

Hanna Stokke Brandtzæg

Oppdatering av norsk kapasitetsmodell for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer

En oppdatering av håndbok 127- Kapasitet i kryss
fra 1985

Masteroppgave i Bygg og miljøteknikk

Veileder: Arvid Aakre

Juni 2022

Hanna Stokke Brandtzæg

Oppdatering av norsk kapasitetsmodell for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer

En oppdatering av håndbok 127- Kapasitet i kryss fra
1985

Masteroppgave i Bygg og miljøteknikk
Veileder: Arvid Aakre
Juni 2022

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

Sammendrag

Ved planlegging av fremtidige kryss og vurdering av eksisterende er det nyttig å kunne beregne kapasitet, forsinkelse og kølengde. Dette kan gjøres i beregningsprogrammer eller med manuelle metoder. De siste årene har det blitt mer og mer vanlig å bruke beregningsprogrammer til å beregne disse verdiene. Likevel kan det være nyttig med manuelle beregningsverktøy for å enklere kunne forstå sammenhenger og beregningsgang. I Norge finnes det en slik modell i «Håndbok 127- kapasitet i kryss» fra 1985. Siden den ble publisert har det skjedd en utvikling i både hvordan kryss utformes, og metodene for kapasitetsberegning. Målet med oppgaven har vært å begynne arbeidet med å utvikle en ny norsk kapasitetsmodell for forkjøringsregulerte kryss og rundkjøringer. Den nye modellen skal løse noen av utfordringene i den gamle norske modellen. Det innebærer blant annet å endre måten kø og forsinkelse beregnes på, og utvikle en helt ny modell for kapasitetsberegning i rundkjøringer.

Arbeidet har i stor grad bestått av litteraturstudie og sammenligning av kapasitetsmodeller fra USA, Sverige og Danmark. Beregningsprogrammet SIDRA Intersections har også blitt brukt i sammenligningen. Dette ble gjort både ved å vurdere steg for steg i modellene, men også med beregning av eksempler. Sammenligningen av de internasjonale kapasitetsmodellene viste at beregningsgangen og teorien modellene er bygd på har mange likhetstrekk. Likevel er det noen forskjeller i modellene, spesielt i modellene for rundkjøringer. Sammenligningen dannet grunnlaget for neste steg i arbeidet, som var å utvikle en grunnmodell. Målet med grunnmodellen var å lage en modell som skulle være første steg i utviklingen av en ny norsk kapasitetsmodell. Samtidig skulle grunnmodellen gi resultater som var i nærheten av de andre kapasitetsmodellene. Derfor ble grunnmodellen også testet med de samme eksemplene som de andre kapasitetsmodellene.

Neste steg var å videreutvikle grunnmodellen til en mer fullstendig modell. I dette arbeidet ble det tatt tak i utfordringer i grunnmodellen, og andre utfordringer som ble funnet i de internasjonale kapasitetsmodellene. På grunn av begrenset tid i prosjektet ble det gjort noen forenklinger i modellen. Tidsbegrensningen førte også til at noen temaer måtte bortprioriteres. Avslutningsvis ble den videreutviklede modellen testet mot eksempler som også hadde blitt testet mot de andre kapasitetsmodellene. I de tre eksemplene den videreutviklede modellen ble testet med, var resultatene gode. Likevel betyr det ikke at arbeidet med modellen er ferdig.

I videre arbeid med modellen bør det gjøres feltobservasjoner i Norge som sammenlignes med beregningsresultater fra modellen. Dette er for å undersøke om verdiene på parameterne som er valgt i modellen stemmer overens med norske forhold i dag. Det bør også gjøres en vurdering om noe av det som er inkludert i modellen i dag kan inkluderes på en bedre, mer nøyaktig eller enklere måte. Modellen kan også utvikles til en mer fleksibel modell som kan ta hensyn til flere faktorer.

Abstract

When planning intersections and evaluating existing intersections, it is necessary to calculate capacity, delay, and queue length. These types of calculations could be done with computer programs or manually. The last years, computer programs have become more and more common to use instead of manual calculations. However, manual methods can be useful in some cases. This is because it can be easier to understand how the model works when you do the calculations yourself. In Norway, there is a manual method in a handbook from 1985. After this, there has been a development in how intersections are built, and how capacity is calculated. Therefore, the Norwegian method needs an update. The goal for this master's thesis is therefore to start the work on updating the method. The new model must solve some of the challenges from the old method. For instance, this includes updating how queues and delay are calculated and making a new model for roundabouts.

The method in the study has been to compare capacity models from USA, Sweden, and Denmark. The software SIDRA intersections have also been a part of the comparison. Firstly, the models were compared in detail. The comparison was done step by step for the models and showed that the capacity models had many things in common. There were some differences, but these were mostly in the models for roundabouts. The comparison was the basis for the next step, which was the development of a basic model. The goal for the basic model was to be a good starting point for future work. However, the base model had to give good results in comparison with the other capacity models. Because of this, the basic model was also tested with the same examples as the other models.

Next, the basic model was further developed. In this work, some simplifications and cons of the basic model were worked on. Because of the project's time constraints, some prioritization was required. Some solutions had to be simplified, and something needed to be completely de-prioritized. After the development was finished, the model was tested with the same examples as earlier. The result of the testing was good, and the two models had results that were close to the other capacity models. However, this is not enough to make the conclusion that the models are good.

In future work, there should be done some field observation in Norway. This is to check if the values of the parameters that are chosen are similar to Norwegian conditions today. It should also be considered if something that is included in the model today could be done better, more accurate, or simpler. The models could also be more flexible and include more.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for NTNU våren 2022, og oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng. Masteroppgaven er skrevet innenfor retningen Transport på studieprogrammet bygg og miljøteknikk.

I forkant av masteroppgaven ble det høsten 2021 skrevet en prosjektoppgave med samme tema. I prosjektoppgaven ble det gjennomført et litteratursøk som dannet grunnlag for arbeidet i masteroppgaven. Noe av arbeidet i prosjektoppgaven er inkludert i denne oppgaven. Hva som er gjenbrukt fra prosjektoppgaven kommer tydelig frem i starten av de aktuelle kapitlene.

Det rettes en stor takk til veileder Arvid Aakre for engasjement, gode innspill og diskusjoner underveis i prosjektet. Jeg vil også takke medstudenter på lesesal for viktig støtte gjennom hele semesteret.

Hanna Stokke Brandtzæg

Hanna Stokke Brandtzæg

Trondheim, juni 2022

Innhold

Figurer	xi
Tabeller	xiii
Formler	xiv
Forkortelser og symboler	xv
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål med oppgaven	2
1.3 Avgrensning	2
1.4 Oppgavens oppbygning	3
2 Teoretisk bakgrunn	4
2.1 Kryssløsninger	4
2.1.1 Forkjørsregulerte kryss	4
2.1.2 Rundkjøringer	4
2.1.3 Relevante norske vegnormaler og veiledninger	5
2.2 Prinsipper i kapasitetsmodeller	6
2.2.1 Mikroskopisk, makroskopisk og mesoskopiske modeller	7
2.2.2 Modeller baser på kritisk tidsluke	7
2.2.3 Modeller basert på regresjon	10
2.2.4 Modeller basert på køteori	10
2.2.5 Tidsavhenge køteori	11
2.2.6 Kjøretøyskategorier	13
2.2.7 Fotgjengere og syklisters påvirkning på kapasiteten	14
3 Metode i masteroppgaven	17
3.1 Litteraturstudie	17
3.2 Sammenligning av dagens modeller	17
3.2.1 Gjennomgang av modeller	17
3.2.2 Beregning av eksempler	18
3.3 Utvikling av grunnmodell	21
3.4 Videreutvikling av modell	21
4 Beskrivelse og sammenligning av dagens modeller	22
4.1 Håndbok 127- Kapasitet i kryss (Norge)	22
4.1.1 Metode F, forkjørsregulerte kryss	22
4.1.2 Metode R, rundkjøringer	23
4.1.3 Metode U, uregulerte kryss	23

4.2	Kapacitet och framkommelighetseffekter (Sverige).....	24
4.2.1	Forkjørsregulerte kryss	24
4.2.2	Rundkjøringer.....	25
4.3	Kapacitet og serviceniveau (Danmark).....	26
4.3.1	Forkjørsregulerte kryss	26
4.3.2	Rundkjøringer.....	28
4.4	Highway capacity manual 7 th Edition (USA)	29
4.4.1	Toveis stop-kontrollerte kryss(TWSC)	29
4.4.2	Rundkjøringer.....	31
4.5	SIDRA intersection	32
4.6	Sammenligning av modellene	34
4.6.1	Modellene generelt	34
4.6.2	Forkjørsregulerte kryss	35
4.6.3	Rundkjøringer.....	43
4.7	Beregning av eksempelkryss.....	47
4.7.1	Eksempel 1- T- kryss 1	47
4.7.2	Eksempel 2- Rundkjøring 1.....	49
4.7.3	Eksempel 3- T kryss 2	51
5	Utvikling av grunnmodell	53
5.1	Grunnmodell for forkjørsregulert T-kryss.....	53
5.1.1	Inndeling i trafikkstrømmer	54
5.1.2	Beregning av overordnet trafikkmengde.....	54
5.1.3	Bestemme kritisk tidsluke og følgetid.....	58
5.1.4	Beregning av potensiell kapasitet	59
5.1.5	Korrigert kapasitet	59
5.1.6	Dimensjonerende kølengde	60
5.1.7	Forsinkelse	60
5.1.8	Beregning av eksempelkryss	61
5.1.9	Utfordringer med grunnmodellen.....	65
5.2	Grunnmodell for rundkjøring.....	67
5.2.1	Inndeling i trafikkstrømmer	68
5.2.2	Beregning av overordnet trafikkmengde.....	68
5.2.3	Bestemme kritisk tidsluke og følgetid.....	69
5.2.4	Beregne kapasitet og kapasitetskorreksjon.....	70
5.2.5	Kapasitetskorreksjon	70
5.2.6	Dimensjonerende kølengde	71
5.2.7	Forsinkelse	71

