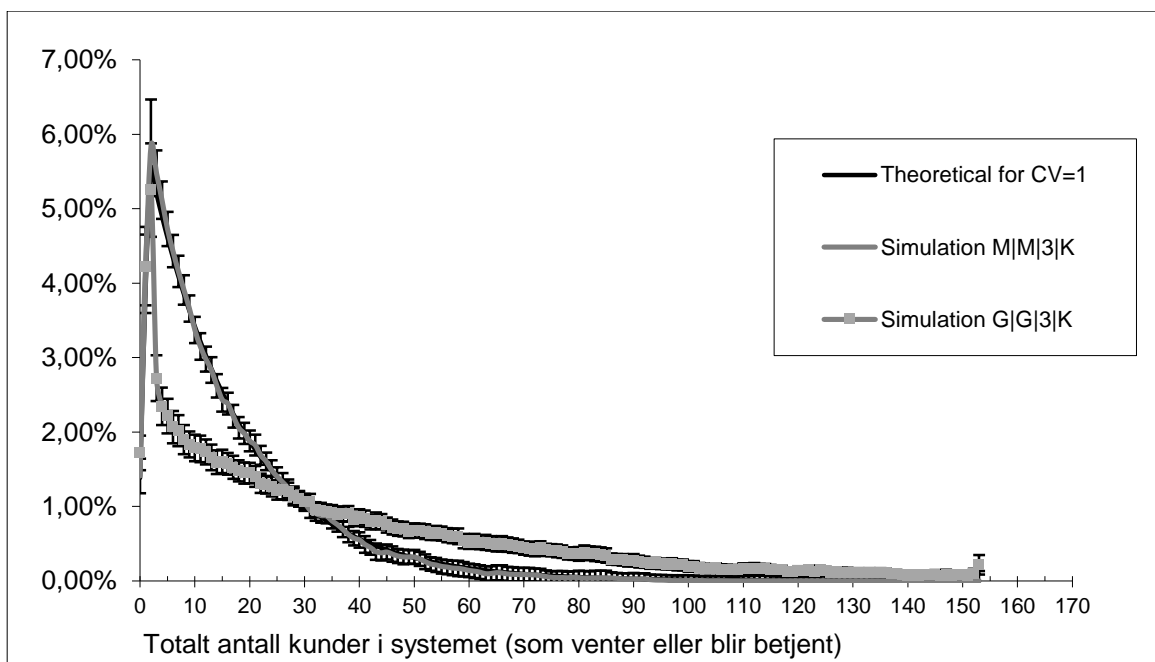
Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	M M 3 K Simulert	G G 3 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	240	239	239
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0	0,6
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %	0,21 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0,23 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	14,4	13,6	33,3
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	36,0	34,0	83,4
Sannsynlighet for kø med mer enn 15 bilister som venter =	34,1 %	33,1 %	59,0 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	94,17 %	93,89 %	93,71 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,8	2,8	2,8
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	17,2	16,4	36,1
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	43,0	41,1	90,4
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	7,1	7,1	7,0

Resultatene fra G|G|3|K-simuleringen er gitt i tabell 40, over. Som vi ser ut fra tabellen har gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter i kø økt fra 13,6 til 33,3 kjøretøy og sannsynligheten

for kø med mer enn 15 kjøretøy som venter har økt fra 33,1% til 59%. Denne økningen i sannsynlighet for et høyere antall kjøretøy i kø er også belyst i figur 16, under, som viser sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy i systemet, samt figur 17 under som viser sannsynlighetsfordelingene for M|M|3|K- og G|G|3|K-modellene sammenlignet. Som følge av den lengre køen vil også gjennomsnittlig ventetid øke, og vi ser ut fra tabellen at den har økt fra 34 til 83,4 sekunder.



Figur 16: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet for G|G|3|K-simulering av kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet



Figur 17: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet sammenlignet for M|M|3|K- og G|G|3|K-simuleringene av kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst for flaskehalsen i lyskrysset ved Flemminghjørnet

Som man ser ut fra figur 17, over, blir det raskt høyere sannsynlighet for økt antall kjøretøy i systemet når vi tar i bruk G|G|3|K- fremfor M|M|3|K-modellen. Vi ser raskt at det er stor forskjell på kumulativ sannsynlighet for antallene, noe som skyldes at det i M|M|3|K-modellen antas en mer perfekt trafikkflyt. Når vi øker standardavvikene for å kunne tillate mer feil og tid hvor systemet ikke betjener noen øker sannsynligheten for flere kjøretøy i systemet. Denne økningen fører til at gjennomsnittlig total ventetid for lyskrysset ved Flemminghjørnet har økt fra 27,2 timer for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst, 9 timer for kjørefeltene fra nord til øst og vest og 0,05 timer for kjørefeltet fra øst til nord, til 66,72 timer for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst, 27,95 timer for kjørefeltene fra nord til øst og vest, og 0,09 timer for kjørefeltet fra øst til nord. Altså har den totale ventetiden for hele lyskrysset økt fra 36,25 timer til 94,76 timer for en periode fra 15:00 til 17:00.

5.2.4 Analyse av trafikkavviklingen i flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Rundkjøringen ved Flemminghjørnet er et veikryss som ligger med kort avstand til et annet veikryss, nemlig lyskrysset ved Flemminghjørnet. Den korte avstanden gjør at disse to lyskryssene fungerer som nedstrøms «triggernecks» for hverandre. Triggernecks er flaskehalsen som direkte påvirker oppstrøms eller nedstrøms enheter. Vi starter igjen med å simulere en M|M|2|K-modell for å belyse hvordan krysset fungerer med ideell trafikk. Tabell 41, under, viser inputet til modellen.

Tabell 41: Input til M|M|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	420	419	503 099
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	220	220	503 069
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

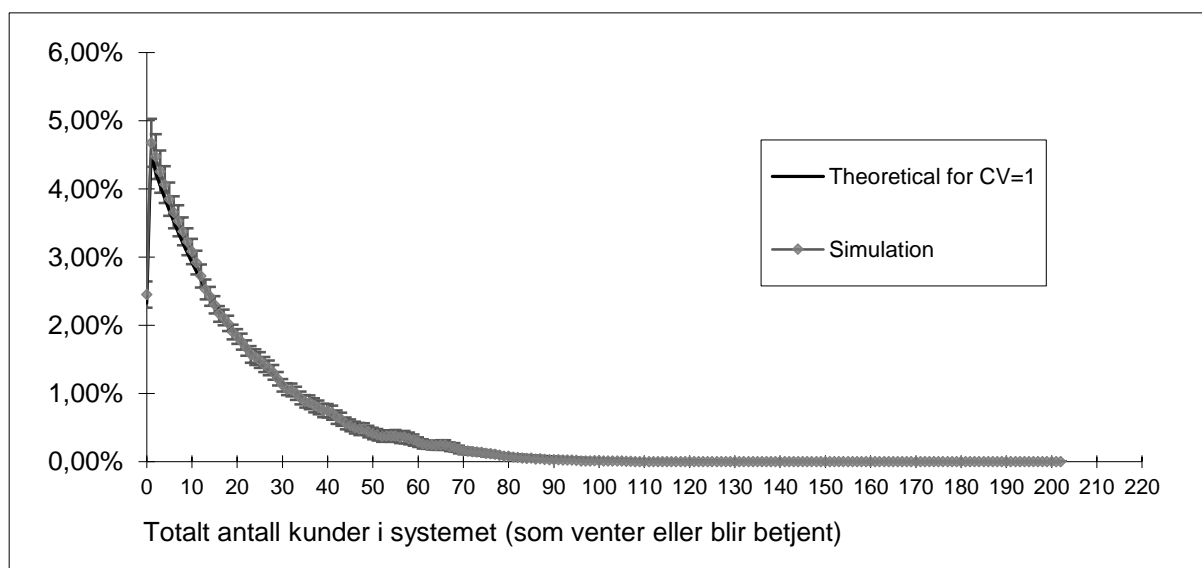
Som vi allerede har påpekt over er de rundkjøringen og lyskrysset ved Flemminghjørnet triggernecks til hverandre. Som følge av dette forholdet vil det i disse to kryssene lettere oppstå problemer med trafikkflyten når trafikken når et av dagens høyeste mengde. Den korte avstandene mellom de to kryssene og den varierende ventetiden i lyskrysset har blitt observert å føre til en kø fra lyskrysset som står inn i, og ut av, rundkjøringen ved

Flemminghjørnet. Vi forventer derfor at det i simuleringen med M|M|2|K-modellen blir resultater som underdriver problemene i rundkjøringen ved Flemminghjørnet. Resultatet fra simuleringen er gitt i tabell 42, under.

Tabell 42: Resultater fra simulering av M|M|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	420	419
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	20	17,6
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	27,9	25,2
Sannsynlighet for kø med mer enn 30 bilister som venter =	22,0 %	19,8 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	95,45 %	95,21 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,9	1,9
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	21,5	19,5
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	30,7	27,9
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	2,7	2,7

Som forventet er resultatene fra simuleringen med M|M|2|K-modellen lave i forhold til observerte forhold. Med en gjennomsnittlig total kø inn gjennom fire innkjøringer på 17,6 kjøretøy. Videre ser vi at ventetiden i kø er forholdsvis kort, med et 25,2 sekunder simulert gjennomsnitt. Dette igjen tyder på at forutsetningene i M|M|2|K-modellen gjør at resultatene fra simuleringen underdrives i forhold til hva som er observert. Den totale ventetiden blir for M|M|2|K-modellen 35,3 timer i løpet av perioden mellom 15:00 og 17:00.



Figur 18: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy med simulering av M|M|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy i systemet er gjengitt i figur 18, over, og illustrerer problemet med for gode forutsetninger i modellen.

For å bedre kunne illustrere trafikkflytproblemene i rundkjøringen ved Flemminghjørnet vil vi simulere med G|G|2|K-modellen. Inputet i modellen er gjengitt i tabell 43, under.

Tabell 43: Input til simulering med G|G|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	420	420,3	504 485
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	220	221,3	503 149
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2,5	2,5	
Simulert tid per repetisjon, simuleringens lengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

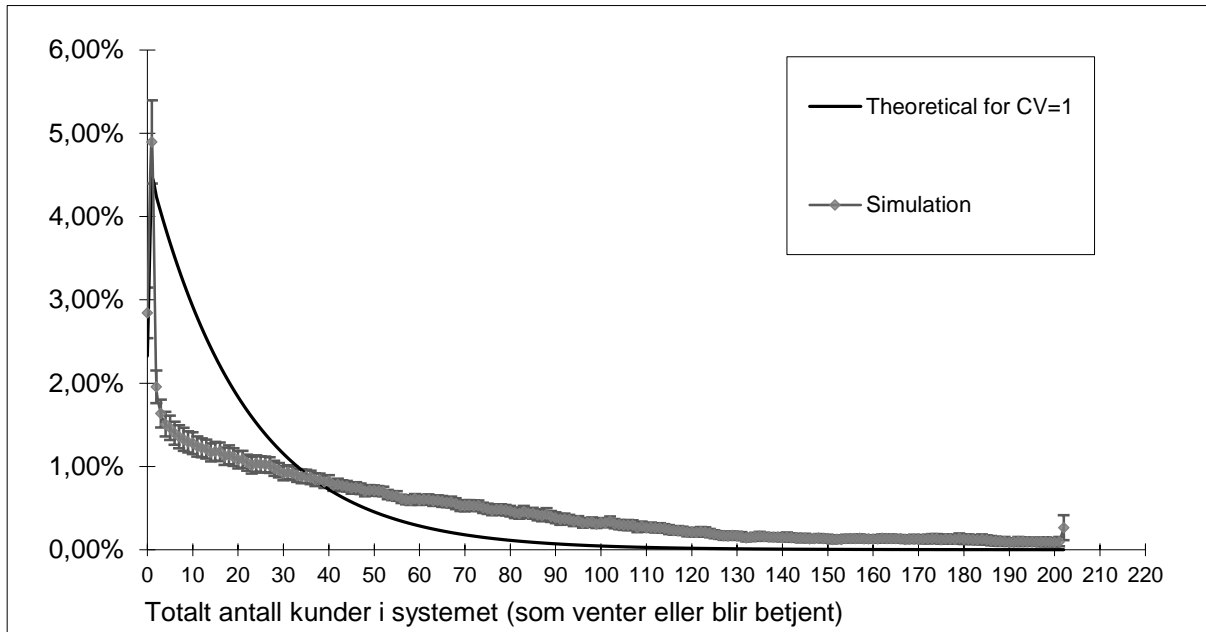
For simuleringen har vi økt koeffisienten for variasjon til betjeningstiden til 2,5. Vi har gjort dette for å bedre vise effekten av lyskrysset ved Flemminghjørnet sin triggerneck-effekt på rundkjøringen. Koeffisienten for variasjon til interankomsten har vi valgt å beholde på 1, ettersom vi observerte en svært jevn ankomst til rundkjøringen. Resultatene fra simuleringen er gitt i tabell 44, under.

Tabell 44: Resultater av simulering med G|G|2|K-modellen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

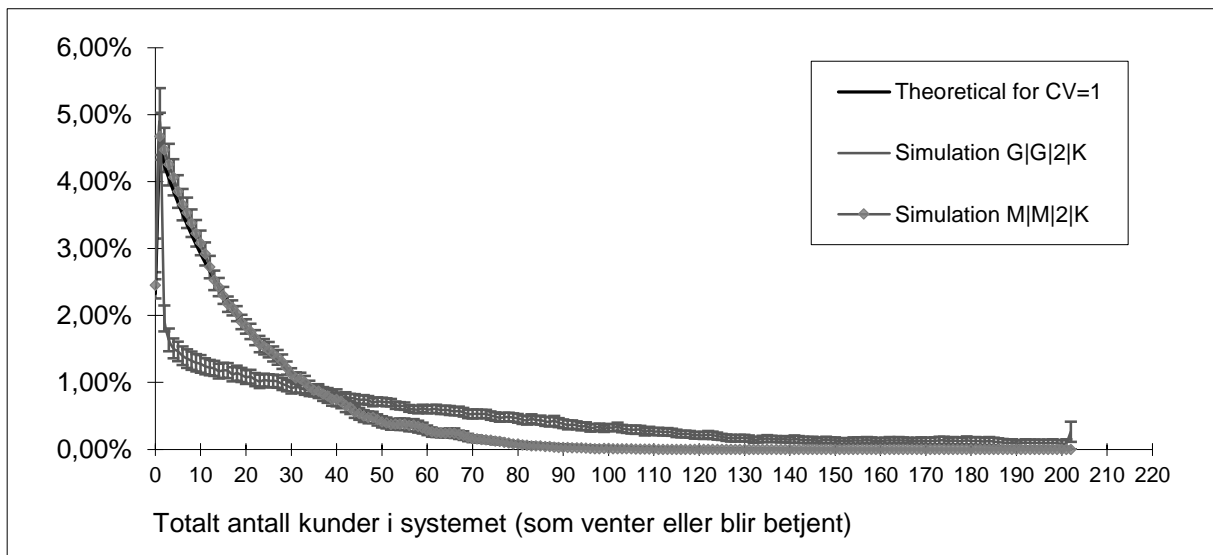
Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert M M 2 K	Simulert G G 2 K
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	420	419	419
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0	1
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	20	17,6	51
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	27,9	25,2	73,0
Sannsynlighet for kø med mer enn 30 bilister som venter =	22,0 %	19,8 %	55,5 %
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	8,7 %		39,8 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	95,45 %	95,21 %	94,71 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,9	1,9	1,89
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	21,5	19,5	52,9
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	30,7	27,9	75,7
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	2,7	2,7	2,7

Resultatene viser en økning i gjennomsnittlig antall som venter i kø fra 17,6 til 51 kjøretøy og en økning i gjennomsnittlig ventetid fra 25,2 til 73 sekunder. Dette vil også si at total ventetid

for har økt fra 35,3 timer til 102,2 timer. Sannsynligheten for kø med mer enn 30 kjøretøy som venter har økt fra 19,8% til 55,5% og sannsynligheten for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter er på 39,8%. Sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy i systemet er vist i figur 19, under, og viser tydelig at sannsynligheten for få kjøretøy i systemet har blitt redusert, mens sannsynlighetene for 40 eller flere kjøretøy i systemet har økt.



Figur 19: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet med simulering av $G|G|2|K$ -modellen



Figur 20: Sannsynlighetsfordelingene for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet med $M|M|2|K$ - og $G|G|2|K$ -modellene

Som vi ser av sannsynlighetsfordelingene for $M|M|2|K$ - og $G|G|2|K$ -modellene i figur 20, over, er det stor forskjell mellom sannsynlighetene for antall kjøretøy i de to modellene.

G|G|2|K-modellen har høyere kumulativ sannsynlighet for høyere antall biler og viser etter vår oppfatning triggerneck-effekten fra lyskrysset ved Flemminghjørnet på rundkjøringen.