5.2.8	Beregning av eksempelkryss	72
5.2.9	Utfordringer med grunnmodellen.....	73
6	Videreutvikling av modell	75
6.1	Forkjøringsregulerte T-kryss	75
6.1.1	Kjøretøyskategorier	75
6.1.2	Myke trafikanter.....	76
6.1.3	Utvikling av kø og forsinkelse	78
6.1.4	Beregning av eksempelkryss	80
6.1.5	Diskusjon	85
6.2	Rundkjøringer	89
6.2.1	Kjøretøyskategorier	89
6.2.2	Myke trafikanter.....	89
6.2.3	Utvikling av kø og forsinkelse	90
6.2.4	Beregning av eksempelkryss	90
6.2.5	Diskusjon	93
7	Konklusjon	95
7.1	Videre arbeid	95
	Referanser	97
	Vedlegg	100

Figurer

Figur 2.1 X-kryss (Statens Vegvesen, 2013)	4
Figur 2.2 T-kryss (Statens Vegvesen, 2013)	4
Figur 2.3 Rundkjøring med 3 og 4 armer (Statens Vegvesen, 2013).....	5
Figur 2.4 Krav til venstresvingefelt basert på dimensjonerende trafikkmengde (Statens Vegvesen, 2021)	6
Figur 2.5 Basisverdier for kritisk tidsluker. (Trafikverket, 2014; Transportation Research Board, 2022; Vegdirektoratet, 1985; Vegdirektoratet, 2019)	7
Figur 2.6 Antall kjøretøy som bruker en tidsluke i hovedstrømmen(R. J. Troutbeck & Brilon, u.å.)	8
Figur 2.7 Illustrasjon av koordinattransformasjonsmetoden (Hagring, 2001a)	12
Figur 2.8 Gjennomsnittlig kølengde for $x=0,9$ og en startkø på 30 biler (R. Troutbeck & Blogg, 1998).....	13
Figur 2.9 Korreksjonsfaktor med metoden til Marlow og Maycock (Mauro, 2010)	14
Figur 2.10 Korreksjonsfaktor med metoden til Brilon, Stewe og Drewe (Mauro, 2010)...	15
Figur 2.11 Sortering av de fire ulike tilstandene i hovedstrømmen (Wu, 2001)	16
Figur 3.1 Utforming og trafikkmengder i eksempel 1	18
Figur 3.2 Utforming og trafikkmengder i eksempel 2	19
Figur 3.3 Utforming og trafikkmengder eksempel 3.....	20
Figur 4.1 Beregningsgang metode F	22
Figur 4.2 Beregningsgang for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer i svensk modell .	25
Figur 4.3 Beregningsgang for forkjørsregulerte kryss i dansk modell	27
Figur 4.4 Beregningsgang for rundkjøringer i dansk modell	28
Figur 4.5 Beregningsgang for TWSC kryss i HCM	30
Figur 4.6 Beregningsgang for rundkjøringer i HCM	31
Figur 4.7 Oversikt over trafikkmodeller (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020)	32
Figur 4.8 Oversikt over trafikkstrømmer i et T-kryss	36
Figur 4.9 Dimensjonerende kølengde(L_p) norsk modell (Vegdirektoratet, 1985)	38
Figur 4.10 95% persentil kølengde dansk modell	39
Figur 4.11 Forskjell mellom kølengde og "Back of queue"	40
Figur 4.12 Korreksjonsfaktor fotgjengere dansk modell	45
Figur 4.13 Korreksjonsfaktor fotgjengere HCM, ett kjørefelt inngående (Transportation Research Board, 2022).....	46
Figur 4.14 Beregnet kapasitet i eksempel 1	47
Figur 4.15 Beregnet gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 1.....	48
Figur 4.16 Dimensjonerende kølengde i eksempel 1	48
Figur 4.17 Beregnet kapasitet i eksempel 2	49
Figur 4.18 Beregnet gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 2.....	50
Figur 4.19 Beregnet 95% persentil kølengde i eksempel 2	50
Figur 4.20 Beregnet kapasitet i eksempel 3	51
Figur 4.21 Beregnet gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 3 *Y-aksen på figuren er justert siden gjennomsnittlig forsinkelse for dansk modell og HCM er veldig stor	52
Figur 4.22 Beregnet dimensjonerende kølengde eksempel 3	52
Figur 5.1 Beregningsgangen i grunnmodellen	53
Figur 5.2 Oversikt over trafikkstrømmer i T-kryss	54
Figur 5.3 Overordnet trafikkmengde CV.....	55

Figur 5.4 Overordnet trafikkmengde BH	56
Figur 5.5 Overordnet trafikkmengde BV.....	57
Figur 5.6 Sammenligning av kapasitet i eksempel 1	61
Figur 5.7 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 1	62
Figur 5.8 Sammenligning av dimensjonerende kølengde eksempel 1	62
Figur 5.9 Sammenligning av kapasitet i eksempel 3	63
Figur 5.10 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 3 *Y-aksen på figuren er justert siden gjennomsnittlig forsinkelse for dansk modell og HCM er veldig stor	64
Figur 5.11 Sammenligning av dimensjonerende kølengde i eksempel 3	64
Figur 5.12 Beregningsgang i grunnmodell rundkjøringer	67
Figur 5.13 Trafikkstrømmer i en rundkjøring	68
Figur 5.14 Overordnet trafikkmengde tilfart D i rundkjøring	69
Figur 5.15 Sammenligning av kapasitet i eksempel 2	72
Figur 5.16 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 2	72
Figur 5.17 Sammenligning av dimensjonerende kølengde i eksempel 2	73
Figur 6.1 Kapasitet med ulike metoder for å ta hensyn til innvirkning av fotgjengere	77
Figur 6.2 Eksempel på resultat estimat av køutvikling	79
Figur 6.3 Eksempel på resultat estimat av forsinkelse	80
Figur 6.4 Sammenligning av kapasitet i eksempel 1	81
Figur 6.5 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 1	81
Figur 6.6 Sammenligning av resultat dimensjonerende kølengde i eksempel 1	82
Figur 6.7 Kapasitet i eksempel 1 med og uten fotgjengerfelt	83
Figur 6.8 Sammenligning av kapasitet eksempel 3.....	83
Figur 6.9 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 3 *Y-aksen på figuren er justert siden gjennomsnittlig forsinkelse for dansk modell og HCM er veldig stor	84
Figur 6.10 Sammenligning av dimensjonerende kølengde eksempel 3	85
Figur 6.11 Sammenligning av resultat kapasitet eksempel 3	91
Figur 6.12 Sammenligning av resultat gjennomsnittlig forsinkelse eksempel 3	91
Figur 6.13 Sammenligning av resultat dimensjonerende kølengde eksempel 3	92
Figur 6.14 Kapasitet i eksempel 2 med og uten fotgjengerfelt	93

Tabeller

Tabell 1.1 Oppgavens oppbygning	3
Tabell 2.1: Krav for ulike dimensjoneringsklasser, utdrag fra tabell 3.3 i N100 (Statens Vegvesen, 2021)	5
Tabell 4.1 Sammenligning av faktorer i modellene for forkjørsregulert kryss	35
Tabell 4.2 Faktorer som påvirker kritisk tidsluke	37
Tabell 4.3 Sammenligning av faktorer i modellene for rundkjøringer	43
Tabell 5.1 Verdier kritisk tidsluke og følgetid grunnmodell	58
Tabell 5.2 Korreksjon for reguleringsform	58
Tabell 5.3 Korreksjon for fartsgrense på forkjørsveg	58
Tabell 5.4 Korreksjon for antall gjennomgående kjørefelt på forkjørsvegen	58
Tabell 5.5 Sensitivitet endring av kritisk tidsluke	66
Tabell 5.6 Foreslåtte verdier for kritisk tidsluke i grunnmodellen for rundkjøringer	69
Tabell 6.1 Forslag til personbilekvivalenter i modell for T-kryss (Vejdirektoratet, 2019) ..	76
Tabell 6.2 Fordeling av trafikkmengder i Excel-modell	78
Tabell 6.3 Forslag til personbilekvivalenter i modell for rundkjøringer (Vejdirektoratet, 2019)	89