5.2.5 Analyse av trafikkavviklingen for flaskehalsen Mosseporten

Mosseporten er en tunnel på 290 meter, med to felt for gjennomkjøring – en i hver retning – som tilsvarer én server. Veien har en fartsgrense på 60 km/t, så det antas at et kjøretøy vil benytte rundt 20 sekunder på en gjennomkjøring. Vi har foretatt en analyse av Mosseporten, hvor inputet kan ses i tabell 45.

Tabell 45: Input til simulering med M|M|2|K-modellen for flaskehalsen Mosseporten

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	257	257,767	309 404
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1	
Betjeningsrate, $\mu =$	140	140	309 416
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1	1,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

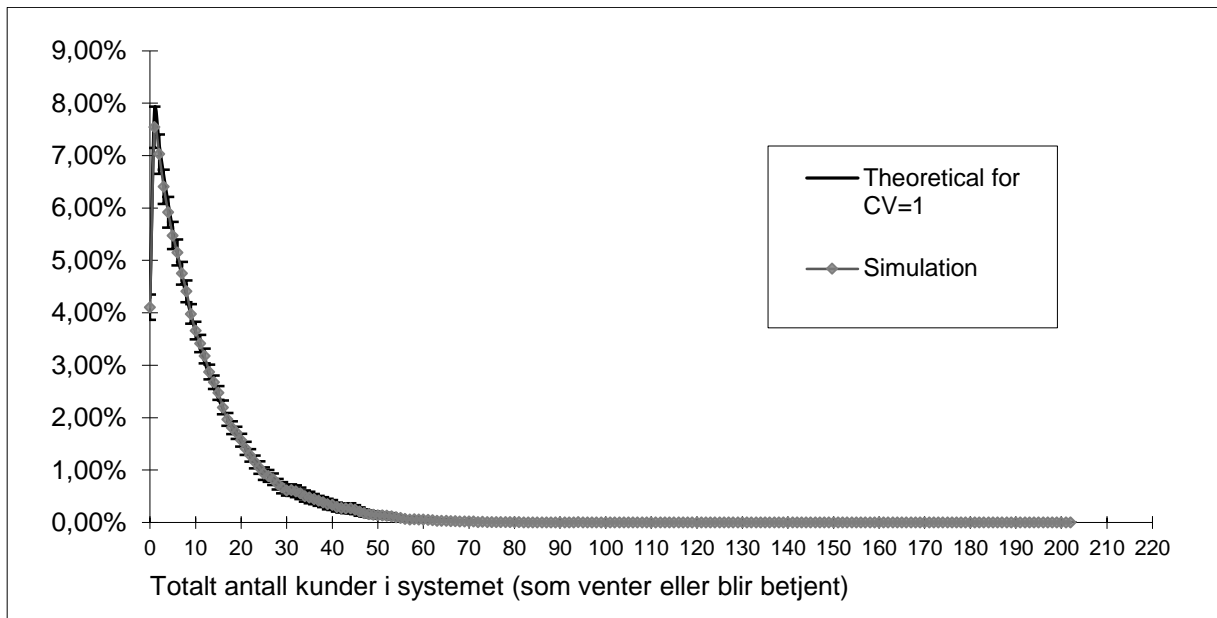
Basert på dette inputet, fikk vi følgende resultater.

Tabell 46: Resultatet av analysen for flaskehalsen Mosseporten med en M|M|2|K-modell

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	257	258
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	9,8	10,1
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	22,9	23,4
Sannsynlighet for kø med mer enn 10 bilister som venter =	34,2 %	35,0 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	91,79 %	92,12 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,8	1,8
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	11,7	11,9
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	27,2	27,7
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	4,3	4,3

Det fremkommer av tabell 46 at det ikke er like store problemer med kø for Mosseporten som resten av flaskehalsene. Både teoretisk og gjennom simulering kan vi anta at 10 biler kommer til å stå i kø, hvor de vi bruke rundt 24 sekunder gjennom tunellen. Et kjøretøy blir sett på som betjent i det den kommer ut av tunellen, hvor betjeningstiden er hvor lang tid det er mellom

hvert kjøretøy som kommer ut av tunnelen. Det er en høy utnyttelse av systemet, og samtidig en viss sjanse for mer enn 10 biler i systemet. Sannsynlighetsfordelingene er vist i figur 21, under.



Figur 21: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet med en M|M|2|K-modell for flaskehalsen Mosseporten

Avhengig av sjåfør og kjøretøy, vil det være forskjellig betjening- og ankomstrate. Vi har simulert denne variasjonen ved å endre på variasjonskoeffisienten for både betjening og ankomst. Dette vil bli simulert gjennom en M|G|1|K-modell, hvor CV_a og CV_s har verdiene 1 og 1,5. De er ikke satt like høyt som foregående servere da det antas at færre hendelser med reduserende effekter på trafikkflyten finner sted i en tunnel.

Tabell 47: Input til simulering med G|G|2|K-modellen for flaskehalsen Mosseporten

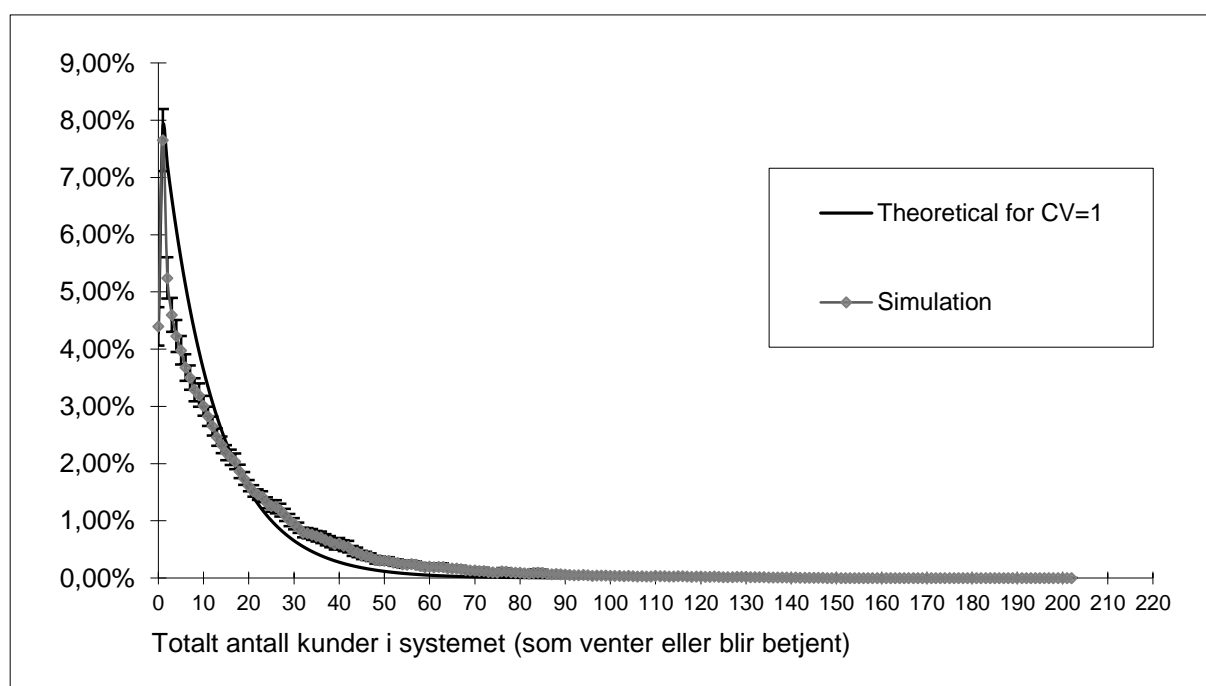
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	257	257,064	308 578
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	0,997	
Betjeningsrate, $\mu =$	140	140	308 525
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1,5	1,5	
Simulert tid per repetisjon, simuleringenslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), $nReps =$	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Resultatet av dette inputet i tabell 47 er oppsummert i tabell 48, under.

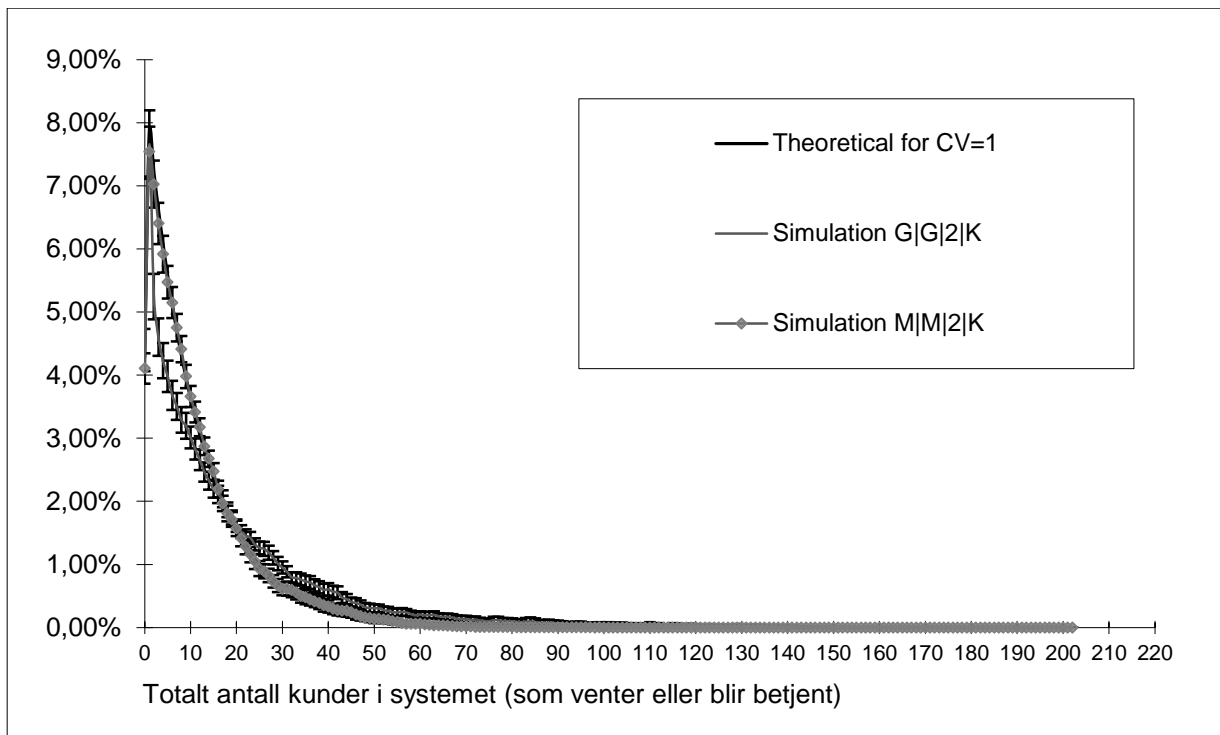
Tabell 48: Resultatet av analysen for flaskehalsen Mosseporten med en G|G|2|K-modell

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	M M 2 K Simulert	G G 2 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	257	258	257
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	9,8	10,1	16,7
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	22,9	23,4	38,9
Sannsynlighet for kø med mer enn 10 bilister som venter =	34,2 %	35,0 %	47,7 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	91,79 %	92,12 %	91,78 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,8	1,8	1,8
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	11,7	11,9	18,5
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	27,2	27,7	43,2
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	4,3	4,3	4,3

Med en 50% økning standardavviket til betjeningstiden, har de fleste variabler blitt merkbart påvirket. Antall kjøretøy som venter i kø har økt med 9 – nesten en dobling, samtidig har ventetiden gått fra 23,9 til 45,1 sekunder. Samme tendenser vises hos antall kjøretøy og tid i systemet, hvor antallet har blitt omtrent doblet fra 11 til 20, og man kan forvente en økning i tid brukt i tunnelen fra 26,1 til 47,3 sekunder. Det eneste som ikke har blitt påvirket er antall kjøretøy som stikker fra køen, som holder seg på 0%. Sannsynlighetsfordelingene for G|G|2|K-modellen er gjengitt i figur 22, under, og sammenlignet med M|M|2|K-modellen i figur 23, under.



Figur 22: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet med en G|G|2|K-modell for flaskehalsen Mosseporten



Figur 23: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i systemet sammenlignet for M|M|3|K- og G|G|3|K-simuleringene for flaskehalsen Mosseporten

Vi har også analysert en situasjon hvor tunnelen er stengt i en retning. Det kan f.eks. være et sammenstøt mellom kjøretøy eller bygningsarbeid. Det har blitt simulert ved å halvere betjeningsraten i en M|G|1|K-modell. Det er ikke blitt brukt en M|M|1|K-modell fordi det mer eller mindre representerer perfekt flyt, hvilket er urimelig å anta.

Tabell 49: Input for en M|G|1|K-modell for flaskehalsen Mosseporten med halvert trafikkflyt

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	1	1	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	257	256,627	308 026
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	0,995	
Betjeningsrate, $\mu =$	140	140	168 524
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1,5	1,5	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Hvor resultatet av inputet i tabell 49 kan ses av tabell 50, under.

Tabell 50: Resultatet av analysen for flaskehalsen Mosseporten med en M|G|1|K-modell med halvert trafikkflyt

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	140	140
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	117	116,2
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	45,53 %	45,29 %
Andel som drar =	45,53 %	45,28 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	198,8	198,2
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	852	847
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	100 %	100 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	100 %	100 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,0	1,0
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):		
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	199,8	199,2
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	856,3	851,3
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	4,3	4,3

Av tabell 50 er det helt klart et stort problem hvis den ene veien hadde blitt sperret. Nesten halvparten av bilene som ankommer, vil dra med en gang. I tillegg må de 199 bilene som velger å stå i kø må i gjennomsnitt vente 847 sekunder. I en sånn situasjon vil serveren oppnå 100% utnyttelse, hvilket har en meget ugunstig effekt for hele systemet, med 200 ventende totalt og med en total ventetid på rundt 850 sekunder.

5.2.1 Oppsummering av analyse av dagens trafikkavvikling

Våre analyser viser at de fleste flaskehalsene har problemer med å håndtere den nåværende trafikken. Flaskehalsen Kanalen har en utnyttelsesgrad (ρ) på rundt 98%, som kan ses på som meget høyt. I gjennomsnitt kan man forvente at kjøretøy må vente 124,9 sekunder i kø (W_q), hvor det kan gå ned mot 74,5 sekunder hvis flyten blir bedre. Det vil også i gjennomsnitt være 81 kjøretøy i køen (L_q), som kan bli redusert ned mot 48 hvis trafikkflyten forbedres. Situasjonen for flaskehalsen Kransen er tilnærmet lik flaskehalsen Kanalen. Serverens utnyttelse er på omtrent 98%, kjøretøyene venter i gjennomsnitt 118,4 sekunder i kø og det er 77 som venter i kø. Hvis flyten forbedres kan gjennomsnittlig ventetid gå ned mot 72,7 sekunder, og antall biler i kø kan gå ned til 48. For flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet har vi analysert lyskrysset som separate systemer, henholdsvis øst til nord ($\emptyset N$), nord til øst og vest ($N\emptyset V$) og øst til vest og vest til øst ($V\emptyset$). Av analysene kommer det frem at $\emptyset N$ har en lav utnyttelse av server, lav ventetid og køen er ikkeeksisterende. For $N\emptyset V$ og $V\emptyset$ er situasjonen helt annerledes. Begge har en høy grad av serverutnyttelse – 87% for $N\emptyset V$ og 93% for $V\emptyset$. Ventetiden ligger omtrent på samme nivå som de andre flaskehalsene – $N\emptyset V$ har i gjennomsnitt 114,5 sekunder og $V\emptyset$ har 83,4 sekunder. Antall kjøretøy i kø ligger i

gjennomsnitt på 14 for NØV og 33 for VØ. Forbedringspotensialet er følgelig stort for NØV og VØ. For NØV kan ventetid i sekunder og antall kjøretøy i kø reduseres med henholdsvis 70 sekunder og 9 kjøretøy. For ØV kan ventetid i sekunder og antall kjøretøy i kø reduseres med henholdsvis 50 sekunder og 20 kjøretøy. For flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet kommer det frem av analysen en utnyttelsesgrad på rundt 95%. Ventetiden er i gjennomsnitt 73 sekunder, som kan komme ned mot 25,2 sekunder ved en bedring av trafikkflyten. Antall kjøretøy i kø ligger på omtrent 77, som kan gå nedover mot 48 hvis flyten forbedres. Flaskehalsen Mosseporten har en serverutnyttelse på omtrent 92%, men lave tall for både ventetid og antall kjøretøy i kø. De er på henholdsvis 38,9 sekunder og 17 kjøretøy. Disse tallene kan reduseres til 23,4 sekunder og 10 kjøretøy ved en situasjon med perfekt flyt. Det ble også sett på hva som ville skje hvis ett av feltene gjennom Mosseporten ble stengt, for eksempel ved veiarbeid. Da steg utnyttelsesgraden til 100%, ventetiden gikk opp til 850 sekunder og det ville stått 199 kjøretøy i kø.