Formler

Formel 2-1 Kapasitet med Siegloch's formel.....	9
Formel 2-2 Kapasitet med Harder's formel.....	9
Formel 2-3 Kølengde i et M/M/1 system	10
Formel 2-4 Kølengde i et D/D/1 system.....	10
Formel 2-5 Little's lov	11
Formel 2-6 Kølengde med koordinattransformasjonsmetoden	11
Formel 2-7 Gjennomsnittlig ventetid med koordinattransformasjonsmetoden	12
Formel 4-1 95% persentil kølengde HCM	40
Formel 4-2 Utrykk for ventetid svensk modell	41
Formel 4-3 Utrykk for forsinkelse dansk modell	41
Formel 4-4 Utrykk for forsinkelse HCM	42
Formel 4-5 Kjørefeltkapasitet rundkjøring HCM	44
Formel 5-1 Overordnet trafikkmengde CV.....	55
Formel 5-2 Overordnet trafikkmengde BH.....	56
Formel 5-3 Overordnet trafikkmengde BV.....	57
Formel 5-4 Potensiell kapasitet for trafikkstrøm i.....	59
Formel 5-5 Potensiell kapasitet for overordnede trafikkstrømmer.....	59
Formel 5-6 Kapasitet for trafikkstrøm AH, AR, BH, CV, og CR.....	59
Formel 5-7 Korrigert kapasitet for trafikkstrøm BV.....	60
Formel 5-8 Kapasitet delt kjørefelt.....	60
Formel 5-9 Dimensjonerende kølengden 95% persentil	60
Formel 5-10 Gjennomsnittlig forsinkelse.....	61
Formel 5-11 Potensiell kapasitet for hver trafikkstrøm.....	70
Formel 5-12 Kapasitet for hver trafikkstrøm i grunnmodellen	70
Formel 5-13 Kjørefeltkapasiteten for delt kjørefelt.....	70
Formel 5-14 95% persentil kølengde.....	71
Formel 5-15 Gjennomsnittlig forsinkelse.....	71
Formel 6-1 Kølengde i slutten av hver tidsperiode	79
Formel 6-2 Korreksjonsfaktor for rundkjøringer med et sirkulerende kjørefelt	90
Formel 6-3 Korreksjonsfaktor for rundkjøringer med to sirkulerende kjørefelt	90

Forkortelser og symboler

Under er de forkortelsene og symbolene som er brukt i denne oppgaven listet opp. Dette er ikke en fullstendig liste over alle relevante forkortelser og symboler for temaet i oppgaven. I noen tilfeller er enheten [personbilekvivalenter/t] istedenfor [kjt/t], men symbolet står fortsatt for den samme betydningen. Symbolene blir igjen forklart i teksten første gang de brukes i hvert kapittel.

Kjt	Kjøretøy
LOS	Level of service
HCM	Highway capacity manual
TWSC	Two-way stop controlled (toveis stopp kontrollert)
ÅDT	Årsdøgntrafikk
C_m	Kapasitet for svingebevegelsen (movement) [kjt/t]
C_p	Potensiell kapasitet [kjt/t]
C_{SH}	Kapasitet for kjørefelt (shared line) [kjt/t]
d	Gjennomsnittlig forsinkelse (control delay) [s]
f	Faktor for utkjørende trafikkmengde
f_{fot}	Korreksjonsfaktor for fotgjengere
n_{fot}	Antall kryssende fotgjengere per time [fotgjengere/t]
Q	Kølengde (queue length) [kjt]
T	Beregningsperiodens lengde [t]
t_0	$t_c - 0,5 \cdot t_r$ [s]
t_c	Kritisk tidsluke [s]
t_f	Følgetid [s]
v	Trafikkmengde [kjt/t]
v_c	Overordnet trafikkmengde [kjt/t]
w	Gjennomsnittlig ventetid (waiting time) [s]
x	Belastningsgrad []

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Beregning av kapasitet, kølengde og forsinkelse i kryss kan være viktig av flere grunner. Med kapasitet i et kryss menes hvor mange kjøretøy som kan kjøre gjennom et kryss per gitt tidsenhet. For det første er forsinkelse en tidskostnad for trafikanter i samfunnsøkonomiske analyser. Dimensjonerende kølengde er også viktig å kunne estimere siden lange køer kan skape tilbakeblokkering på nærliggende kryss eller på avkjøringsramper. Ekstra start og stopp for fossilbiler vil også føre til høyere utslipp. Det er derfor viktig å kunne si noe om disse parameterne for å best kunne vurdere ulike typer kryssløsninger og utforming av disse.

I dag brukes ofte simuleringsprogrammer for å beregne kapasitet, kølengde og forsinkelse kryss. Slike programmer har i mange tilfeller tatt over for bruken av manuelle beregningsprogrammer. Det er flere fordeler med slike beregningsprogrammer, blant annet at modellene kan være mer avanserte enn manuelle beregningsmodeller. En mer avansert beregning gir også rom for å modellere kryss som har utforming som avviker fra normalen. Likevel kan det være flere fordeler med manuelle beregningsmodeller. Ved en manuell beregning har man mer oversikt over hva som er inndata i modellen. Man kan derfor lettere se en sammenheng mellom inndata og resultat i modellen. Dette kan gjøre det enklere å forstå hva som må endres for å oppnå ønsket resultat.

I Norge finnes det en manuell beregningsmodell for kapasitetsberegninger i forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer. Håndboken har navn «Håndbok 127- Kapasitet i kryss», og ble publisert i 1985. Den er lite brukt i dag, og ligger ikke lenger ute på Statens vegvesens liste over håndbøker. Håndbok 127 består av tre metoder; Metode F for forkjørsregulerte kryss, metode R for rundkjøringer og metode U for uregulerte kryss. Metodene er i hovedsak basert på metodikk fra USA, Tyskland og England.

De siste 40 årene har det vært en utvikling på fagområdet, og det har blitt gjort ny forskning. Det gjør at nye kapasitetsmodeller i andre land bygger på litt annen teori enn de gjorde før. En annen grunn til at modellene har blitt oppdatert er at utforming av kryss, og spesielt rundkjøringer har endret seg de siste årene. Det har også blitt et økt fokus på prioritering av kollektivtransport og myke trafikanter. Dette er noe de gamle modellene ikke tok hensyn til. Siden omfanget av disse gruppene har økt er det viktig at en kapasitetsmodell kan si noe om hvordan disse gruppene påvirker avviklingen i krysset.

1.2 Mål med oppgaven

Som beskrevet i bakgrunn for oppgaven er det nødvendig å oppdatere den norske beregningsmodellen for kapasitetsberegning i kryss. På bakgrunn av dette er problemstillingen «**utarbeidelse av en ny norsk beregningsmodell for ikke signalregulerte kryss**» valgt. På grunn av begrenset tid vil det ikke være mulig å utvikle en modell som er klar til å publiseres som en håndbok. Likevel er målet å skulle ta tak i viktige mangler i den gamle modellen. Det er også et mål at modellen som utvikles i denne oppgaven skal være så fullstendig at det er mulig å gjennomføre beregninger, og at resultatene av disse beregningene skal være i nærheten av virkelige observasjoner.

Videre er det utarbeidet tre forskningsspørsmål som skal besvares i oppgaven. De tre forskningsspørsmålene med tilhørende forklaring er listet nedenfor.

- *Hva skiller den norske, amerikanske, svenske og danske modellen for å beregne kapasitet i forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer?*

For å kunne utarbeide en ny kapasitetsmodell er det viktig å ha god kjennskap til andre kapasitetsmodeller. Det skal derfor gjøres en grundig sammenligning for å se på likheter og forskjeller mellom de ulike modellene. Modellene som den norske modellen sammenlignes med er publisert i løpet av de siste ti årene. En kan derfor se hvilken utvikling det har vært i kapasitetsmodeller siden den norske modellen ble utgitt i 1985.

- *Hvordan kan sammenligning av de internasjonale kapasitetsmodellene brukes til å utvikle en ny norsk beregningsmodell?*

Sammenligningen av de internasjonale kapasitetsmodellene kan brukes som et grunnlag for utvikling av den nye beregningsmodellen. Fra sammenligningen er det viktig å være klar over hvilke styrker og svakheter de ulike metodene har, som eventuelt blir videreført i den nye modellen. Det kan også være deler av de internasjonale beregningsmodellene som av ulike årsaker ikke er overførbare til den nye modellen som skal utvikles.

- *Hvordan er resultatene fra den nye modellen sammenlignet med andre modeller?*

Det er ønskelig at den nye modellen skal kunne gjøre beregninger med realistiske resultater. For å teste dette kan eksempelberegninger gjøres med de ulike kapasitetsmodellene. Dersom resultatene fra den nye modellen er i nærheten av resultatene fra de andre kapasitetsmodellene er det en god indikasjon på at modellen fungerer. Samtidig er ikke gode resultater nok til å konkludere at den nye modellen er ferdig utviklet.

1.3 Avgrensning

Gjennom litteratursøk og diskusjon med veileder er det valgt å avgrense oppgaven til å se på T-kryss og rundkjøringer. Forkjørsregulerte X-kryss har blitt valgt bort siden dette er en krysstype som kun anbefales etablert på lokalveger (Statens Vegvesen, 2021).

Det skal også utvikles en Excel-modell som er basert på modellene som utvikles i oppgaven. På grunn av begrensninger i programmet, vil modellen kun fungere på noen typer standard utforminger av kryssene. Dersom modellen skal være mer fleksibel kan det være andre dataverktøy som er mer egnet et Microsoft Excel.

Det vil også være en avgrensning i omfang av oppgaven siden det kun er 20 uker til rådighet. Dette gjør at modellen som utvikles kun vil ta utgangspunkt i dagens

internasjonale kapasitetsmodeller, og annen litteratur som blir funnet. Datainnsamling og feltobservasjoner vil ikke være en del av oppgaven på grunn av tidsbegrensning. Det vil si at modellen ikke vil bli testet mot feltobservasjoner, men bare mot andre kapasitetsmodeller.

1.4 Oppgavens oppbygning

Oppgaven består av 7 hovedkapitler med tilhørende underkapitler. Tabellen under viser en oversikt over hva de ulike kapitlene inneholder. Etter hovedkapitlene kommer referanseliste og en liste over elektroniske vedlegg.