5.3 Analyse av en utvidelse av hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 Nord

I dette underkapittelet ønsker vi å belyse effekten av å utvide hovedfartsåren mellom fergeleiet til Bastø Fosen og E6 til å ha to kjørefelt i hver retning gjennom hele systemet. Dette vil si at rundkjøringene blir utvidet fra dagens to kjørefelt til rundkjøringer med tre kjørefelt, lyskrysset ved Flemminghjørnet vil utvides til å ha to kjørefelt fra øst mot vest og Mosseporten vil utvides til å ha to kjørefelt i hver retning. Vi starter med å analysere flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen og øker antall servere med én for å se effekten sammenlignet med resultatene fra G|G|2|K-simuleringen. Videre i kapittelet vil samt foreta tilsvarende simuleringer og sammenligninger for de resterende flaskehalsene.

Tabell 51: Input til G|G|3|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

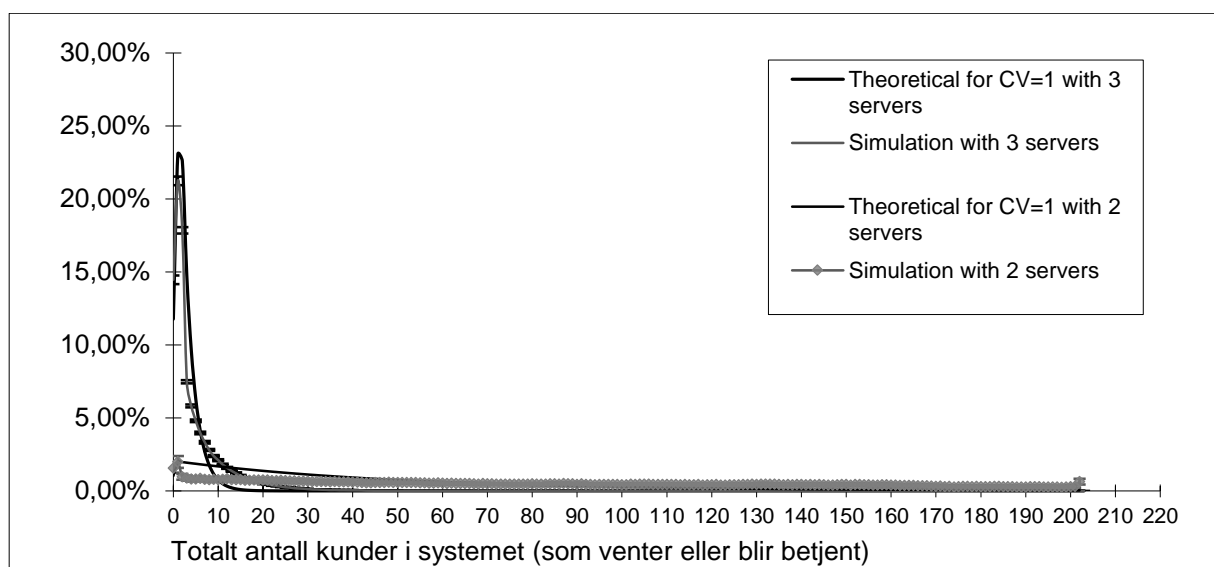
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	3	3	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	392	392	470 493
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,5	1,5	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	200	470 496
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringens lengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Inputet til G|G|3|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen er gitt i tabell 51, over.

Tabell 52: Resultater fra G|G|3|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 2 K Simulert	G G 3 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	392	389	392
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	3,1	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0,63 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0,77 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	0,8	80,9	2,8
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	1,2	124,9	4,4
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0 %	61,6 %	0 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	65,33 %	97,45 %	65,44 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,0	1,95	2,0
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	2,8	82,9	4,8
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	4,2	127,9	7,4
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0	3,0

Vi ser av tabell 52, over, at ved å øke antall servere med én har det skjedd store endringer i resultatene. Gjennomsnittlig ventetid er redusert fra 124,9 til 4,4 sekunder og gjennomsnittlig antall som venter i kø har blitt redusert fra 80,9 til 2,8 kjøretøy. Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne har blitt redusert fra 97,45% til 65,44%. Dette betyr at man ved å utvide systemet med én server, kan tåle større økninger i ankomst. Sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy i systemet er gitt i figur 24, under, og viser at det er en stor forskjell i sannsynlighet mellom to- og tre-server systemene for et lavt antall kjøretøy i systemet.



Figur 24: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen sammenlignet for 2- og 3-server systemer.

Tabell 53: Input til G|G|3|K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen.

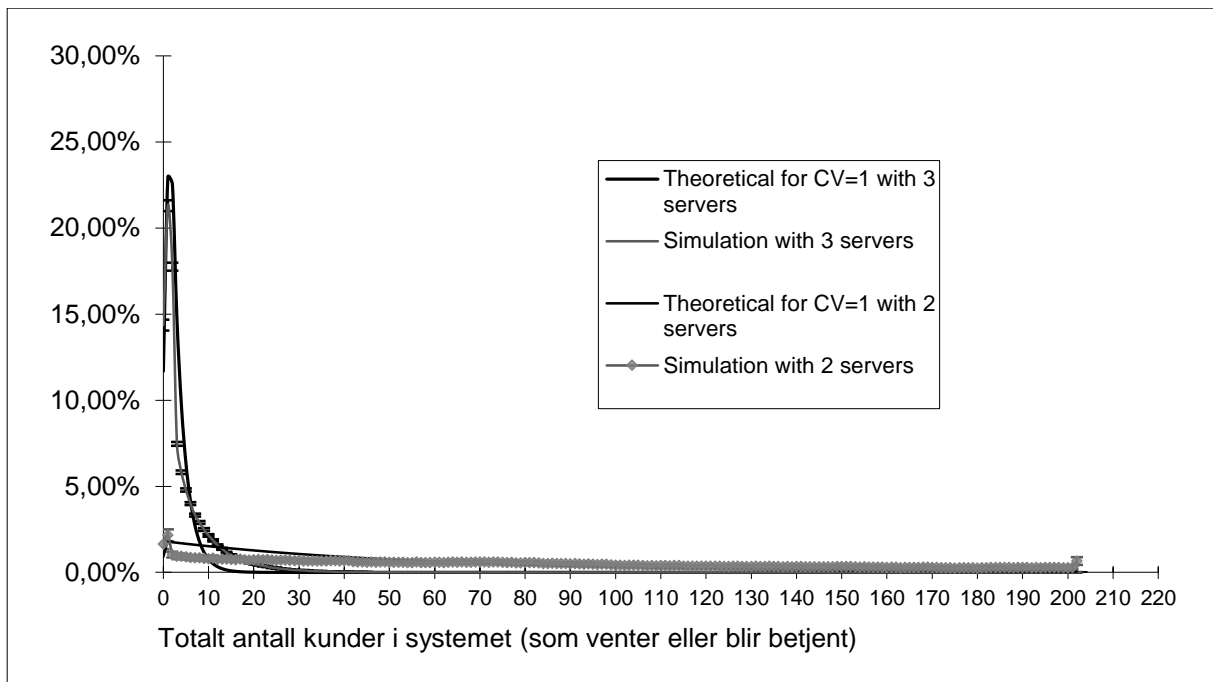
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	3	3	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	393	392	470 291
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,5	1,5	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	199	470 293
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Tabell 53, over, viser inputet til G|G|3|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen. Tabell 54, under, viser resultatene fra simuleringen og sammenligner med to-server systemet. Vi ser igjen at av ved å øke antall servere med én resulterer det i store utslag. Gjennomsnittlig antall som venter i kø blir redusert fra 76,6 til 2,8 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid reduseres fra 118,4 til 4,4 sekunder. Dette vil si at vi med normal ankomstrate nesten har eliminert køen ved å øke med fra to til tre servere. Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne har blitt redusert fra 97,27% til 65,52%.

Tabell 54: Resultater fra G|G|3|K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 2 K Simulert	G G 3 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	393	388	392
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	3,1	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0,66 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0,79 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	0,8	76,6	2,8
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	1,2	118,4	4,4
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0 %	91,5 %	0 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	65,50 %	97,27 %	65,52 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,0	1,9	2,0
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	2,8	78,5	4,8
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	4,2	121,4	7,4
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0	3,0

Sannsynlighetsfordelingene for to- og tre-server systemene er gjengitt i figur 25, under, og understreker at sannsynligheten for et lavt antall kjøretøy i systemet har økt ved utvide med én server.



Figur 25: Sannsynlighetsfordeling for antall kjøretøy i to- og tre-server systemene for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen sammenlignet

For flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet utvider vi kun kjørefeltene i hovedfartsåren, øst↔vest. Dette vil si at i fartsretningen fra vest til øst beholder vi to servere, mens vi i fartsretningen fra øst til vest utvider med én server, til to servere. Inputet til G|G|4|K-simuleringen er gjengitt i tabell 55, under.

Tabell 55: Input til G|G|4|K-simulering for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet fra øst til vest og vest til øst

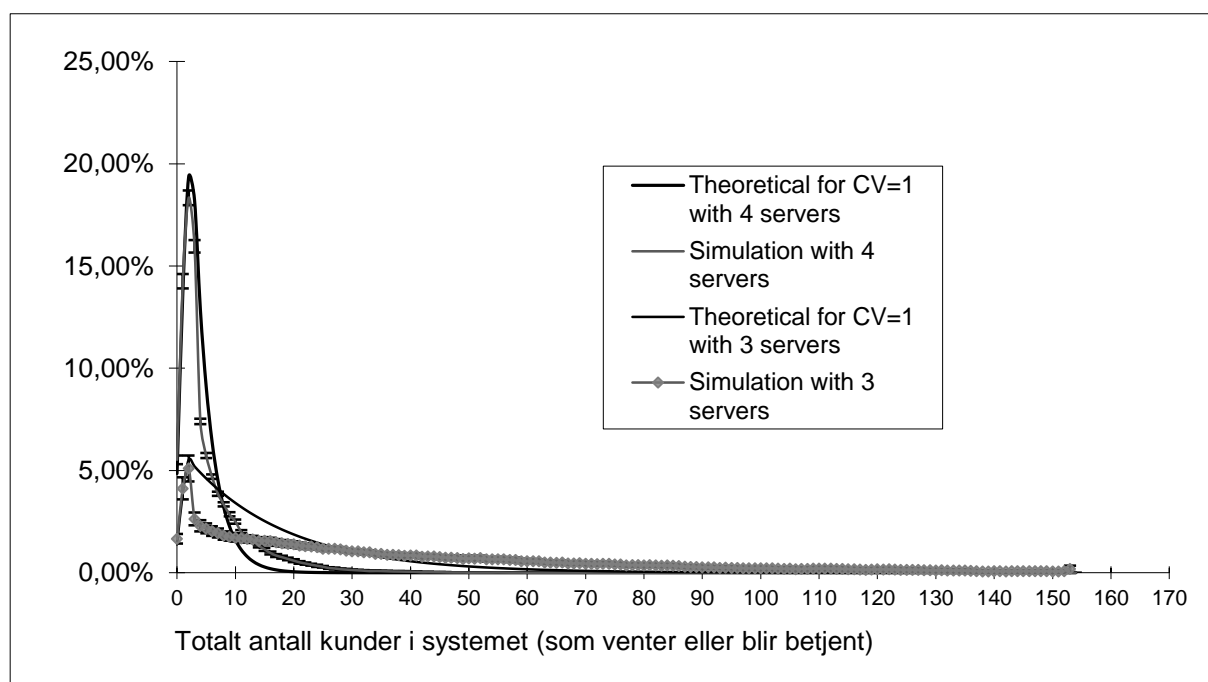
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	4	4	
Kø kapasitet, $K =$	150	150	n
Ankomstrate, $\lambda =$	240,13	240	287 574
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,2	1,2	
Betjeningsrate, $\mu =$	85	85	287 559
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2,0	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Resultatet fra G|G|4|K-simuleringen er gjengitt i tabell 56, under. Resultatene er som forventet redusert sammenlignet med G|G|3|K-simuleringen og gjennomsnittlig antall som venter i kø har blitt redusert fra 33,3 til 2,8 kjøretøy. Gjennomsnittlig ventetid har blitt redusert fra 83,4 til 7,1 sekunder og gjennomsnittlig utnyttelse av serverne har blitt redusert fra 93,71% til 70,62%.

Tabell 56: Resultater fra G|G|4|K-simulering for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet fra øst til vest og vest til øst

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 3 K Simulert	G G 4 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	240	239	240
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0,6	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0,21 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0,23 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	1,1	33,3	2,8
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	2,6	83,4	7,1
Sannsynlighet for kø med mer enn 15 bilister som venter =	0,2 %	59,0 %	4,5 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	70,63 %	93,71 %	70,62 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,8	2,8	2,8
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	3,9	36,1	5,7
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	9,7	90,4	14,2
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	7,1	7,0	7,1

Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemene er gjengitt i figur 26, under. Av sannsynlighetsfordelingene ser vi at sannsynlighetene for et lavt antall kjøretøy har økt kraftig som følge av utvidelsen med én server.



Figur 26: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i tre- og fire-server systemene for flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet i kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst

Tabell 57, under, viser inputet til G|G|3|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet.

Tabell 57: Input til G|G|3|K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

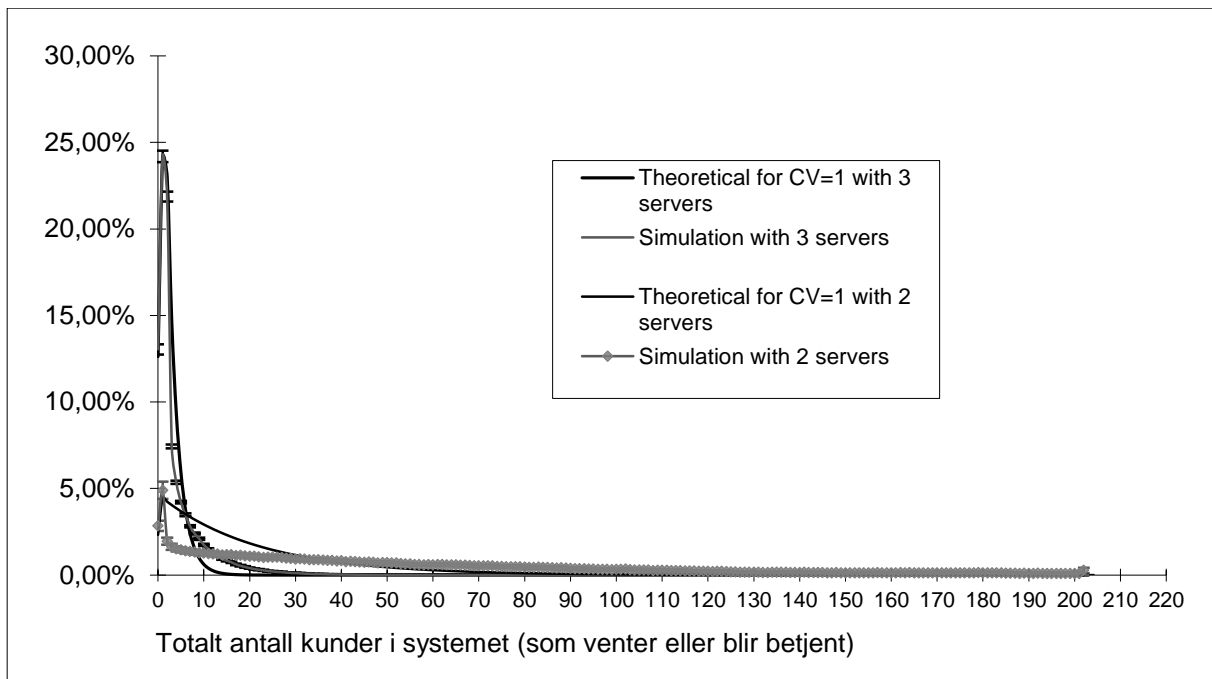
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	3	3	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	420	420	503 580
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1,0	
Betjeningsrate, $\mu =$	220	220	503 598
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2,5	2,5	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Resultatene fra G|G|3|K-simuleringen er gjengitt i tabell 58, under, og viser at ved å øke systemet med én server har det hatt store utslag på resultatene. Gjennomsnittlig antall som venter i kø har blitt redusert fra 51 til 2,4 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid har blitt redusert fra 73 til 3,5 sekunder.

Tabell 58: Resultater fra G|G|3|K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 2 K Simulert	G G 3 K Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	420	419	420
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	1	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	0,7	51	2,4
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	1,0	73,0	3,5
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0 %	55,5 %	0,1 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	63,64 %	94,71 %	63,55 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,9	1,89	1,9
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	2,6	52,9	4,4
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	3,7	75,7	6,2
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	2,7	2,7	2,7

Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemene ved en økning fra to til tre kjørefelt er gjengitt i figur 27, under, og viser at det er forventet en økt sannsynlighet for lavere antall kjøretøy i systemene ved å øke med én server.



Figur 27: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet sammenlignet for to- og tre-server systemene for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet sammenlignet

Inputet til G|G|4|K simuleringen for flaskehalsen Mosseporten er gjengitt i tabell 59, under. For Mosseporten øker vi til to kjørefelt i begge retninger og forventer som følge av dette at køene blir tilnærmet eliminert.

Tabell 59: Input til G|G|4|K-simulering når flaskehalsen Mosseporten blir utvidet med 2 kjørefelt

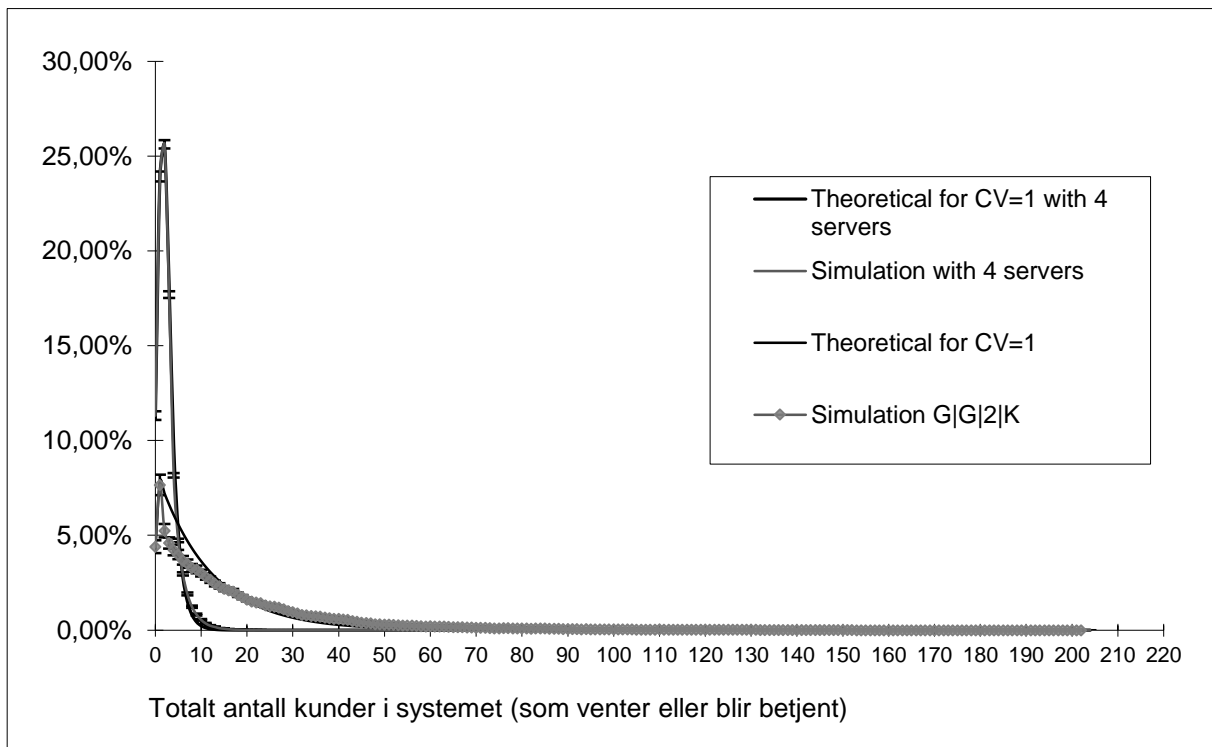
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	4	4	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	257	257	308 841
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1	
Betjeningsrate, $\mu =$	120	120	308 841
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1,5	1	
Simulert tid per repetisjon, simuleringslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Resultatene fra G|G|4|K-simuleringen er gjengitt og sammenlignes med G|G|2|K-simuleringen i tabell 60, under. Som forventet har utvidelsen fra to til fire kjørefelt ført til at køen har blitt tilnærmet eliminert. Gjennomsnittlig antall som venter i kø er redusert fra 16,7 til 0,4 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid har blitt redusert fra 38,9 til 0,9 sekunder. Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne har blitt redusert fra 91,78% til 54%.

Tabell 60: Resultater fra G|G|4|K-simulering når flaskehalsen Mosseporten blir utvidet med 2 kjørefelt

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 2 K Simulert	4s Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	257	257	257
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	0,2	16,7	0,4
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	0,57	38,9	0,89
Sannsynlighet for kø med mer enn 10 bilister som venter =	0,02 %	47,7 %	0,21 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	0,54 %	91,78 %	0,54 %
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,14	1,8	2,14
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	2,38	18,5	2,52
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	5,57	43,2	5,88
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	5,0	4,3	5,0

Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy som er i systemet for to- og fire-server systemene for flaskehalsen Mosseporten er gjengitt i figur 28, under. Vi ser ut fra figuren at sannsynligheten for mer enn 10 kjøretøy i systemet har blitt redusert til tilnærmet null.



Figur 28: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet ved simulering av to- og fire-server systemene for flaskehalsen Mosseporten

5.3.1 Oppsummering av analysen av en utvidelse av hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 Nord

I dette kapittelet har vi analysert effekten av å utvide hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 Nord fra to- og tre kjørefelt til fire kjørefelt. Av analysene over kommer det frem at å utvide hovedfartsåren vil redusere trafikkproblemene som oppstår betraktelig. Vi ser av resultatene at gjennomsnittlig ventetid i sekunder er blitt redusert fra 124,9 til 4,4 sekunder for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen. Tilsvarende effekter er tilstede i de resterende flaskehalsene. Vi ser at for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 118,4 til 4,4 sekunder. For flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet øst↔vest er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 83,4 til 7,1 sekunder. For flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 73 til 3,5 sekunder. For flaskehalsen Mosseporten er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 38,9 til 0,9 sekunder. Det blir riktignok en lavere utnyttelse av serverne, men trafikksystemet vil ha bedre forutsetninger for å tåle en økning i antall kjøretøy som kommer til systemet.

5.4 Analyse av en flytting av hovedfartsåren til tunnel under Moss og utvidelse av Mosseporten fra to til fire kjørefelt

I konseptvalgsutredningen for hovedvegssystemet i Moss og Rygge anbefales tiltak 5, som går ut på å legge deler av hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 i tunnel under Moss og utvide Mosseporten fra to til fire kjørefelt (Weum et al. 2012).

Alternativet fremlagt i KVV tar høyde for at bilistene betaler for en andel av utbedringen av vegnettet, illustrert under i figur 29. Samtidig som noen uttrykker motstand mot bompenger, er lokalpolitikere opptatt av at køproblemene må løses raskt (Vinje 2015). De fleste bomstasjoner i Norge er av automatisk type, hvor man ikke skal stoppe og betale. Automatiske bomstasjoner medfører altså ikke økt tid i veisystemet for brukerne (*Bompenger* 2015). En ringerunde NRK foretok i 2010 til lokalpartiene i Moss viste at det kun var Pensjonistpartiet i Moss og Fremskrittspartiet som var sterkt imot bruk av bompengefinansiering (Torgersen & Bjørke-Hill 2010). I vår analyse vil vi ikke ta hensyn til hvordan tiltaket skal finansieres, men se på effektene av endringene som er foreslått på trafikkflyten.



Figur 29: Illustrasjon av Statens vegvesen sitt forslag til utbedring av veisystemet (Vinje 2015).

Vi starter med å analysere flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen og reduserer gjennomsnittlig ankomstrate med gjennomsnittlig trafikk registrert til og fra Bastø Fosen fra våre målinger. Videre vil vi analysere de påfølgende flaskehalsene, men siden vi ikke har hatt tilgang på nummerskiltregistrering for å bestemme hvor de skal vil vi bruke det samme antallet kjøretøy i alle flaskehalsene, med unntak av Mosseporten som blir utvidet til en firefelts tunnel for å bedre kunne betjene ankomsten. Inputet til G|G|2|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen uten trafikk

til og fra Bastø Fosen er gjengitt i tabell 61, under.

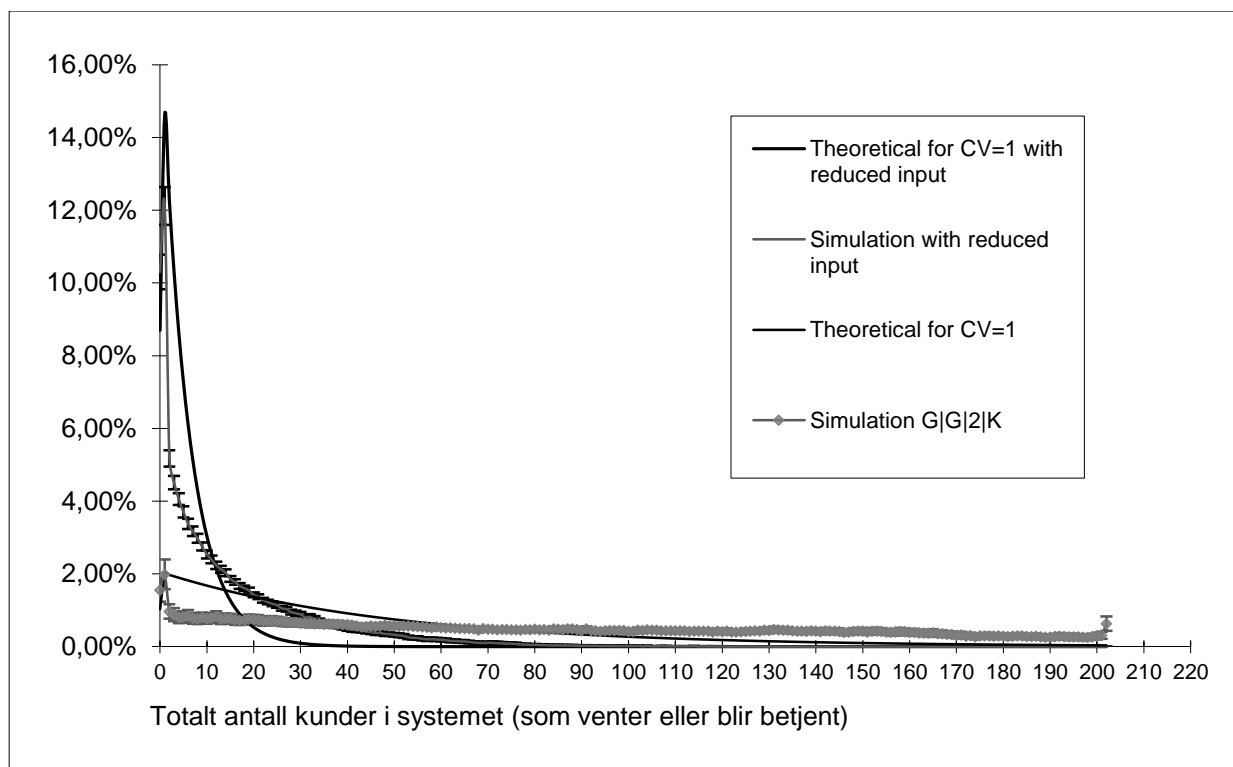
Tabell 61: Input til G|G|2|K-simulering for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	336	335	402 323
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,5	1	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	200	402 334
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Resultatene fra simuleringen er gjengitt i tabell 62, under, og sammenligner med G|G|2|K-simuleringen basert på hvordan systemet er i dag. Vi ser at vi ved å flytte fergetrafikken ut av dagens hovedfartsåre reduserer gjennomsnittlig antall i som venter i kø fra 80,9 til 13,2 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid blir redusert fra 124,9 til 23,7 sekunder. Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne er redusert fra 98% til 84%.

Tabell 62: Resultater fra G|G|2|K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 2 K Simulert	-Ferge Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	336	389	335
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	3,1	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0,63 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0,77 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	4,0	80,9	13,2
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	7,19	124,9	23,70
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0,01 %	61,6 %	4,52 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	0,84	0,98	0,84
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,68	1,95	1,67
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	5,71	82,9	14,91
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	10,19	127,9	26,70
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0	3,0



Figur 30: Sannsynlighetsfordelingen for antall kjøretøy for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen ved simuleringen med og uten trafikken til og fra fergeleiet

Ser vi tilbake til analysen av flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen hvor vi la til én server, altså utvidet rundkjøringen med ett kjørefelt, er dette tiltaket mindre effektivt. Det må likevel nevnes at vi i vår analyse ikke tar hensyn til kjøretøy som måtte komme fra andre steder og vil

bruke systemet for fergetrafikken fremfor å kjøre gjennom de fire flaskehalsene i Moss sentrum. Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemene for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen med og uten trafikken til og fra fergen er gjengitt i figur 30, over. Vi ser ut fra figuren at det er blitt en merkbart høyere sannsynlighet for mindre antall kjøretøy i systemet når vi tar ut trafikken til og fra fergen.

Tabell 63: Input til G|G|2|K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	337,5	337	404 995
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,5	1	
Betjeningsrate, $\mu =$	200	199	405 017
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

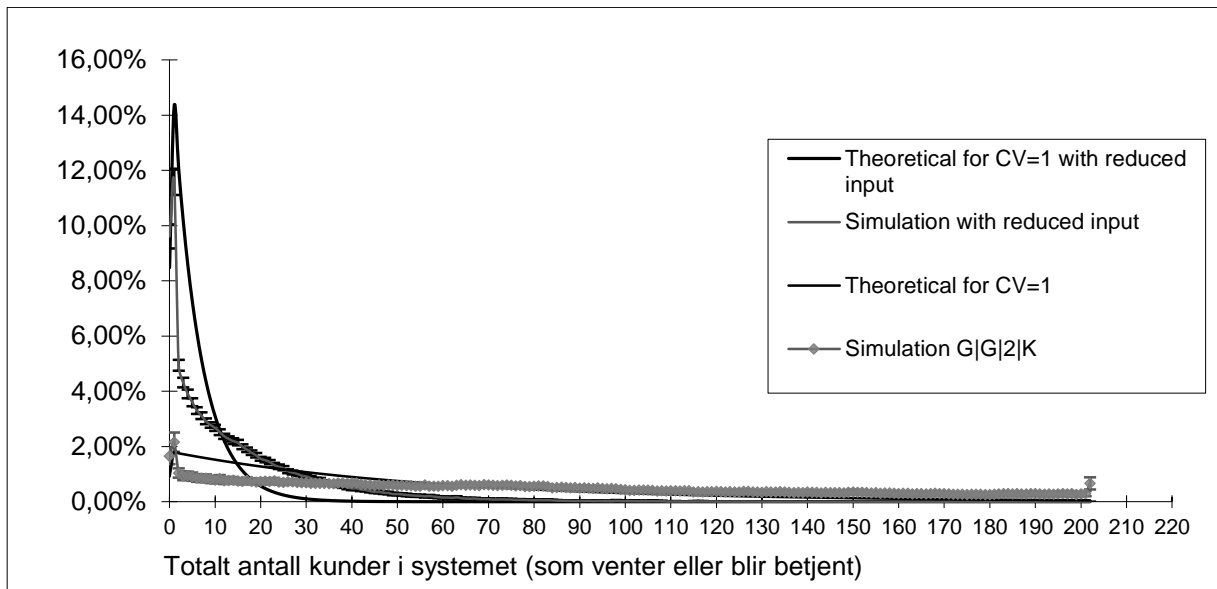
Tabell 63, over, viser inputet til G|G|2|K-simuleringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen uten trafikken til og fra fergeleiet. Vi forventer også i denne analysen at vi vil se en reduksjon i køen, men ikke like stor som ved utvidelse av rundkjøringen med ett kjørefelt som analysert i foregående kapittel.

Tabell 64: Resultater fra G|G|2|K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 2 K Simulert	-Ferge Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	338	388	337
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	3,1	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0,66 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0,79 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	4,2	76,6	13,4
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	7,41	118,4	23,87
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0,01 %	91,5 %	4,34 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	0,84	0,97	0,85
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,69	1,9	1,69
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, $L =$	5,86	78,5	15,11
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	10,41	121,4	26,88
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	3,0	3,0	3,0

Tabell 64, over, viser resultatene fra G|G|2|K-simuleringen av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen når fergetrafikken er flyttet ut av systemet, sammenlignet med dagens situasjon. Vi

ser at ved å flytte fergetrafikken til et eget system har vi redusert gjennomsnittlig antall som venter i kø fra 76,6 til 13,4 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid har blitt redusert fra 118,4 til 23,9 sekunder.



Figur 31: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet ved G|G|2|K-simuleringene med og uten trafikken til og fra fergeleiet

Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i systemet ved G|G|2|K-simuleringen med og uten trafikken til og fra fergeleiet er gjengitt i figur 31, over, og illustrerer hvordan sannsynlighetene har forandret seg ved å flytte fergetrafikken ut av systemet. Vi ser at det har blitt økt sannsynlighet for et lavere antall kjøretøy i systemet, men ikke like mye som ved å legge til ett ekstra kjørefelt i rundkjøringen, analysert i foregående kapittel.