Tabell 1.1 Oppgavens oppbygning

Kapittel		Innhold
1	Introduksjon	Presentasjon av bakgrunn og mål for oppgaven, problemstilling, forskningsspørsmål og oppgavens avgrensning.
2	Teoretisk bakgrunn	Teori om kryssløsninger og kapasitetsmodeller presenteres.
3	Metode i masteroppgaven	Her presenteres metoden og fremgangsmåten i oppgaven.
4	Beskrivelse og sammenligning av dagens modeller	Den norske, svenske, danske modellen, HCM og SIDRA Intersections presenteres og sammenliknes.
5	Utvikling av grunnmodell	Grunnmodellen som er utviklet for T-kryss og rundkjøringer presenteres og vurderes.
6	Videreutvikling av modell	Videreutvikling av noen deler av grunnmodellen, samt en vurdering av det som blir inkludert.
7	Konklusjon	Forskningsspørsmål og problemstilling besvares. Det blir også foreslått hva som kan gjøres i videre arbeid.

2 Teoretisk bakgrunn

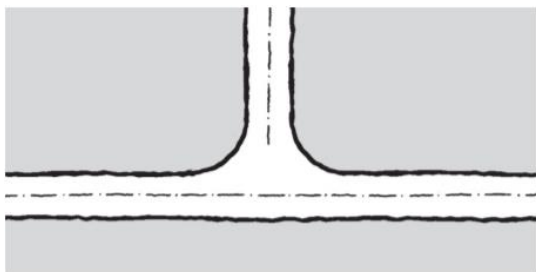
I dette kapitlet skal det gjøres rede for de krysstypene som vil inngå i beregningsmodellen. Krav og anbefalinger til disse krysstypene skal også presenteres. Videre skal grunnleggende prinsipper og teorier i fremkommelighetsmodeller forklares. Hensikten med dette er å få en grundig forståelse for temaet før de ulike modellene gjennomgås og sammenlignes i kapittel 4.

I litteraturstudiet i prosjektoppgaven ble mye relevant litteratur funnet. Store deler av innholdet i dette kapitlet er derfor hentet fra denne oppgaven. Det er ikke direkte referert til hva som er hentet til prosjektoppgaven, siden de originale siteringene er beholdt. Det ble supplert med noe teori i masteroppgaven. Den nye teorien vil i hovedsak være i kapittel 2.1.3, 2.2.4, 2.2.6 og 2.2.7.

2.1 Kryssløsninger

2.1.1 Forkjøringsregulerte kryss

Et forkjøringsregulert kryss er vanligvis et T-kryss (3 armer) eller X-kryss (4 armer). I et forkjøringsregulert kryss har primærveien forkjøringsrett, mens sekundærvegen må vike. Sekundærveien kan også være regulert med stopp-plikt. Dette kan brukes i kryss som er spesielt farlige. Figurene under viser utformingen av et enkelt T- og X-kryss.



Figur 2.2 T-kryss (Statens Vegvesen, 2013)



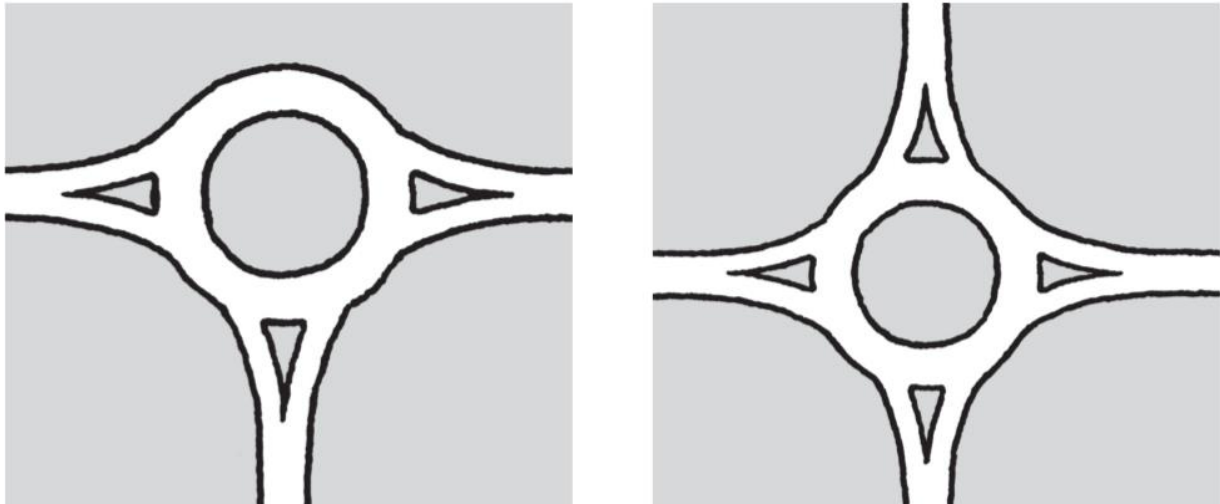
Figur 2.1 X-kryss (Statens Vegvesen, 2013)

Istedenfor begrepene primærveg og sekundærveg, kan også begrepene forkjøringsveg og sideveg brukes. Den gamle norske håndboken bruker de to sistnevnte begrepene.

2.1.2 Rundkjøringer

En standard rundkjøring har tre eller fire armer, og ett eller to sirkulerende kjørefelt. Alle tilfartene er regulert med vikeplikt ovenfor den sirkulerende strømmen. Forsinkelsen blir fordelt jevnere mellom tilfartene i en rundkjøring enn i et forkjøringsregulert kryss.

Rundkjøring er derfor en krysstype som er vanlig dersom trafikkbelastningen er jevn i alle tilfartene. En enkel rundkjøring med tre og fire tilfarter er illustrert i figurene under.



Figur 2.3 Rundkjøring med 3 og 4 armer (Statens Vegvesen, 2013)

2.1.3 Relevante norske vegnormaler og veiledninger

Normalen N100 fra Statens vegvesen beskriver krav til utforming av norske veger, og inneholder et eget temakapittel om kryssutforming. Her er det også beskrevet hvilke situasjoner ulike kryssløsninger kan brukes (Statens Vegvesen, 2021). Tabell 2.1 viser en oversikt over hvilke krysstyper som er tiltatt for ulike dimensjoneringsklasser.

Tabell 2.1: Krav for ulike dimensjoneringsklasser, utdrag fra tabell 3.3 i N100 (Statens Vegvesen, 2021)

	H1	H2	H3	Hø1	Hø2	Lokale veger	Øvrige lokalveier
Vegtype	H/Hø	H	H	Hø	L1	L	L2
ÅDT	< 6000	6000-12000	> 12000	< 4000	< 12000	< 1500	< 300
Fartsgrense [km/t]	80	90	110	80	60	80 / 60	50
Kryssløsning	T-kryss	Planskilt eller T-kryss	Planskilt	T-kryss eller Rundkjøring	T/X-kryss eller rundkjøring	T-kryss	

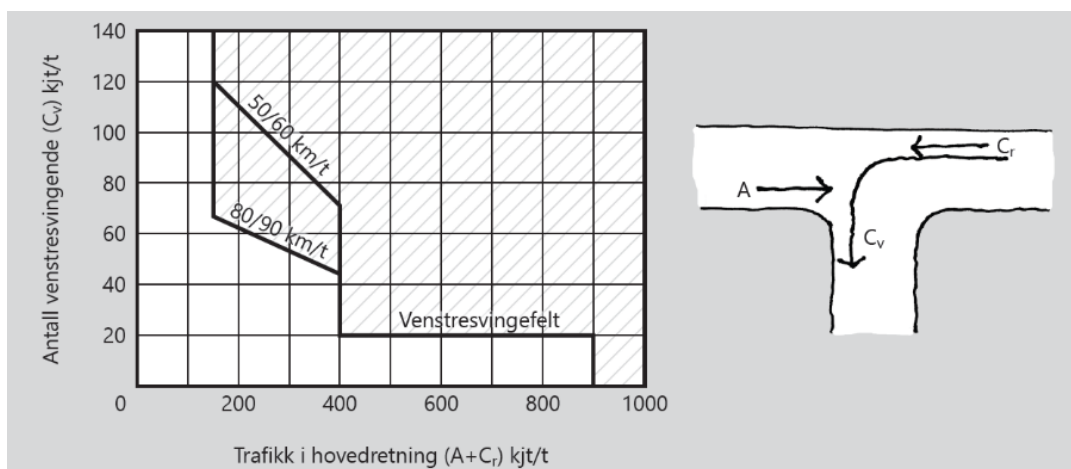
Tabellen over viser at T-kryss er en løsning som kan etableres ved høyere fartsgrense og ÅDT enn X-kryss. Grunnen til dette er at X-kryss består av fire armer, som gjør at det er flere bevegelser i konflikt. Dette fører til høyere ulykkesrisiko (TØI, 2014). Det skjedde en del endringer i N100 fra versjonen utgitt i 2013 til 2019. I 2013 versjonen var det 9 typer hovedveier. Det var også i større grad tillatt med rundkjøringer på hovedveier. Endringen kom etter at samferdselsdepartementet krevde at rundkjøringer ikke skulle etableres på hovedveier fordi rundkjøringer skaper mindre flyt i trafikken (Høyberg, 2015). I dag er rundkjøringer tillatt som kryssløsning på øvrige hovedveier og lokalveger.

Det er et krav til at T- og X- kryss på hovedveier skal forkjørsreguleres (Statens Vegvesen, 2021). Dette er for å sørge for god fremkommelighet for de som kjører på

hovedveien, siden de som skal rett frem på hovedveien ikke må vike for andre trafikkstrømmer. Det er også et krav om at uregulerte T- og X- kryss ikke skal etableres dersom fartsgrensen er større eller lik 60 km/t. Dette vil si at det er kun på lokalveier at det er tillatt med uregulerte kryss.