Tabell 65: Input til G|G|3|K-simulering av flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

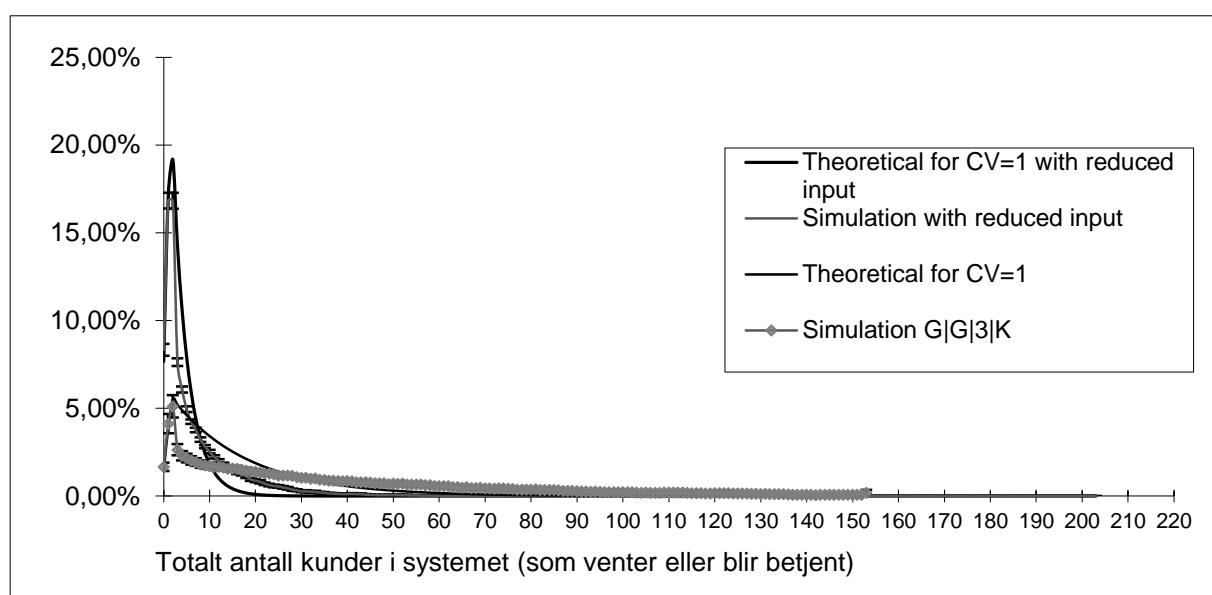
Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	3	3	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	190	190	227 535
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1,2	1	
Betjeningsrate, $\mu =$	85	84	227 535
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2	2	
Simulert tid per repetisjon, simuleringslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Inputet til G|G|3|K-simuleringen av flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet er vist i tabell 65, over.

Tabell 66: Resultater fra G|G|3|K-simulering av flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	G G 3 K Simulert	-Ferge Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	190	239	190
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	0,6	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, P_{full} =	0 %	0,21 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0,23 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, L_q =	1,6	33,3	4,9
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	5,17	83,4	15,52
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	12,86 %	59 %	31,38 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	0,75	0,94	0,75
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	2,24	2,8	2,25
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, L =	3,87	36,1	7,15
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	12,23	90,4	22,63
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	7,1	7,0	7,1

Resultatene fra G|G|3|K-simuleringen av flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst er gitt i tabell 66, over, sammen med resultatene fra G|G|3|K-simuleringen i dagens situasjon. Vi ser at gjennomsnittlig antall som venter i kø er redusert fra 33,3 til 4,9 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid er redusert fra 83,4 til 15,5 sekunder som følge av at fergetrafikken er flyttet ut av systemet. Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne har blitt redusert fra 94% til 75%. Ser vi tilbake til det foregående kapittelet, som tok for seg utvidelse fra tre til fire kjørefelt, er ikke effektene like sterke som ved å utvide med ett kjørefelt.



Figur 32: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet for kjørefeltene fra øst til vest og vest til øst med og uten fergetrafikken

Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet kjørefeltene øst↔vest med og uten trafikken til og fra fergeleiet er gjengitt i figur 32, over. Vi ser av figuren at effekten av å fjerne trafikken, som forventet, er en økt sannsynlighet for at lavere antall kjøretøy i systemet.

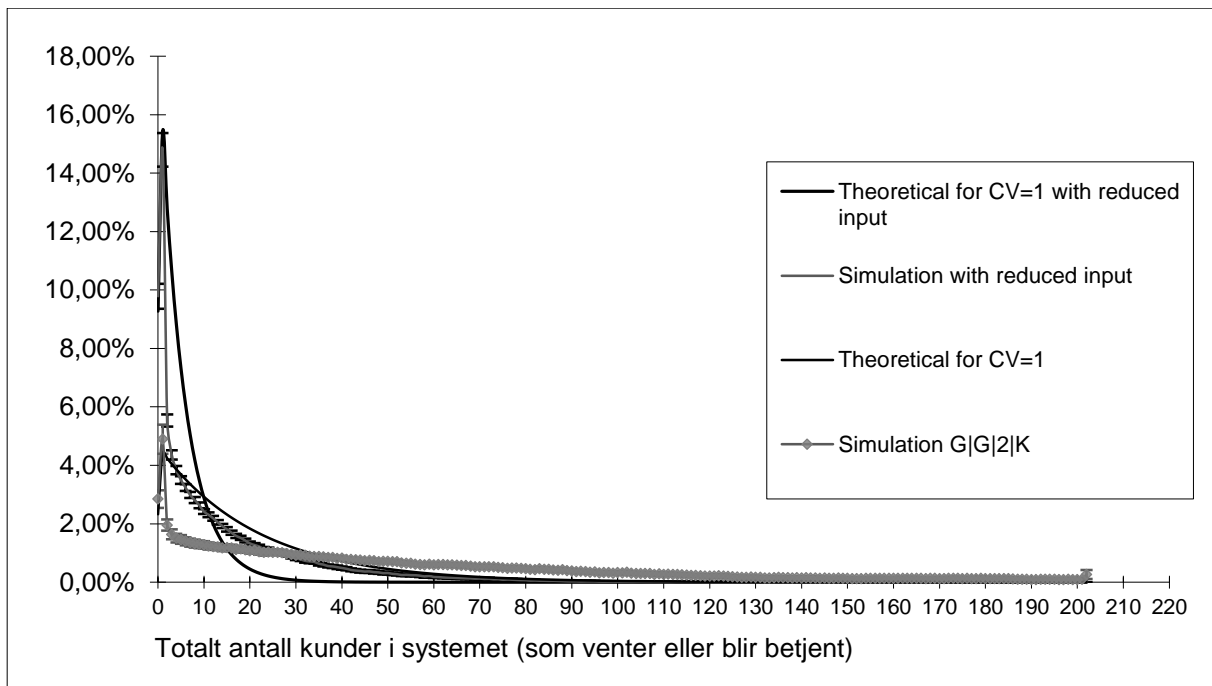
Tabell 67: Input til G|G|2|K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Uavhengige variabler	Teoretisk	Simulert	
Antall servere, $s =$	2	2	
Kø kapasitet, $K =$	200	200	n
Ankomstrate, $\lambda =$	365,3	365	438 064
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1	1	
Betjeningsrate, $\mu =$	220	220	437 977
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	2,5	3	
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12		
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101		
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1		

Inputet til G|G|2|K-simuleringen av flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet er gitt i tabell 67, over. Simuleringen gav resultatene gitt i tabell 68, under, og sammenligner simuleringene med og uten fergetrafikken for at vi bedre skal kunne se effektene av å flytte fergetrafikken ut av systemet.

Tabell 68: Resultater fra G|G|2|K-simulering av flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet når fergetrafikken er flyttet ut av systemet

Avhengige variabler	Teoretisk hvis CV=1	Simulert G G 2 K	-Ferge Simulert
Ankomster: gjennomsnittlig ankomst til systemet uten balking =	365	419	365
Gjennomsnittlig antall som forsvinner uten betjening (balking) =	0	1	0
Kjøretøy som drar: Sannsynlighet fordi systemet er fullt, $P_{full} =$	0 %	0 %	0 %
Andel som drar =	0 %	0 %	0 %
Køen: Gjennomsnittlig antall som venter i kø, $L_q =$	3,7	51	13,5
Gjennomsnittlig ventetid (W_q) i sekunder =	6,05	73,0	22,11
Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter =	0,24 %	55,5 %	14,32 %
Betjening: Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne =	0,83	0,95	0,83
Gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter på å bli betjent =	1,66	1,89	1,66
Kjøretøy i systemet (Antall ventende + antall i betjening):			
Gjennomsnittlig antall i systemet, (L) =	5,34	52,9	15,11
Gjennomsnittlig tid i systemet i sekunder =	8,78	75,7	24,83
Gjennomsnittlig betjeningstid i sekunder =	2,7	2,7	2,7



Figur 33: Sannsynlighetsfordelingene for antall kjøretøy i flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet ved G|G|2|K-simuleringene med og uten trafikken til og fra fergeleiet

Ut fra resultatene kan vi se at vi ved å flytte fergetrafikken ut av systemet reduserer gjennomsnittlig antall kjøretøy som venter i kø fra 51 til 13,5 kjøretøy og gjennomsnittlig ventetid fra 73 til 22 sekunder. Gjennomsnittlig utnyttelse av serverne er redusert fra 95% til 83%, som tillater en større økning i ankomsten uten at køen blir uendelig lang. Sannsynlighetsfordelingene for simuleringene med og uten fergetrafikken for flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet er gitt i figur 33, over. Sannsynlighetsfordelingene tilsier at det er en økt sannsynlighet for et lavere antall kjøretøy i systemet ved at vi flytter fergetrafikken ut fra systemet, men ikke like mye som ved utvidelse med ett ekstra kjørefelt i rundkjøringen, analysert i forrige kapittel.

Ettersom flaskehalsen Mosseportens tiltak anbefalt i KVUen er å utvide tunellen fra to til fire kjørefelt, altså identisk til å utvide hele hovedfartsåren fra to- og tre- til fire kjørefelt, vil vi henvise til forrige kapittel og analysen vi der gjennomfører på effekten av å utvide Mosseporten fra to til fire kjørefelt.

5.4.1 Oppsummering av analysen av en flytting av hovedfartsåren til tunnel under Moss og utvidelse av Mosseporten fra to til fire kjørefelt

I dette kapitlet har vi analysert effekten av å flytte hovedfartsåren mellom fergeleiet og E6 Nord til kulvert og tunnel under Moss og å utvide Mosseporten til fire kjørefelt. Av analysene

over kommer det frem at å flytte hovedfartsåren vil redusere trafikkproblemene som oppstår betraktelig, men ikke i like stor grad som å utvide hovedfartsåren til fire kjørefelt. Vi ser av resultatene at gjennomsnittlig ventetid i sekunder er blitt redusert fra 124,9 til 23,7 sekunder for flaskehalsen rundkjøringen ved Kanalen. Tilsvarende effekter er igjen tilstede i de resterende flaskehalsene. Vi ser at for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 118,4 til 13,4 sekunder. For flaskehalsen lyskrysset ved Flemminghjørnet øst↔vest er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 83,4 til 15,5 sekunder. For flaskehalsen rundkjøringen ved Flemminghjørnet er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 73 til 22,1 sekunder. For flaskehalsen Mosseporten er gjennomsnittlig ventetid redusert fra 38,9 til 0,9 sekunder. Det blir også i dette tiltaket for å redusere trafikkproblemene en lavere utnyttelse av serverne, men ikke like lavt som ved å utvide hovedfartsåren til fire kjørefelt. Likevel er det positivt siden trafikksystemet vil ha bedre forutsetninger for å tåle en økning i antall kjøretøy som kommer til systemet.

6. Sensitivitetsanalyse: Resultatene dersom forutsetningene endres

I dette kapittelet vil vi se på hvordan endringer i forutsetningene påvirker resultatene.

6.1 Endring i koeffisienten for variasjon til interankomsten, CV_A

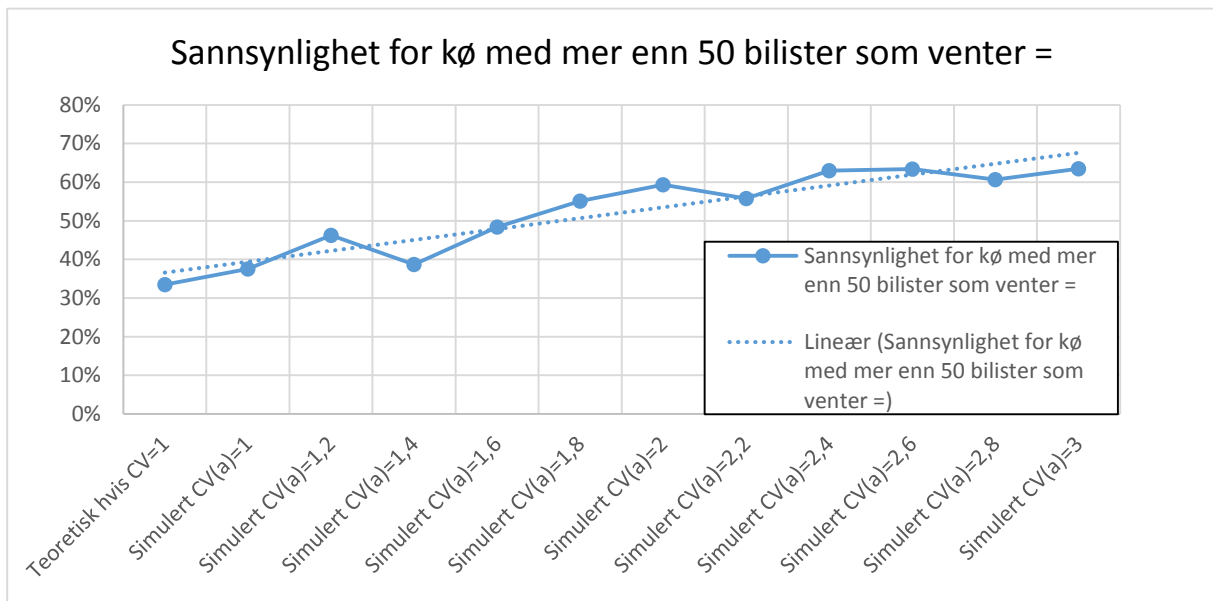
Vi starter med å se på endringer i koeffisienten for variasjon til interankomsten, CV_A . Inputet er gitt i tabell 69, under og vi øker koeffisienten med 0,2 for hver simulering vi foretar. Vi bruker data fra Kanalen for å undersøke effektene av endringer i CV_A .

Tabell 69: Input til sensitivitetsanalyse for variasjonen til interankomsten

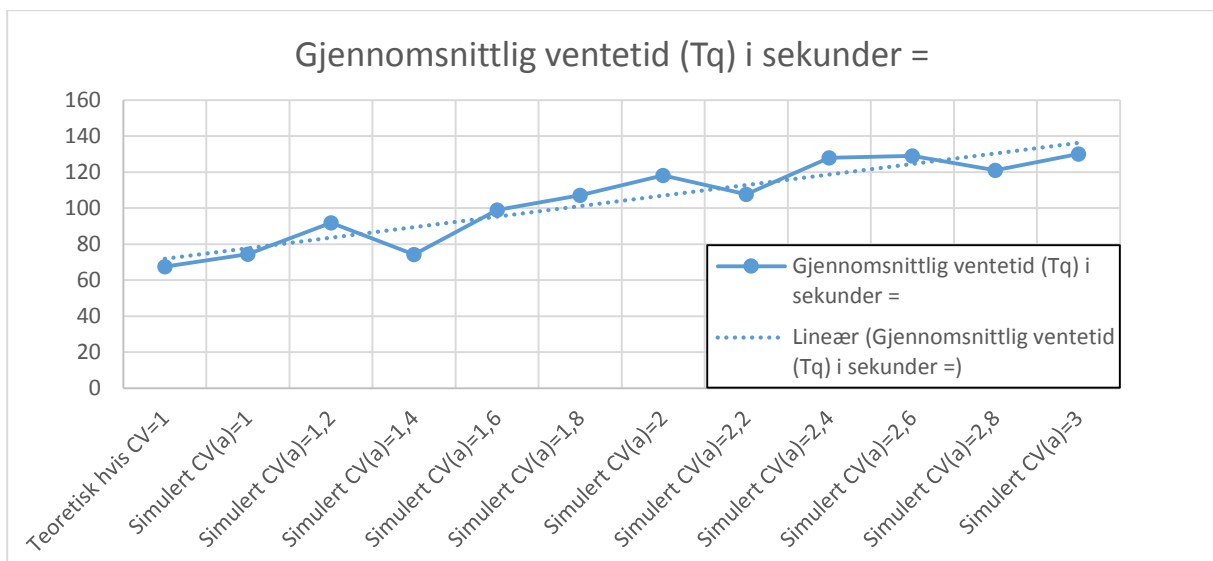
Uavhengige variabler	Input
Antall servere, $s =$	2
Kø kapasitet, $K =$	200
Ankomstrate, $\lambda =$	392
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1
Betjeningsrate, $\mu =$	200
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1
Simulert tid per repetisjon, simuleringenslengde =	12
Repetisjoner (≤ 200), $nReps =$	101
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1

Som kan observeres av figur 34, under, øker sannsynligheten for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter når vi øker koeffisienten for variasjon til interankomst. Følger vi trendlinjen som er lagt til for simuleringene, ser vi at det forventes en økning i sannsynligheten på omtrent ti prosent dersom vi øker koeffisienten med 0,6. Ser vi på figur 35, under, ser vi at

gjennomsnittlig ventetid i sekunder øker med omtrent 18 sekunder dersom vi øker koeffisienten med 0,6 dersom vi følger trendlinjen til simuleringene.



Figur 34: Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter med endring i koeffisienten for variasjonen til interankomsten



Figur 35: Gjennomsnittlig ventetid i sekunder ved endring i koeffisienten for variasjon til interankomsten

Ved å endre koeffisienten til variasjon for interankomsten ser vi utslag på resultatene. For en server, som Kanalen, hvor det er en støtvis tilførsel av trafikk vil det være viktig å ta hensyn til standardavviket til interankomsten, da denne vil øke forklaringsgraden til modellen.

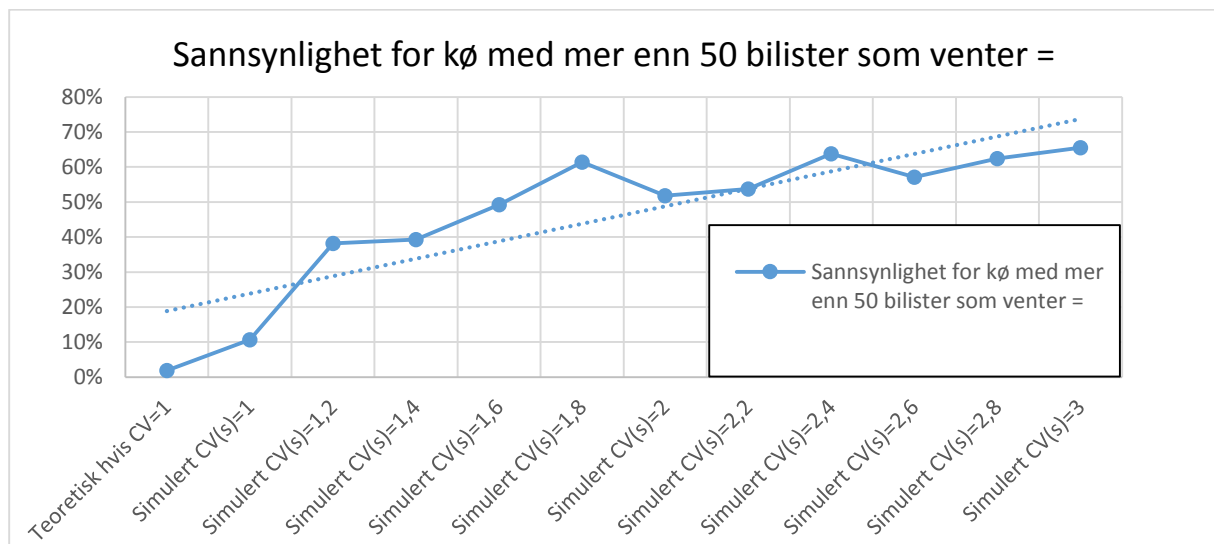
6.2 Endring i koeffisienten for variasjon til betjeningstiden, CV_S

I dette underkapittelet ser vi på endringer i koeffisienten for variasjon til betjeningstiden. Inputet er gitt i tabell 70, under. Vi vil øke koeffisienten med 0,2 for hver simulering vi foretar og bruker data fra Kanalen for å undersøke effekten av endringene.

Tabell 70: Input til sensitivitetsanalyse på koeffisienten for variasjon til betjeningstiden

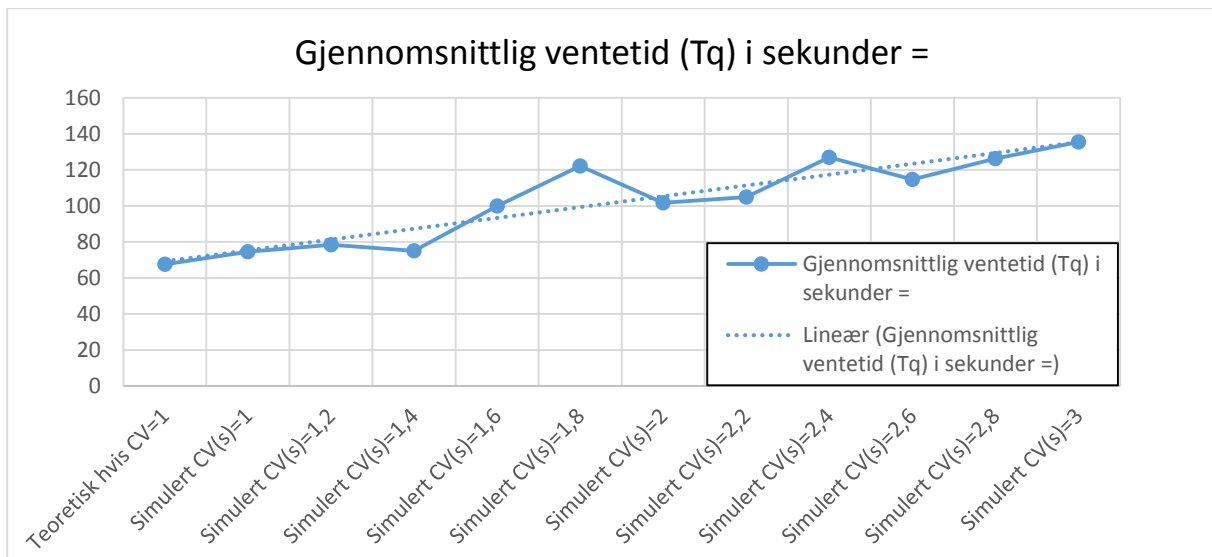
Uavhengige variabler	Input
Antall servere, $s =$	2
Kø kapasitet, $K =$	200
Ankomstrate, $\lambda =$	392
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1
Betjeningsrate, $\mu =$	200
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12
Repetisjoner (≤ 200), nReps =	101
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1

Figur 36, under, viser sannsynligheten for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter. Vi ser ut ifra trendlinjen, som er lagt til, at ved å øke koeffisienten med 0,4 forventes det en økning i sannsynligheten for kø med mer enn 50 bilister som venter på omtrent ti prosent. Utslaget fra endringer i CV_S er altså kraftigere enn utslaget fra endringer i CV_A , se over.



Figur 36: Sannsynlighet for kø med mer enn 50 kjøretøy som venter med endring i koeffisienten for variasjonen til betjeningstiden

Ser vi på figur 37, under, ser vi ut fra trendlinjen at økning av koeffisienten på 0,6 gir en økning i gjennomsnittlig ventetid på omtrent 20 sekunder. Igjen er det altså et større utslag ved å endre koeffisienten for variasjon til betjeningstid enn koeffisienten for variasjon til interankomsten.



Figur 37: Gjennomsnittlig ventetid i sekunder ved endring i koeffisienten for variasjon til betjeningstiden

Grunnen til at vi ser på endringer i koeffisienten for variasjon til betjeningstiden er fordi vi da kan ta høyde for eksempel for større personlige feil, som vikepliktsbrudd, eller retningsskift for gjennomkjøring i et lyskryss. Ved å tillate disse får man et mer realistisk bilde av hvordan trafikkflyten faktisk er.

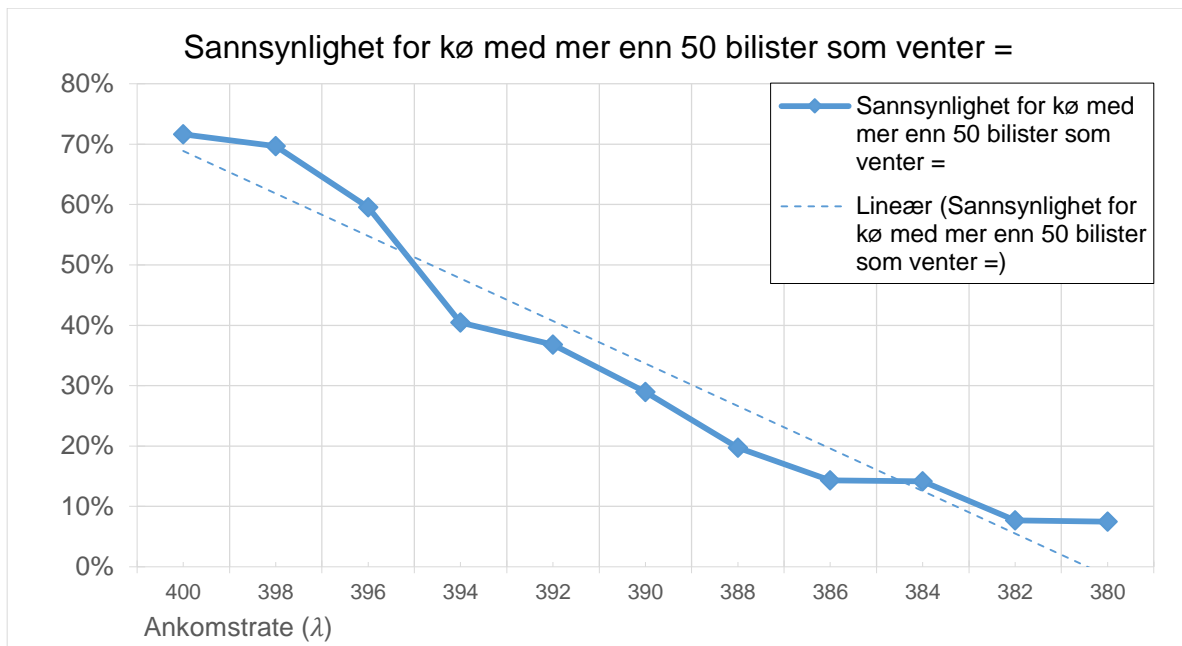
6.3 Endring i ankomsten

Vi ønsker her å se på hvordan en reduisering i ankomst vil påvirke trafikkflyten. Ankomsten har blitt redusert med 2 kjøretøy av gangen i intervallet 400 til 380.

Tabell 71: Input til sensitivitetsanalyse for variasjonen i ankomstraten for Kanalen

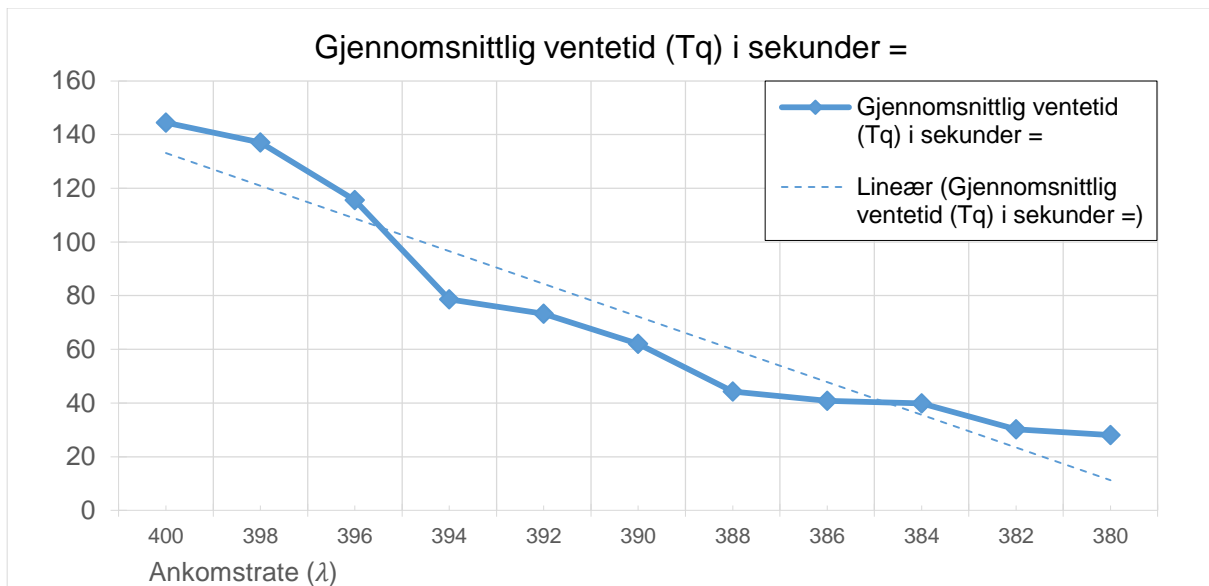
Uavhengige variabler	Input
Antall servere, $s =$	2
Kø kapasitet, $K =$	200
Ankomstrate, $\lambda =$	392
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1
Betjeningsrate, $\mu =$	200
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1
Simulert tid per repetisjon, simuleringlengde =	12
Repetisjoner (≤ 200), nNreps =	101
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1

Basert på dette inputet vist i tabell 71, over, har det blitt generert to figurer, en for sannsynligheten for mer enn 50 kjøretøy i kø og en for gjennomsnittlig ventetid i sekunder.



Figur 38: Sannsynlighet for kø med mer enn 50 bilister som venter med en endring i ankomstraten for Kanalen

Av figur 38 over, kommer det frem en kraftig reduksjon etter bare 6 færre ankomster, hvor den største nedgangen skjer mellom 396 og 394. Med en ankomst på 394 vil man kunne forvente at sannsynligheten for mer enn 50 kjøretøy i kø er redusert med nærmere 30% - fra 71,6% til 40,4% - sammenlignet med en ankomst på 400. Følger man trendlinjen videre nedover, kan man forvente å nærme seg en sannsynlighet på 0% allerede ved 380 ankomster.



Figur 39: Gjennomsnittlig ventetid i sekunder ved endring i ankomstraten for Kanalen

Av figur 39, over, kan man se en drastisk nedgang i ventetid på rundt 40 sekunder mellom 396 og 394 ankomster. Videre kan man forvente en stabil nedgang etter hvert som ankomsten

reduseres – allerede ved en ankomst på 380 har ventetiden gått ned med rundt 30 sekunder. Hvis man klarer å redusere ankomsten ned til 370, vil man ifølge trendlinjen kunne forvente å gå mot en totalredusering av ventetiden, mens tallene fra simuleringen er mer konservative.

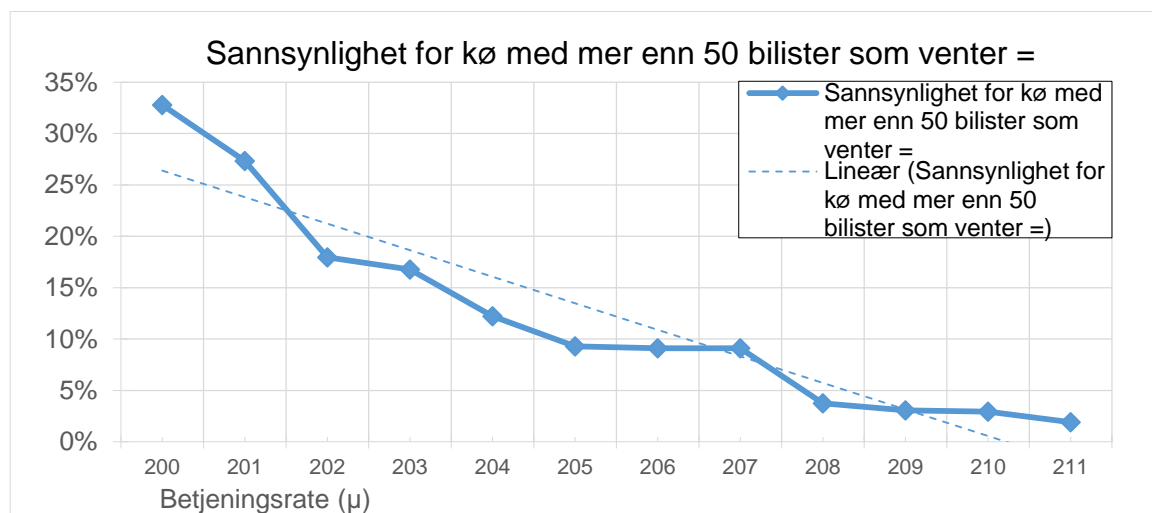
6.4 Endring i betjeningen

For å kunne se effektene av en potensielt forbedring av serverne, har vi sett på effektene av å stegvis forbedre betjeningsevnen fra 200 til 220, hvor μ har blitt økt med 1 per steg. På grunn av at Kanalen har 2 servere, vil en økning på 1 bety en høyere reell økning, hvor man kan forvente at den faktiske verdien ligger på (økningen * antall servere). Inputet vi har benyttet kan ses av tabell 72 under.