Det er et krav at X-kryss som etableres på HØ2-veger signalreguleres (Statens Vegvesen, 2021). På bakgrunn av dette skal det i denne oppgaven kun utvikles modell for forkjøringsregulerte T-kryss, siden det er den vanligste av de to krysstypene på mer trafikkerte veier.

Dersom det er høy nok andel venstresvingene og trafikk på hovedveien skal det etableres et separat venstresvingefelt (Statens Vegvesen, 2021). Det er krav til venstresvingefelt innenfor det skraverte området i høyre del av Figur 2.4. Dette gjør at venstresvingefelt benyttes der det er store trafikkmengder. Figuren viser også at det er lavere terskel for å kreve venstresvingefelt når fartsgrensen er høyere.



Figur 2.4 Krav til venstresvingefelt basert på dimensjonerende trafikkmengde (Statens Vegvesen, 2021)

Det finnes også en veiledning spesifikt for kryss med navn «Geometrisk utforming av veg- og gatekryss» (V121). Veiledningen er en videre forklaring til kravene i håndbok N100. Hensikten med veiledningen er at alle kryss skal bli utformet på en god måte med tanke på sikkerhet, avvikling, miljø og universell utforming (Statens Vegvesen, 2013). Her finnes det egne kapitler om de ulike krysstypene, samt kapitler om hvordan disse skal utformes.

2.2 Prinsipper i kapasitetsmodeller

Videre vil begrepene «modell» og «metode» bli mye brukt. Store norske leksikon definerer en metode som en «*planmessig fremgangsmåte, især i vitenskap og filosofi, gjerne grunnet på regler og prinsipper*» (Tranøy, 2019). En modell defineres av SNL som «*en forenklet fremstilling av en teori, en prosess eller en situasjon*» (Persvold, 2021). Begrepet modell vil brukes om samlede måter en kan beregne fremkommelighet i kryss. Metode vil bli brukt om mer spesifikke fremgangsmåter for å komme frem til et resultat. Likevel vil det i noen tilfeller være mulig å bruke begge ordene, som vil si at i noen tilfeller i teksten har riktig valg av begrep vært uklart.

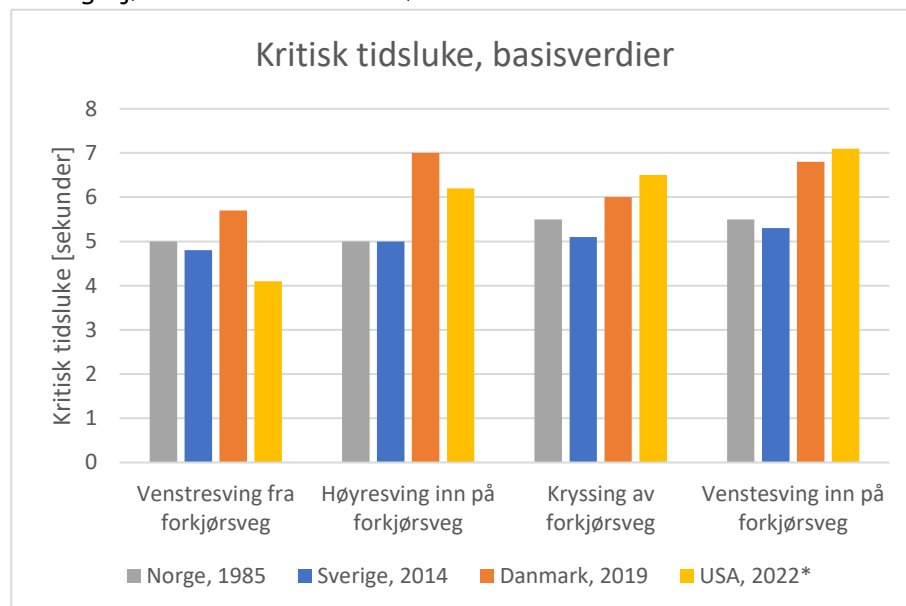
2.2.1 Mikroskopisk, makroskopisk og mesoskopiske modeller

Når en skal beskrive trafikk er det i hovedsak tre ulike tilnærminger som brukes. Det er mikroskopisk, makroskopisk og mesoskopisk modeller. En makroskopisk tilnærming baserer seg på trafikkstrømmer der man ser på oppførselen til en gjennomsnittlig sjåfør (Aakre, 2020b). I en mikroskopisk modell ser man på hvert individ og kjøretøy for seg selv. Dette er en tilnærming som egner seg for simuleringsmodeller som for eksempel AIMSUN. En kan også ha en mesoskopisk tilnærming, som er en mellomting mellom metodene som er nevnt over. Her ser man på grupper av kjøretøy.

2.2.2 Modeller baser på kritisk tidsluke

Kritisk tidsluke er definert som hvor stor den minste tidsluken må være i en overordnet strøm før man kan foreta en krysning. Dersom luken i strømmen ikke vurderes som stort nok, vil man vente på neste luke. Da gjøres det en vurdering om den er stor nok. Tidsluken er basert på hva den gjennomsnittlige sjåføren vil akseptere. Dersom tidsluken er stor nok, kan flere kjøretøy benytte den samme luken. Avstanden mellom de etterfølgende kjøretøyene kalles for følgetid (Aakre, 2020c).

Den kritiske tidsluken blir påvirket av blant annet geometrien i krysset, bevegelsen, kjøretøytype og helningen inn mot krysset (Tian et al., 2000). Det er også gjort flere undersøkelser på sammenhengen mellom kritisk tidsluke og følgetid. Den norske håndboken fra 1985 bruker en følgetid som er 60% av den kritiske tidsluken. Amerikanske tall fra slutten av 1990-tallet viser også denne sammenhengen (Tian et al., 2000). I dagens Highway capacity manual (HCM) varierer sammenhengen fra rundt 50-60%, avhenge av antall kjørefelt i den prioriterte strømmen. De har dermed gått over til en situasjonsbestemt sammenheng, ikke en sammenheng som er fast for alle svingebevegelser og kjørefelt som det var før.

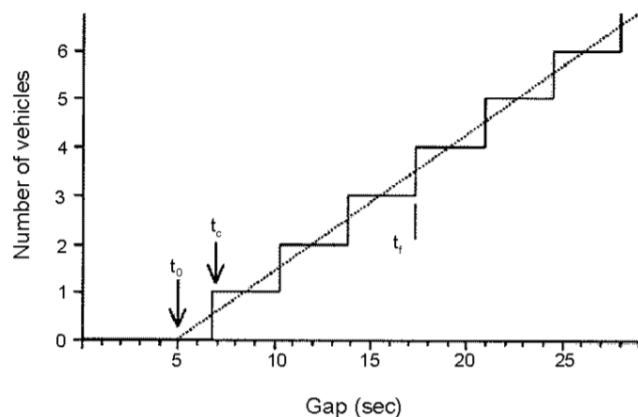


Figur 2.5 Basisverdier for kritisk tidsluker. (Trafikverket, 2014; Transportation Research Board, 2022; Vegdirektoratet, 1985; Vegdirektoratet, 2019)

Figuren over viser en sammenligning av kritiske tidsluker som benyttes i tidligere norsk håndbok, amerikansk, dansk og svensk håndbok. Tidsluken varierer mellom ca. 4-7 sekunder, avhenge av svingebevegelse og modell. Det er venstresving inn på forkjørsvveg som har størst kritisk tidsluke i de fleste modellene. Det er viktig å understreke at verdiene i figuren over er basisverdier. I alle modellene kan også den kritiske tidsluken endres basert på blant annet antall kjørefelt, fartsgrense, reguleringsform og type kjøretøy på veien.

I litteratursøket er det ikke funnet nyere verdier for kritisk tidsluke i Norge. Selv om man kan se på verdier i andre land, er ikke disse tilpasset til norske forhold. Kritisk tidsluke er basert på den gjennomsnittlige sjåføren, og den gjennomsnittlige sjåføren i Norge vil være annerledes enn den gjennomsnittlige sjåføren i for eksempel USA.

Kritisk tidsluke og følgetid kan videre brukes til å beregne kapasitet. Prinsippet er at kapasiteten er antall luker multiplisert med antall som utnytter lukene. Fordelingen og utnyttelsen av lukene kan beskrives på forskjellige måter(Aakre, 2020c). To kjente kritisk tidsluke-modeller er fra Siegloch og Harder. I modellen til Siegloch antas det at trafikkstrømmen inn i krysset fra sidevegen er kontinuerlig og lineær, mens fordelingen av tidsluken i hovedstrømmen følger en eksponentiell fordeling (Aakre, 2020c). I modellen til Harder antas det at antall kjøretøy som bruker en gitt tidsluke følger en trappefunksjon. Dette er illustrert i Figur 2.6. t_c i figuren er kritisk tidsluke, t_f er følgetid og t_0 er definert som kritisk tidsluke minus halve følgetiden.



Figur 2.6 Antall kjøretøy som bruker en tidsluke i hovedstrømmen(R. J. Troutbeck & Brilon, u.å.)

Formlene under viser kapasiteten i strømmen med vikeplikt ovenfor den prioriterte strømmen v_c med Siegloch's og Harder's formel. Både den norske metode F og HCM er basert på Harders formel.