Tabell 72: Inputet ved endring av betjeningsraten for flaskehalsen Kanalen

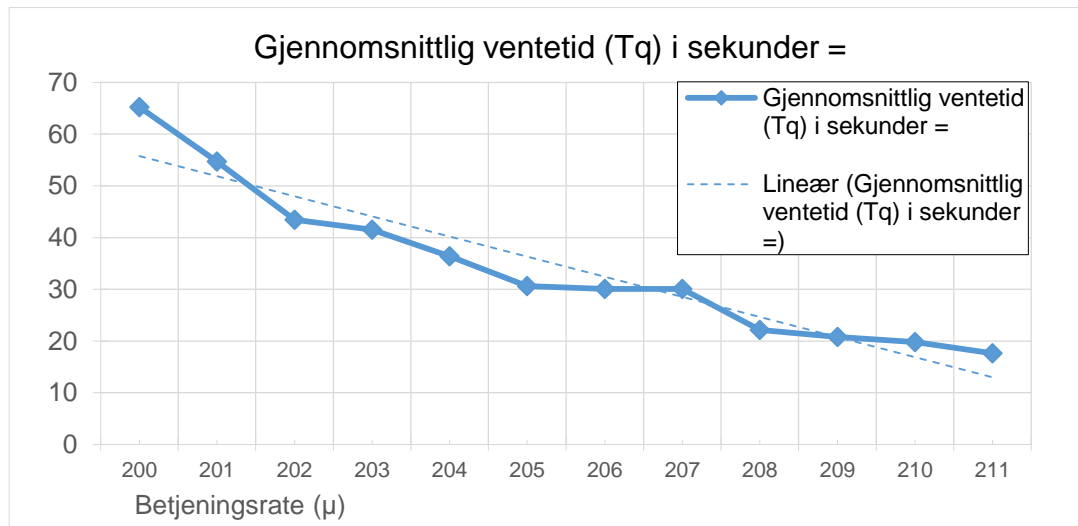
Uavhengige variabler	Input
Antall servere, $s =$	2
Kø kapasitet, $K =$	200
Ankomstrate, $\lambda =$	392
Koeffisient for variasjon til interankomsten, $CV_A =$	1
Betjeningsrate, $\mu =$	200
Koeffisient for variasjon til betjeningstiden, $CV_S =$	1
Simulert tid per repetisjon, simuleringsslengde =	12
Repetisjoner (≤ 200), nReps	101
Repetisjoner å ignorere, Oppvarming =	1

Under kan man av figur 40 og 41 se effektene man kan forvente ved en endring i betjeningsraten.



Figur 40: Sannsynlighet for mer enn 50 kjøretøy som venter ved flaskehalsen Kanalen ved endring av betjeningsraten

Det kan virke som at selv en liten økning i betjeningsraten vil ha en merkbar effekt på sannsynligheten for mer enn 50 i kø. Av grafen over kan man se en reduksjon på rundt 15% ved å få my opp til 202 fra 200. Ifølge trendlinjen vil sannsynligheten nærme seg null allerede ved en my på 210, mens tallene fra simuleringen mener det fremdeles er omtrent noe å gå på.



Figur 41: Gjennomsnittlig ventetid for flaskehalsen Kanalen ved endring av betjeningsraten

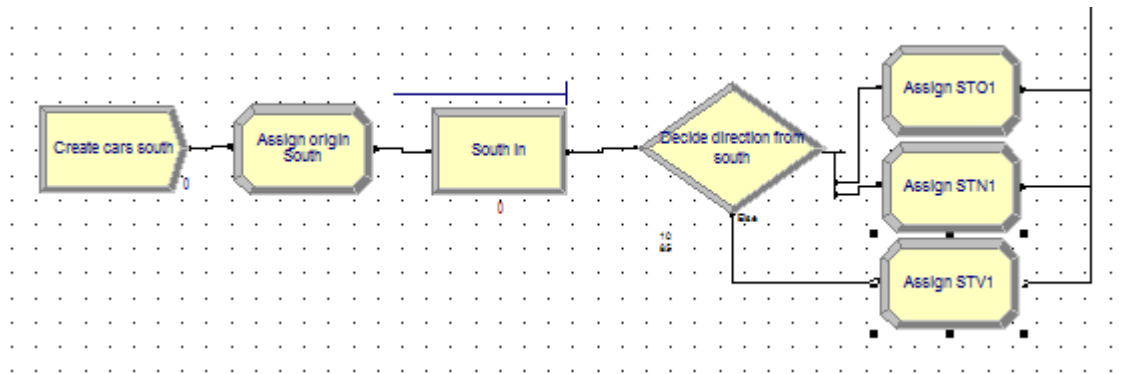
For gjennomsnittlig ventetid ved redusering av betjeningsraten ser man de samme tendensene som ovenstående figurer. En økning i my på 2 vil redusere ventetiden med rundt 20 sekunder og man vil kunne forvente en stabil nedgang i ventetid jo høyere betjeningsraten er.

7. Simulering med Arena

Arena er et simuleringsprogram bygget på en spillmotor av Rockwell Software. Ved å bruke dette programmet kan man få et annet perspektiv på hvordan et trafikksystem fungerer, ved at man kan designe et trafikksystem og observere hvordan kjøretøy vil oppføre seg og behandles gjennom systemet. Det skal påpekes at vi ikke har hatt noen form for opplæring i dette programmet og alt vi kan er selvlært gjennom prøv- og feil-metoder.

Da vi startet med programmet tok vi utgangspunkt i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen. Vi valgte denne flaskehalsen fordi den er en rundkjøring, som flaskehalsene rundkjøringene ved Kanalen og ved Flemminghjørnet, og vi er av den oppfatning at reglene for vikeplikt som gjelder i en rundkjøring vil være enklere å modellere enn et lyskryss sin kompleksitet vedrørende signalskift. Samtidig er det ikke fotgjengeroverganger for retningene øst og vest,

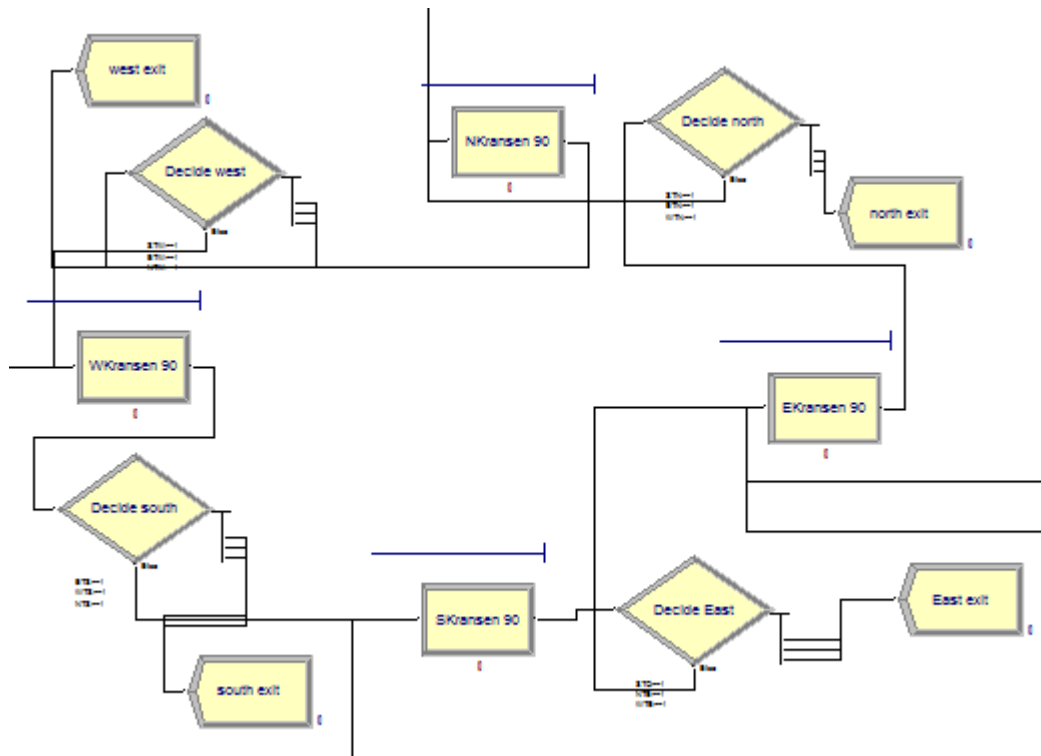
og for de resterende to retningene er fotgjengerovergangene lagt litt bort fra rundkjøringen. Dette vil si at vi ikke trenger å modellere fotgjengere som krysser veien og forstyrrer trafikkflyten. Vi starter med å modellere en enkelt innkjøring, som illustrert i figur 42, under.



Figur 42: Arena-oppsett av innkjøring sør for flaskehalsen rundkjøringen ved Kranzen

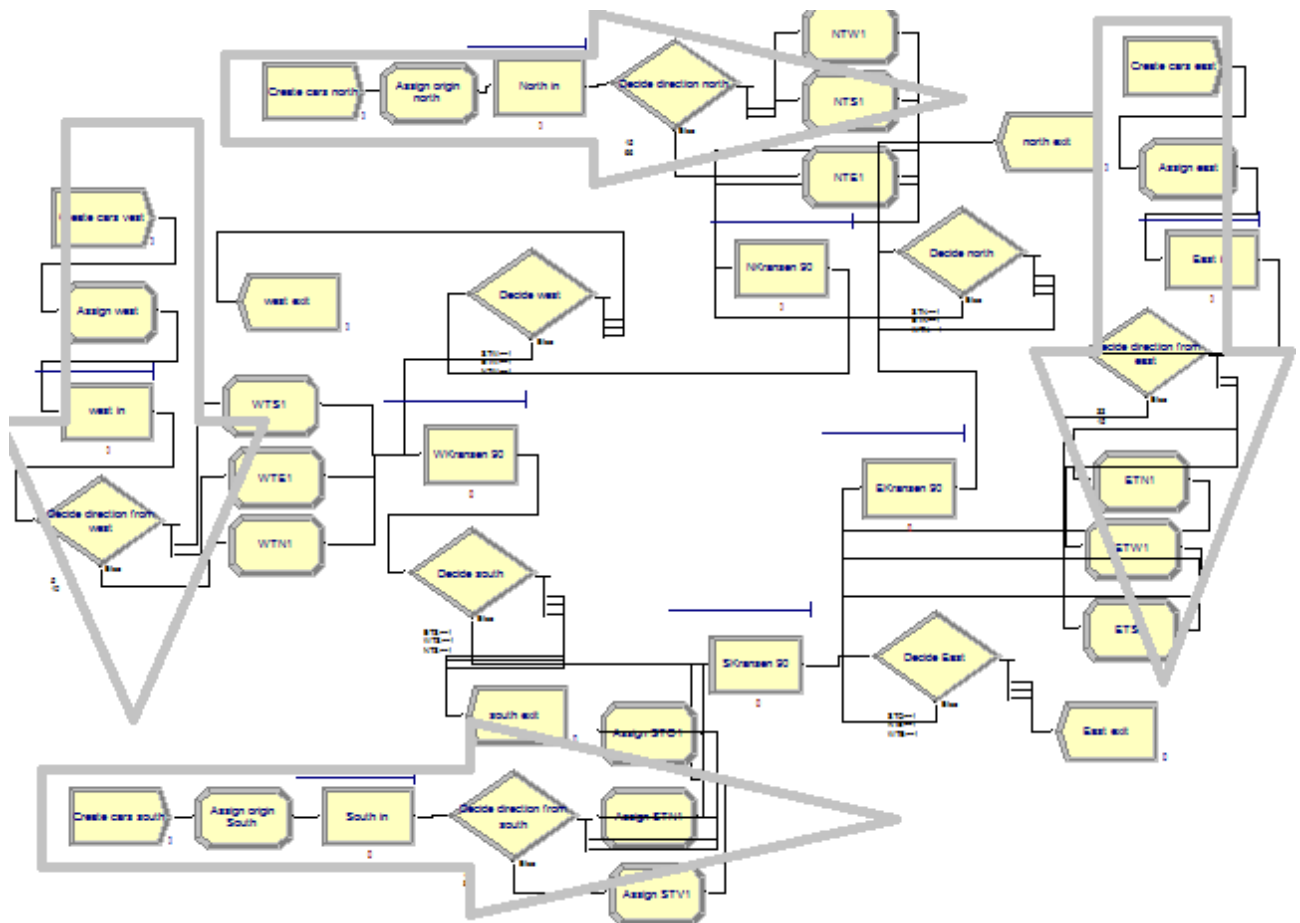
I figur 42, over, er det fire forskjellige typer prosesser, nemlig produksjon, verditlegning, prosessering og valg. Produksjonsprosessen, i figuren over «Create cars south», er ansvarlig for å sende kjøretøy inn i systemet, denne kan konfigureres til å produsere bestemte antall kjøretøy per ankomst per tidsenhet. Verditlegningsprosessen, i figuren over «Assign origin South» tilegner kjøretøyene fra produksjonsprosessen en verdi som forteller oss at disse kjøretøyene kommer fra innkjøring sør. Dette er viktig ettersom vi ved en fulldesignet rundkjøring vil ha fire ulike produksjonsprosesser. Prosesseringsprosessen, representert med «South In» i figuren over, sender kjøretøyene inn i veisystemet, spesifikt for denne rundkjøringen til innkjøring sør. For prosesseringen er det lagt til en kø, hvor kjøretøyene vil samles gitt at systemet ikke klarer å ta unna ankomsten raskt nok. Valgprosessen, representert i figuren over ved «Decide direction from south» er den siste typen av prosesser vi bruker i innkjøringene og fungerer på en av to måter. Enten kan man velge å tilegne kjøretøyene en verdi i forkant som sier hvilket alternativ de skal velge, eller så kan man sette inn sannsynligheter for hvilket alternativ kjøretøyene som kommer inn i prosessen vil velge. Vi har valgt å sette inn sannsynligheter for hvilke alternativer som vil velges. Når valgene er foretatt sendes hvert alternativ til hver sin nye tilegningsprosess for å tilegne en verdi til hvilken avkjøring de skal ta i rundkjøringen. Vi har valgt å ikke inkludere 360 graders svinger i rundkjøringen siden det er en svært lav sannsynlighet for at dette skjer.

Etter å ha designet og konfigurert de resterende tre innkjøringene starter vi med selve rundkjøringen. Selve rundkjøringen designet som illustrert i figur 43, under.



Figur 43: Arena-oppsett av selve rundkjøringen for flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

I oppsettet av selve rundkjøringen bruker vi tre ulike prosesser, nemlig prosessering, valg og avhending. Prosesseringsprosessen fungerer på tilsvarende måte som i innkjøringene, men med kortere køer, samt representerer hver prosesseringsprosess 90 grader av rundkjøringen. Valgprosessen fungerer ved at kjøretøyene med verdier for utkjøring til tilhørende avhendingsprosesser tar valg om å kjøre ut. Dette vil si at de som ikke har verdier for utkjøring i for eksempel «Decide East» kjører videre, mens de som har verdier for utkjøring i «Decide East» velger et av tre alternativ for å kjøre ut. Grunnen til at vi må ha tre alternativer er fordi de som vil kjøre ut i «Decide East» kommer fra tre ulike innkjøringer. Den siste prosessen vi bruker er avhendingsprosessen, representert i figur 43 med «East exit», som tar kjøretøyene ut av systemet. Avhendingsprosessen gir oss totalt antall kjøretøy som kjører ut i den retningen den avhender for. Når rundkjøringen nå er ferdig designet får vi oppsettet illustrert i figur 44, under. Vi har valgt å legge til piler for å poengtere innkjøringene, men disse er ikke representative for retningene.



Figur 44: Arena-oppsett av flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Vi utfører simuleringen i 600 sekunder og 100 repetisjoner. På grunn av utgavens begrensning med maks 150 enheter i systemet til enhver tid har vi vært nødt til å programmere alle verdier i forhold til sekunder. Dette betyr for eksempel at vi kan programmere inn hvor lang tid det skal ta å kjøre gjennom delen av rundkjøringen mellom sør og øst og bestemme at denne skal ta to sekunder, samtidig som vi tillater at det oppstår en kø her slik at det kan ta lengre tid. I innkjøringene kommer det kjøretøy med mellom fire og ti sekunders mellomrom avhengig av hvilken retning de kommer fra. En ulempe med produksjonsprosessen er at vi ikke har kunnet legge inn et standardavvik selv, men setter en tilfeldighetsdistribusjon med gjennomsnittlig tid som mellom hver ankomst ut fra observasjonene våre.