Formel 2-1 Kapasitet med Siegloch's formel

$$c_p = \frac{1}{t_f} * e^{-v_c * t_0} \quad t_0 = t_c - \frac{t_f}{2}$$

c_p = Potensiell kapasitet [kjt/t]

t_f = Følgetid [s]

t_c = Kritisk tidsluke [s]

v_c = Overordnet trafikkmengde [kjt/t]

Formel 2-2 Kapasitet med Harder's formel

$$c_p = v_c * \frac{e^{-v_c * t_c}}{1 - e^{-v_c * t_f}}$$

Bruken av kritisk tidsluketeori har også blitt kritisert, blant annet av Brilon og Wu. I en artikkel fra 2001 peker de på flere utfordringer med de tradisjonelle tidsluketeoriene (Brilon & Wu, 2001). Noen av de største svakhetene ved å bruke kritisk tidsluke til estimering av kapasitet mener de at er:

- Det er vanskelig å bestemme riktig verdi for kritisk tidsluke. Dette blir en kilde til usikkerhet i beregningene.
- Metodene er basert på forenklinger, selv om de ser eksakte ut siden de er matematisk fremstilt. Noen strømmer blir telt med flere ganger når man gjør beregningene. Uten å miste mye nøyaktighet kunne metoden vært forenklet betraktelig.
- Kritisk tidsluke-teorien tar ikke hensyn til trafikanter som ikke overholder trafikkreglene. De tar heller ikke hensyn til at trafikanter vil trenge seg inn i mindre luker og omvendt vikeplikt som kan oppstå i situasjoner med mye kø.
- Det er vanskelig å tilpasse til gående og syklende siden reglene for vikeplikt mellom trafikanter og denne gruppen vil variere. Dette fører til varierende grad av overholdelse av vikeplikten. I praksis er det få steder med 100% overholdelse av regelverket.

Med bakgrunn i utfordringene til tidsluketeorien har de utviklet en tredje metode for å vurdere fremkommeligheten i kryss. De to andre tradisjonelle metodene har vært empiriske regresjonsmodeller og bruk av kritisk tidsluke-teori. Den nye metoden er basert på å legge sammen strømmer som er i konflikt, eller konfliktteknikk («Additative conflicting flows»). Men denne metoden består av mange likninger. Dette vil gjøre det vanskelig å implementere som en manuell beregning i for eksempel en håndbok. Forfatterne nevner selv dette i konklusjonen, der de sier at i praksis må disse utregningene gjøres med en datamaskin.

2.2.3 Modeller basert på regresjon

I tillegg til analytiske modeller som kritisk tidsluke-teori kan også trafikk beskrives med regresjonsmodeller. Regresjonsmodeller er basert på statistiske sammenhenger mellom geometrisk utforming, målt kapasitet og forsinkelse (Transportation Research Board, 2022). Fordelen med dette er at modellen kan ta hensyn til faktorer som ikke kan beskrives med tradisjonell kritisk tidsluke-teori. Dette kan brukes i de tilfellene der det er vanskelig å beskrive trafikantatferden. Ulempen er at det må samles inn mye data for å utvikle modellen.

En annen svakhet er at slike modeller passer best til eksempler som ligger innenfor de eksemplene som har blitt brukt til å kalibrere modellen. Dersom eksempelet ligger i utkanten av det datasettet som har blitt brukt, vil det være større usikkerheter i resultatene (Yap et al., 2013). De kan også være vanskeligere å bruke i andre land, siden det kan være forskjell i utforming og trafikantoppførsel som ikke tas hensyn til i regresjonsmodellen

2.2.4 Modeller basert på køteori

Trafikkmønsteret kan være ulikt ved ulike belastningsgrader. Med belastningsgrad menes forholdet mellom trafikkmengde og kapasitet. I ulike modeller brukes ulik notasjon, men i denne oppgaven vil x bli brukt som symbol for belastningsgrad. Ved lave belastningsgrader antas det ofte at sidevegen er et M/M/1 køsystem. I et slikt system ankommer kjøretøyene tilfeldig med en poisson-fordeling (Aakre, 2020a). Tid mellom overordnede kjøretøy antas å følge en eksponentialfordeling. 1- tallet betyr at det er en parallell betjening, altså at ett kjøretøy kan kjøre ut i krysset av gangen. Kølengden i et M/M/1 køsystem kan utledes ved enkle matematiske sammenhenger. Når trafikken nærmer seg belastningsgraden, vil kølengden gå mot uendelig siden nevneren i brøken går mot null. Kølengden i et slikt system er gitt med Formel 2-3.

Formel 2-3 Kølengde i et M/M/1 system

$$Q = \frac{x^2}{1 - x}$$

$Q =$ Kølengde (queue length) [kjt]

$x =$ Belastningsgrad []

Ved overbelastning er en vanlig antakelse et D/D/1 køsystem. D står for deterministisk avgang og ankomst. Det vil si at det antas å være en fast tidsavstand mellom både ankomst og avgang. Kølengden i et slikt system kan beskrives som en sammenheng mellom belastningsgrad (x), kapasitet (c) og studieperiodens tidslengde (T), og er gitt med formelen under. Det legges til 1 siden det alltid vil være kjøretøy i kø (Hagring, 2001a).

Formel 2-4 Kølengde i et D/D/1 system

$$Q = (x - 1)c_m * T + 1$$

$c_m =$ Kapasitet for svingebevegelsen [kjt/t]

$T =$ Beregningsperiodens lengde [t]

En kjent køteori er Little's lov, som sier noe om sammenhengen mellom antall enheter i systemet, gjennomsnittlig ventetid og ankomstraten (Little, 1961). Påstanden til Little var at i et stabilt køsystem gjelder følgende sammenheng:

Formel 2-5 Little's lov

$$L = \lambda * W, \text{ der}$$

$L = \text{Forventet antall enheter i systemet}$

$W = \text{Forventet tid brukt av en enhet i systemet}$

$$\frac{1}{\lambda} = \text{Forventet tid mellom to påfølgende ankomster i systemet}$$

Dette kan være en sammenheng som er nyttig når man mangler verdier for enten kølengde eller gjennomsnittlig forsinkelse.

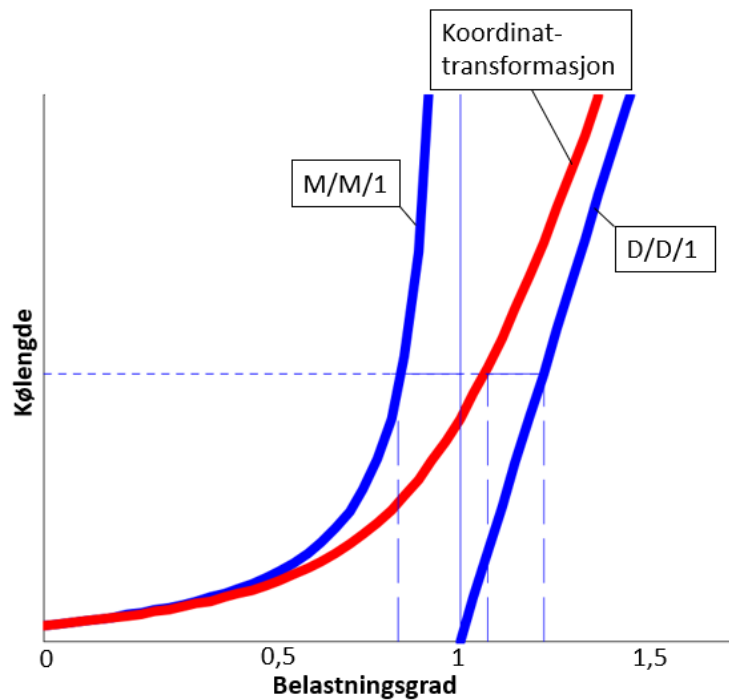
2.2.5 Tidsavhenge køteori

Å anta at trafikkstrømmer er stasjonære vil ofte være en forenkling. En av de enkleste måtene en kan ta hensyn til dette er å justere trafikkmengden med en «peak hour factor». En slik spisstimefaktor brukes der den maksimale belastningen ikke er konstant over en time. Dette kan spesielt være på mindre veger som er i nærheten av virksomheter med fast møtetid, som for eksempel arbeidsplasser (Vejdirektoratet, 2019). Når variasjonen innad i makstimen er stor vil spisstimefaktoren være mindre. Verdien til spisstimefaktoren ligger alltid et sted mellom null og en.

Når trafikkmengden i et kryss nærmer seg overbelastning, kan både tidsluker og ankomster variere med tiden (Hagring, 2001a). Det er derfor behov for andre metoder for å beskrive kølengde og forsinkelse. Når trafikkmengden nærmer seg en belastningsgrad på 1 kan det argumenteres for at kølengden vil være en mellomting mellom et M/M/1 køsystem og et D/D/1 køsystem. Beregninger kan gjøres med en metode som kalles koordinattransformasjonsmetoden, som er beskrevet av blant annet Kimber og Hollis i «Traffic queues and delays at road junctions» fra 1979 . Den nye kurven skal gå mot M/M/1-kurven når belastningsgraden går mot null, og mot D/D/1-kurven når belastningsgraden går mot uendelig. Mellom dette skal avstanden til de to kurvene være like. Ved å sette kølengden i likning 2-3 lik den i 2-4 gir det et nytt uttrykk for kølengde. Resultatet er vist i Formel 2-6 og er illustrert i Figur 2.7.

Formel 2-6 Kølengde med koordinattransformasjonsmetoden

$$Q = 0,5(-c_m * T(1 - x) + \sqrt{c_m^2 * T^2(1 - x)^2 + 4(c_m * x * T + 1) })$$



Figur 2.7 Illustrasjon av koordinattransformasjonsmetoden (Hagring, 2001a)

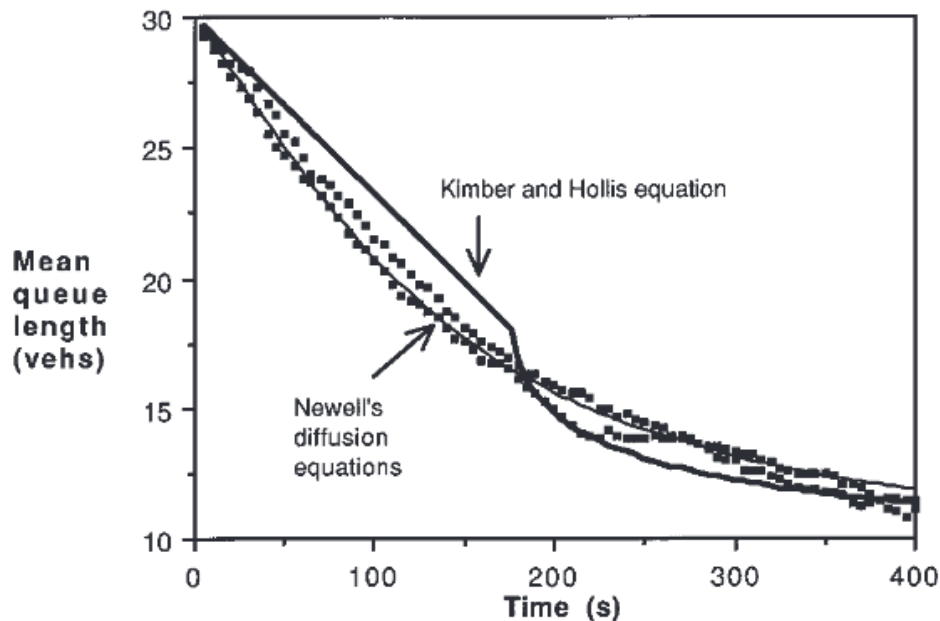
Denne formelen for kølengde blir brukt i den svenske kapasitetshåndboken som skal beskrives senere i oppgaven. Koordinattransformasjonsmetoden kan også brukes for å beregne gjennomsnittlig ventetid, og dette er vist med formelen under.

Formel 2-7 Gjennomsnittlig ventetid med koordinattransformasjonsmetoden

$$w = \frac{1}{4c_m} (- (2 + c_m T - x c T) + \sqrt{(2 + c_m * T - x * c_m * T)^2 + 8 * c_m * x * T})$$

w = Gjennomsnittlig ventetid (waiting time) [s]

Metoden har fått noe kritikk. Den først kritikken gikk på at det ikke var bevist at trafikken oppførte seg som beskrevet i koordinattransformasjonsmetoden (Hurdle, 1984). Løsningen til Hurdle var å innføre konstanter til denne sammenhengen. Metoden har også blitt kritisert for å være diskontinuerlig. Dette ble diskutert av Troutbeck & Blogg i en artikkel fra 1998 . De konkluderer med at diffusjonsligningen utviklet av Newell er bedre egnet til å beskrive kø når trafikkmengden er nær kapasiteten. Metoden er basert på et bedre fysisk grunnlag (Hagring, 2001a).



Figur 2.8 Gjennomsnittlig kølengde for $x=0,9$ og en startkø på 30 biler (R. Troutbeck & Blogg, 1998)

Figur 2.8 viser en sammenligning av Newell's metode og Kimber & Hollis. Her kan man se at linja i koordinattransformasjonsmetoden har et knekkpunkt der den ikke er kontinuerlig. Ulempen med metoden til Newell er at den er ulik for ulike verdier av ρ , og beregningsmessig er mer komplisert enn koordinattransformasjonsmetoden. I en manuell beregningsmetode kan det derfor være utfordrende å bruke Newell's metode.

2.2.6 Kjøretøyskategorier

En kapasitetsmodell må kunne skille mellom ulike kjøretøyskategorier, siden det vil ha en påvirkning på kapasiteten. Tunge kjøretøy er lengre og akselererer tregere enn lette kjøretøy, og vil dermed føre til lavere kapasitet gjennom et kryss. Det finnes flere måter å ta hensyn til ulike kjøretøyskategorier i kapasitetsmodeller. I en gjennomgang gjort av Hagring fra 2001, pekes det på tre aktuelle måter å gjøre dette på i den svenske kapasitetsmodellen (Hagring, 2001b). Den første metoden er å vekte kritisk tidsluke etter kjøretøyskategori. Tunge kjøretøy trenger en lengre kritisk tidsluke for å kjøre ut i krysset, som igjen vil gjøre at kapasiteten blir redusert. Denne metoden benyttes i flere av de internasjonale kapasitetsmodellene, se videre sammenligning i avsnitt 4.6.1.

Den andre metoden er kapasitetskorreksjon. Det vil si at man først beregner kapasiteten uten å ta hensyn til tunge kjøretøy. Deretter korrigeres kapasiteten med en personbilkvivalent. Dette ble blant annet brukt i eldre versjoner av SIDRA (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020). En personbilkvivalent blir i HCM definert som «*Antall personbiler som vil resultere i de samme operasjonelle forhold som et enkelt tungt kjøretøy av en bestemt type gitt identisk vei, trafikk og reguleringsforhold*» (Transportation Research Board, 2022).

Hagring nevner også en tredje metode som er utviklet av Carolne S. Fisk i 1990. Denne metoden ble blant annet utviklet på bakgrunn av at Fisk mente det var noen svakheter ved å bruke kjøretøyskategorier (Fisk, 1990). Den foreslåtte løsningen er å beregne kapasitet separat for de ulike kjøretøyskategoriene. Dette gjøres ved at de ulike kjøretøyskategoriene har ulik kritisk tidsluke, og dermed ulik kapasitet (Hagring, 2001b).

Deretter kan den samlede kapasiteten beregnes ved å vekte kapasiteten til de ulike kjøretøyskategoriene.

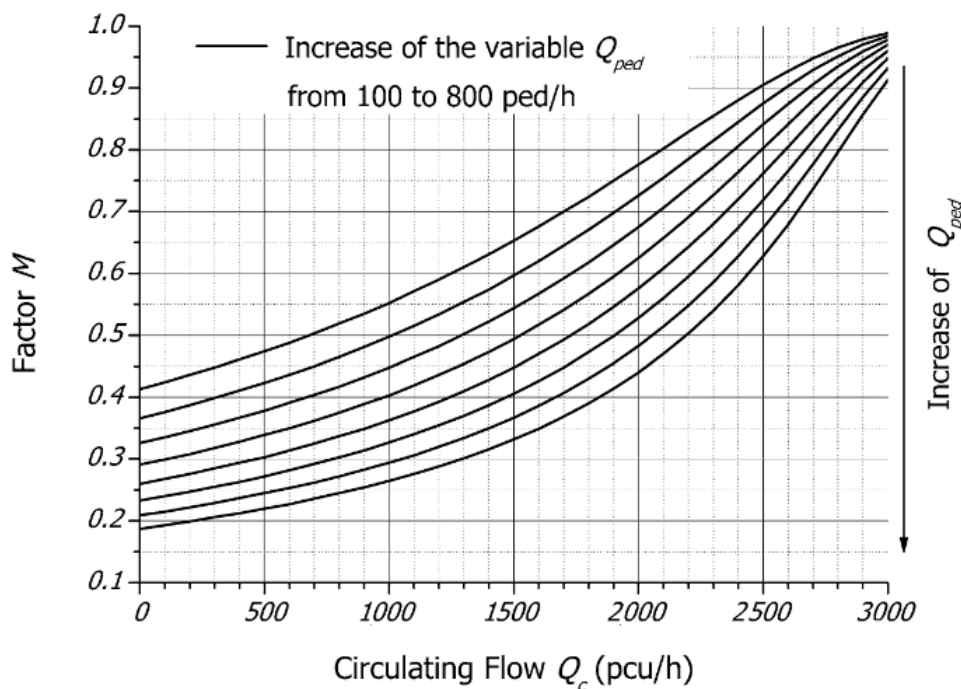
2.2.7 Fotgjengere og syklisters påvirkning på kapasiteten

Det er ofte etablert overgangssteder for syklister og gående i tilknytning til kryss og rundkjøringer. I Norge har kjøretøy vikeplikt for gående i gangfelt, og dermed kan fotgjengere og syklister få innvirkning på kapasiteten i krysset. Dette gjelder også i utfarten, siden kjøretøy som må vike for fotgjengere kan føre til tilbakeblokkering i krysset. Kapasitetsmodellene som er beskrevet i de neste kapitlene, tar hensyn til dette i ulik grad. Det ble derfor gjennomført et spesifikt litteratursøk på denne problemstillingen. I avsnittene under skal det presenteres noen ulike måter fotgjengere og syklister kan inkluderes i en kapasitetsmodell.