Simuleringsresultatene for kjøretøyene er gitt i figur 45, under, og viser at normal gjennomkjøringstid når det ikke er kø er 6,1 sekunder. Gjennomsnittlig ventetid fra simuleringen blir 18,2 sekunder som gir en gjennomsnittlig total gjennomkjøringstid på 24,3 sekunder. Samtidig får vi delresultater som viser maksimalt og minimalt gjennomsnitt for disse tidene og de ekstreme ytterpunktene.

kransen roundabout

Replications: 120 Time Units: Seconds

Entity

Time

VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	6.0958	< 0,01	5.9212	6.2745	0.9983	13.3175
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	18.1730	< 1,05	6.5622	44.2615	0.00	187.68
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	24.2689	< 1,05	12.6144	50.5150	2.0244	192.13

Other

Number In	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Car	395.81	3,30	346.00	440.00		
Number Out	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Car	373.25	2,74	330.00	409.00		
WIP	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Car	16.3824	< 0,83	7.2614	38.4961	0.00	61.0000

Figur 45: Simuleringsresultater fra Arena for kjøretøy i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Figur 46, under, viser resultatene for de ulike køene i systemet ved simulering i Arena. Køene SKransen 90, EKransen 90, NKransen 90 og WKransen 90 representerer hver av de fire delene av rundkjøringen fra innkjøringene, representert ved for eksempel «S» for sør, til første mulige utkjørsel. Hver innkjøring er representert ved South in, East in, west in og North in. For samtlige køer får vi opplyst gjennomsnittlig ventetid, med maksimalt og minimalt gjennomsnitt, samt de ekstreme ytterpunktene. Vi får opplyst tilsvarende verdier også for antall i alle køene.

kransen roundabout

Replications: 120 Time Units: Seconds

Queue**Time**

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
East in.Queue	34.1858	< 2,93	8.4391	93.2494	0.00	178.03
EKransen 90.Queue	0.9619	< 0,05	0.4855	2.0899	0.00	12.4572
NKransen 90.Queue	1.1193	< 0,07	0.5452	2.5477	0.00	12.9040
North in.Queue	3.0681	< 0,30	0.9177	11.4263	0.00	41.1166
SKransen 90.Queue	1.0499	< 0,05	0.5610	2.2025	0.00	12.2148
South in.Queue	6.6738	< 0,68	1.7898	32.7341	0.00	57.0583
west in.Queue	15.4658	< 1,82	4.2424	60.8457	0.00	100.76
WKransen 90.Queue	1.0062	< 0,05	0.5920	2.1934	0.00	12.7809

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
East in.Queue	7.5813	< 0,74	1.4690	24.5585	0.00	41.0000
EKransen 90.Queue	0.1899	< 0,01	0.0971	0.4149	0.00	4.0000
NKransen 90.Queue	0.1230	< 0,01	0.04997581	0.2972	0.00	3.0000
North in.Queue	0.3543	< 0,04	0.07647554	1.2950	0.00	9.0000
Queue 1	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Queue 2	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
SKransen 90.Queue	0.1578	< 0,01	0.08041646	0.3634	0.00	3.0000
South in.Queue	1.0560	< 0,13	0.2338	6.4677	0.00	11.0000
west in.Queue	2.9233	< 0,38	0.6178	12.7475	0.00	21.0000
WKransen 90.Queue	0.1795	< 0,01	0.0924	0.4104	0.00	3.0000

Figur 46: Simuleringsresultater fra Arena for køer i flaskehalsen rundkjøringen ved Kransen

Av figur 46, over, ser vi at det i løpet av en timinutters periode er forventet gjennomsnittlig 7,5 kjøretøy i kø fra innkjøring øst, 0,4 kjøretøy i kø fra innkjøring nord, 1,1 kjøretøy i kø fra innkjøring sør og 2,9 kjøretøy i kø fra innkjøring vest. Dette vil si at gjennomsnittlig total forventet kø for å kjøre inn i rundkjøringen er forventet å være 11,9 kjøretøy. Sammenlignet med simuleringen gjort i Microsoft Excel tillater simuleringsoppsettet i Arena at det er flere kjøretøy i rundkjøringen samtidig. Dette vil være en del av forklaringen på at vi får kortere køer ved å simulere i Arena sammenlignet med Excel.

For de ulike innkjøringene har vi samt ulike gjennomsnittlige ventetider. Dette er et resultat av at hver innkjøring har en ulik ankomstrate. Å behandle hver innkjøring separat vil være med på å øke forklaringsgraden til modellen og gi mer presise resultater. Ved simulering i Excel behandles systemet som én enkelt kø, i stedet for å se på fire separate køer som må samhandle i en rundkjøring.

Vi er av den oppfatning at å simulere hovedvegsystemet i Arena kan bidra til å bedre analysere trafikkstrømmene gjennom flaskehalsene i Moss, men at det kreves en bedre kjennskap til hvordan modellen skal settes opp og konfigureres enn det vi innehar for å få en riktig analyse. Bidraget som en simulering i Arena kan gi til en analyse av ulike flaskehalsen i vegsystem er etter vår oppfatning viktig for videre forskning, og vi vil inkludere kapittelet for å påpeke dette.

8. Konklusjoner, anbefalinger og fremtidig forskning

Daglig opplever Moss kødannelser på grunn av et veinett som er for lite i forhold til ankomsten, et problem som blir forsterket av en støtvis fergetrafikk. Målet med denne oppgaven har derfor vært å analysere trafikkflyten ved å bruke en køteoretisk tilnærming, samt å analysere eventuelle tiltak for å forbedre trafikkflyten. Basert på de analyser og drøftinger som er gjort i denne oppgaven, er det mulig å trekke noen slutninger i forhold til våre hypoteser.

- Hypotese 1: En begrenset reduksjon av ankomst til køsystemet vil redusere problemet signifikant.

En forbedring av trafikkflyten vil ifølge Geroliminis og Skabardonis (2011) føre til en bedre systemutnyttelse og fremkommelighet. Gjennom våre analyser av flaskehalsene på hovedvegsystemet fra fergeleiet til E6 er det åpenbart at tiltak må iverksettes. Det har derfor blitt sett på alternativer for å redusere kødannelser på bakgrunn av den støtvide ankomsten fra fergetrafikken. Ved å flytte fergetrafikken ut av hovedveistrekket kan vi forvente at antall kjøretøy i kø og gjennomsnittlig ventetid reduseres, samt at serverens utnyttelsesgrad blir redusert. I analysene i kapittel 5 bekreftes hypotese 1, og å flytte ut trafikken til og fra fergeleiet kan være et alternativ til å bedre trafikkflyten.

- Hypotese 2: En mindre variasjon i tiden det tar å passere flaskehalsene vil redusere problemet signifikant.

Vi har gjennomført flere sensitivetsanalyser for å se på effektene ved å inkorporere en variasjon i ankomst og betjening, analysert ved å endre på variasjonskoeffisienten for ankomst (CV_A) og betjening (CV_S). Resultatene av analysen vise samme tendenser for begge, ved en høyere koeffisient vil sannsynlighet for mer enn 50 i kø og en gjennomsnittlig ventetid øke. Det ble også sett på en endring i ankomst- og betjeningsraten. Av disse analysene kom det

frem at selv en liten reduksjon i ankomstraten reduserte både ventetid og sannsynligheten for mer enn 50 i kø. En tilsvarende økning i betjeningsraten viste de samme resultatene. Gjennom en enkel deterministisk modell (M|D|1), hvor all variasjon har blitt tatt bort, ser vi samme tendenser – reduksjon i både antall i kjøretøy i kø og gjennomsnittlig ventetid. Det samme resultatet kan ses i en enkel M|G|1-modell. Ved å halvere standardavviket går ventetid og kø drastisk ned, og omvendt ved et standardavvik som er 1,5 så stort. På bakgrunn av sensitivitetsanalysene og de enkle modellene kan vi med stor sikkerhet si at en mindre variasjon vil ha en positiv effekt på køproblematikken, og hypotese 2 kan bekreftes.

- Hypotese 3: En økning i kapasiteten i trafikksystemet vil redusere problemet signifikant.

Både Dalene et al. (1993) og Vickrey (1969) mente at en kapasitetsøkning var et potent virkemiddel for å bedre trafikkflyten, gitt de riktige omstendighetene. Vi har sett på det å utvide hovedveisystemet fra fergeleiet til E6 fra to- og tre- til fire kjørefelt, med 3 kjørefelt i rundkjøringene ved Kanalen, Kransen og Flemminghjørnet. Av analysene kom det frem at utvidelsen til fire kjørefelt vil motvirke daglige kødannelser som følge av den støtvide ankomsten som fergetrafikken forårsaker. Analysene av tiltaket anbefalt av Statens vegvesen i konseptvalgutredningen for hovedvegsystemet i Moss og Rygge tilsier at tiltaket vil dempe daglige kødannelser som følge av den støtvide ankomsten som fergetrafikken forårsaker, men at det fremdeles kan dannes kortere køer i perioder med høyere ankomst enn vanlig. På bakgrunn av dette kan vi si at hypotese 3 er bekreftet.

Alle våre hypoteser ble bekreftet, så en reduksjon i ankomst og gjennomkjøringstid, samt en økning i kapasiteten vil alle føre til en bedre trafikkflyt. For øvrig kom det frem gjennom analysene at et tiltak var mer effektivt enn det andre. En økning av kapasiteten virker å ha desidert størst effekt av de tiltakene vi har sett på, både når det gjelder gjennomsnittlig ventetid og antall kjøretøy i kø. Det å flytte fergetrafikken ut av hovedfartsåren virker mindre effektivt, men har fremdeles en stor positiv effekt på trafikkbildet. Det er for øvrig viktig å påpeke at vi ikke har sett på kostnadene av de forskjellige tiltakene, da det er av en mer samfunnsøkonomisk retning. Av de forskjellige tiltakene vi har sett på, kan begge tiltakene anbefales, men en ekspansjon av hovedveisystemet virker å ha størst effekt.

Av fremtidig forskning kan det være interessant å se på sammenhengen mellom bruk av blinklys og trafikkflyt. I flere tilfeller ble det observert at flyten i vesentlig grad ble hindret av kjøretøy som ikke signaliserte hvor de skulle. Dette stoppet en potensiell gjennomkjøring andre steder i rundkjøringen. I tillegg kan det være interessant å forske videre på hvordan de forskjellige psykologiske aspektene ved kø, diskutert av (Larson 1987), kan påvirke trafikkbildet. Det blir blant annet tatt frem «memory persistence», hvor man opplever at foregående uke eller måned som den med dårligst betjening. I tillegg blir det vist til en studie hvor opplevd tid varierer avhengig av kroppstemperatur. Videre blir det nevnt at enkelte verdsetter tid mer, og er følgelig villig til å betale for å unngå eller redusere forsinkelser. Å utvide forståelsen av slike psykologiske effekter kan føre med seg måter å forbedre tilfredsheten, uten å måtte betale like mye som dagens fremgangsmåter.

I køsimuleringer blir det ofte benyttet enkle modeller som veldig ofte har et begrenset bruksområde. I vår oppgave har det blant annet blitt brukt et mer avansert program, Arena, som har en større tilpasningsmulighet. Programmet er for øvrig meget avansert og uten gode kunnskaper om programmet så kan resultatene bli svært forskjellig fra virkeligheten. Det kan derfor være interessant for fremtidige studier å få en dypere innsikt i programmet, og utnytte dets analytiske egenskaper.

Et annet aspekt som er verdt å forske videre på er en alternativ måte å måle trafikkflyten på. Et godt sted å starte er arbeidet som Dirk (2003) utarbeidet, hvor han har hatt en annen vinkling på utregningene. I stedet for å se på tid (kjøretøyhastighet) og rom (å dele inn veien i seksjoner), har han heller regnet ut ankomst og gjennomsnittlig reisetid, som er uavhengig av strekningens hastighet. Det blir i Dirk sin modell fokusert på flyt og gjennomsnittlig reisetid i stedet for enkelthastigheter.

Prissensitivitet i forhold til kø har ikke blitt vurdert i denne oppgaven og kan være mulig tema for fremtidige oppgaver med et mer samfunnsøkonomiske fokus. Der kan blant annet Arnott et al. (1993) og (Vickrey 1969) være gode alternativer til litteratur.

Litteraturliste

- Anokye, M., Abdul-Aziz, A. R., Annin, K. & Oduro, F. T. (2013). Application of Queuing Theory to Vehicular Traffic at Signalized Intersection in Kumasi-Ashanti Region, Ghana. *American International Journal of Contemporary Research* 3(7): 23-29.
- Arnott, R., Palma, A. d. & Lindsey, R. (1993). A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand. *The American Economic Review*, 83 (1): 161-179.
- Beasley, J. E. (1996). *OR-Notes, Queueing theory*. Tilgjengelig fra: <http://people.brunel.ac.uk/~mastijb/jeb/or/queue.html> (lest 09.03).
- Bompenger. (2015). Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/Trafikkinformasjon/Reiseinformasjon/Bompenger> (lest 16.01.2015).
- Dalene, G., Johansen, L. & Thørgersen, T. S. (1993). *Sarpebrua - Hva nå? -alternative løsninger på Sarpborgs distriktets mest omtalte trafikkproblem*. Bachelor: Østfold distrikthøgskole, Avdeling for økonomi og administrasjon. 61 s.
- Dirk, H. (2003). A section-based queueing-theoretical traffic model for congestion and travel time analysis in networks. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 36 (46): L593.
- Geroliminis, N. & Skabardonis, A. (2011). Identification and Analysis of Queue Spillovers in City Street Networks. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12 (4): 1107-1115.
- Grimsmo, B. (2008). *Trafikklys - hva er greia?: Under Dusken*. Tilgjengelig fra: <http://folk.ntnu.no/arvida/doc/Under-Dusken-16-2008-trafikklys.pdf> (lest 27.01.2015).
- Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2005). *Introduction to operations research*. Boston: McGraw-Hill. XXV, 1061 s. : ill. s.
- Hillier, F. S. & Hillier, M. S. (2011). *Introduction to Management Science: A Modeling and Case Studies Approach with Spreadsheets*. 4 utg. Boston: McGraw-Hill. 629 s.
- Hillier, F. S. & Hillier, M. S. (2014). *Introduction to Management Science: A Modeling and Case Studies Approach with Spreadsheets*. 5 utg. Boston: McGraw-Hill. 618 s.
- Kerner, B. S. (2004). *The physics of traffic: empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory*. Berlin: Springer. XXIII, 682 s. : ill. s.
- Kerner, B. S. (2009). *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Konseptvalgutredning (KVU) for hovedvegssystemet i Moss og Rygge. (2012). Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/nb/dokumenter/konseptvalgutredning-kvu-for-hovedvegssys/id707106/> (lest 16.01.2015).
- Larson, R. C. (1987). OR Forum—Perspectives on Queues: Social Justice and the Psychology of Queueing. *Operations Research*, 35 (6): 895-905.
- Lartey, J. D. (2014). Predicting Traffic Congestion: A Queuing Perspective. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 2 (2): 57-66.
- McClain, J. O. (2003). *A Teaching Spreadsheet for Queueing Theory*. Tilgjengelig fra: <http://forum.johnson.cornell.edu/faculty/mcclain/Software/Queue.htm#Approximation> (lest 04.03).

- Mohring, H. (1962). *Highway benefits : an analytical framework / by Herbert Mohring and Mitchell Harwitz*. Evanston, Ill: Published for the Transportation Center at Northwestern University by Northwestern University Press.
- Nymo, R. (1999). *Stasjonaritet: Referansenotat*. Tilgjengelig fra: http://folk.uio.no/rnymoen/cikurs99_notat1.pdf (lest 06.03).
- Rehborn, H., Klenov, S. L. & Palmer, J. (2010). *Common Traffic Congestion Features studied in USA, UK, and Germany employing Kerner's Three-Phase Traffic Theory*. Tilgjengelig fra: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1012/1012.5160.pdf> (lest 28.02.2015).
- Rutetider. (2015). Tilgjengelig fra: <http://basto-fosen.no/rutetider/category7.html> (lest 19.01.2015).
- Simon, S. (2011). *What is a Poisson distribution?* Tilgjengelig fra: <http://www.pmean.com/definitions/poisson.htm> (lest 06.02.2015).
- Stewart, W. J. (2009). *Probability, Markov chains, queues, and simulation: the mathematical basis of performance modeling*. Princeton, N.J.: Princeton University Press. xviii, 758 s. : ill s.
- Strotz, R. H. (1965). Urban transportation parables. *The public economy of urban communities : papers presented at the 2. Conference on Urban Public Expenditures, 21.-22.2.1964, under the sponsorship of the Committee on Urban Economics of Resources for the Future, inc.*: 127-169.
- Torgersen, E. & Bjørke-Hill, C. (2010). *Politisk flertall for bomring*. Tilgjengelig fra: <http://www.nrk.no/ostfold/politisk-flertall-for-bomring-1.7327889> (lest 16.01.2015).
- Vickrey, W. S. (1969). Congestion Theory and Transport Investment. *American Economic Review*, 59 (2).
- Vinje, E. (2015). *Vil ha bomring rundt Moss*: Moss Avis. Tilgjengelig fra: http://www.moss-avis.no/Vil_ha_bomring_rundt_Moss-5-67-24071.html (lest 16.01.2015).
- Vågane, L. (2011). Reisevaner i Moss og Rygge 2009/2010, 1143/2011. 30 s.
- Weum, A.-I., Hansen, J. I., Olsvik, I. & Ristesund, Ø. (2012). Konseptvalgutredning for Moss og Rygge. *Konseptvalgutredning*, 12-1596: Statens vegvesen. 94 s.
- Zhang, Y., Duan, H. & Zhang, Y. (2007). Modeling Mixed Traffic Flow at Crosswalks in Micro-Simulations Using Cellular Automata. *Tsinghua Science & Technology*, 12 (2): 214-222.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no