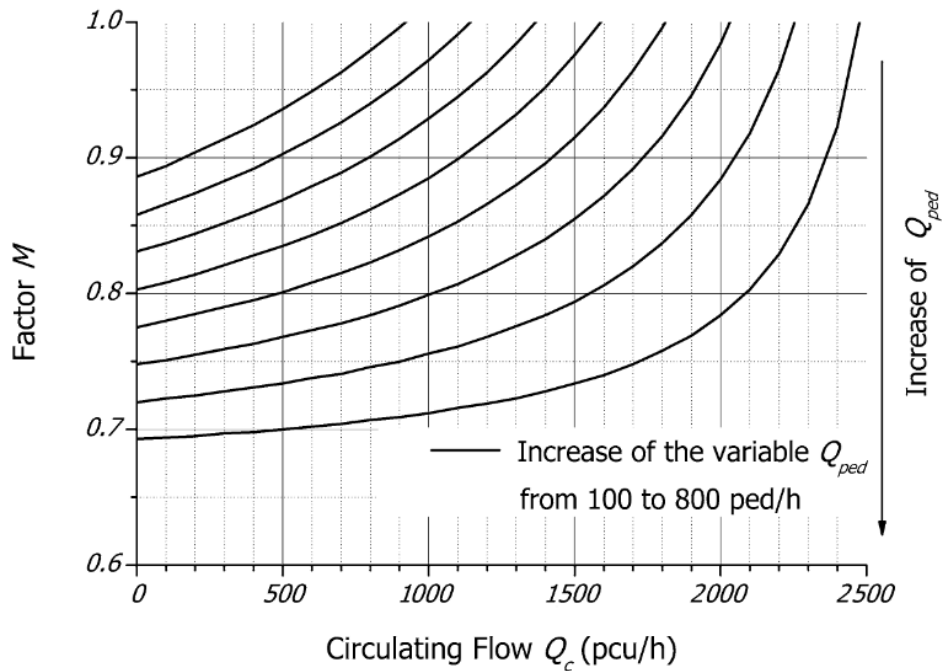
Kapasitetskorreksjon: Med kapasitetskorreksjon menes at man først beregner kapasiteten uten å ta hensyn til gående og syklende. Deretter korrigeres kapasiteten med en faktor. I litteratursøket ble det funnet to ulike metoder for å bestemme korreksjonsfaktoren. Den første metoden er utviklet av Marlow og Maycock (Marlow & Maycock, 1982). I denne metoden beregnes en korreksjonsfaktor som er basert på opplysninger om krysset og fotgjengere.

I Tyskland er det utviklet en annen metode av Brilon, Stewe og Drews. Denne metoden er basert på data samlet inn gjennom feltobservasjoner i Tyskland. Resultatene her viser at metoden til Marlow og Maycock overestimerer hvor stor innvirkning fotgjengere har på kapasiteten i rundkjøringer (Brilon et al., 1993).

Figurene under viser korreksjonsfaktoren med de to metodene for en rundkjøring med to sirkulerende kjørefelt. I figuren for metoden til Marlow og Maycock er kapasiteten bestemt med formel fra TRRL (Kimber, 1980).



Figur 2.9 Korreksjonsfaktor med metoden til Marlow og Maycock (Mauro, 2010)



Figur 2.10 Korreksjonsfaktor med metoden til Brilon, Stewe og Drewe (Mauro, 2010)

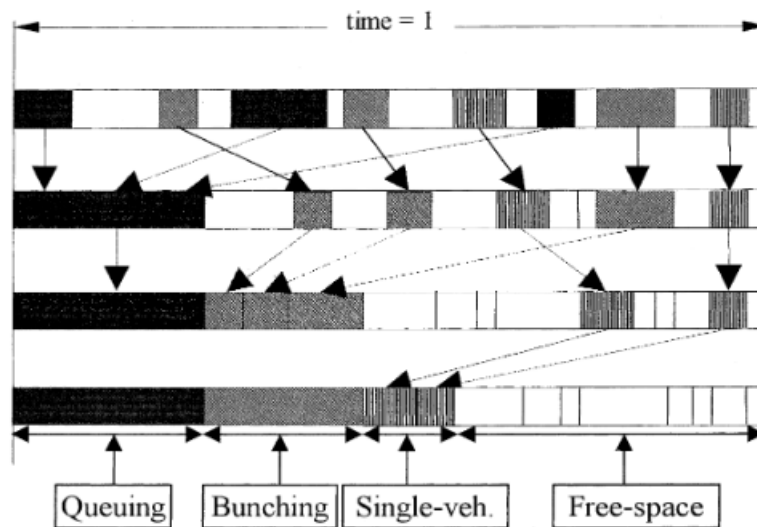
Som figurene viser anslås det i metoden til Marlow og Maycock at kapasiteten i større grad blir påvirket av fotgjengere enn i metoden til Brilon, Stewe og Drewe.

Det er funnet en studie som er gjort på fotgjengere i to veis stop-kontrollerte kryss i USA. Målet med denne studien var å se på hvordan fotgjengere påvirket kapasiteten og forsinkelsen til de som kjører rett frem på forkjørsvveg (Yang et al., 2015).

Sammenligningen av resultater fra den kalibrerte modellen mot feltobservasjoner har gitt gode resultater. Fotgjengere som krysser sidevegen er ikke inkludert i denne studien. Modellen ser også bare på forsinkelsen til de kjøretøyene som stopper opp for fotgjengere, ikke de som blir forsinket grunnet andre biler som stopper opp for fotgjengere. Forfatterne anbefaler derfor at det skal arbeides videre med denne modellen før den eventuelt kan implementeres i HCM.

Kjøretøysekvivalenter: En annen måte å ta hensyn til fotgjengere på er å se på en kryssende fotgjenger som et kjøretøy man må vike for. Dette gjøres ved at fotgjengerne legges til i den overordnede trafikkstrømmen. En kjøretøyekvivalent er at man konverterer en trafikkstrøm som består av ulike typer trafikanter eller kjøretøy, til en ekvivalent strøm med bare personbiler (Shalini & Kumar, 2014). For å justere for at kritisk tidsluke er ulik for fotgjengere og vanlig biler, kan man bruke kjøretøyekvivalent til å beskrive fotgjengere som krysser en tilfart i et kryss. I den svenske kapasitetsmodellen brukes faktoren 0,5 som kjøretøysekvivalent, mens i HCM brukes faktor 1,0.

Alternativ metode: En nyere og universell metode for å beregne kapasitet i kryss uten trafikksignal er utviklet av Ning Wu. Tanken er at hovedstrømmen kan være i fire ulike tilstander (Wu, 2001). Den første tilstanden er kø, den andre er puljedannelse/bunching, den tredje er «single vehicle» og den fjerde er «free space». Man sorterer og summerer opp tiden i de ulike tilstandene, som vist på figuren under.



Figur 2.11 Sortering av de fire ulike tilstandene i hovedstrømmen (Wu, 2001)

Andelen og sannsynlighetene for de ulike tilstandene beregnes ved køteori (Silvano et al., 2019). Metoden kan tilpasses til utkjøring i rundkjøringen i to steg, altså først vike for fotgjengere og så vike for sirkulerende kjøretøy. På denne måten kan metoden tilpasses til rundkjøringer og kryss som har kryssende fotgjengere. Brilon og Wu presenterer denne metoden videre i en annen artikkel. I konklusjonen her never de at metoden består av mange likninger, som gjør at i praksis må utregninger gjøres på datamaskin (Brilon & Wu, 2001). Det vil si at metoden ikke vil egne seg til manuelle beregninger i for eksempel en håndbok.

3 Metode i masteroppgaven

3.1 Litteraturstudie

Det første som ble gjort i forbindelse med prosjektet var å søke etter relevant litteratur. Deler av dette ble gjort i en prosjektoppgave høsten 2021. Det ble i hovedsak gjennomført søk i Google Scholar og Oria. I tillegg ble også statens vegvesen sine sider, og tilsvarende nettsteder fra USA, Danmark og Sverige brukt. Hvilke deler av teorkapittelet som er hentet fra prosjektoppgaven kommer frem i begynnelsen av kapittelet.

Målet med litteraturstudiet var å innhente relevant teoretisk bakgrunn for å kunne forstå oppbygningen av ulike kapasitetsmodeller. Annen relevant forskning som er gjort innenfor området ble også samlet for å kunne vurdere «state of the art».

Arbeidet med litteraturstudiet ble så gjenopptatt i masteroppgaven. Hensikten i denne delen var å tette hull i den litteraturen som ble funnet i prosjektoppgaven. Det ble også gjort ekstra søk på de områdene der de ulike kapasitetsmodellene hadde fravikende metoder.

3.2 Sammenligning av dagens modeller

En viktig del av arbeidet med å utvikle en ny norsk kapasitetsmodell har vært å sammenligne andre kapasitetsmodeller. Før arbeidet på den nye modellen startet ble det derfor gjort en grundig sammenligning av dagens modeller.

3.2.1 Gjennomgang av modeller

Først skulle den norske modellen sammenlignes mot andre kapasitetsmodeller. De andre kapasitetsmodellene som den sammenlignes mot er den amerikanske «Highway capacity model», den danske «Kapacitet og serviceniveau» og den svenske «Kapacitet og fremkommelighetseffekter». Disse modellene er valgt ut etter diskusjon med veileder. Det er også valgt å trekke inn beregningsprogrammet SIDRA intersection i sammenligningen. Valg av hvilke modeller som skulle sammenlignes vil påvirke resultatet av denne oppgaven. Dette er fordi modellene skal brukes som inspirasjon til modellen som skal utvikles. HCM er en internasjonal anerkjent modell, og var derfor nyttig å inkludere i sammenligningen. Den svenske og danske modellen ble inkludert siden utforming av kryss og trafikantoppførsel har flere likhetstrekk med norske forhold. Den grundige gjennomgangen av modellene har vært tidkrevende arbeid. Dersom flere andre kapasitetsmodeller skulle vært en del av sammenligningen, ville det enten gått på bekostning av nøyaktighet av sammenligningen eller tiden til å utvikle den nye norske modellen.

Modellene ble gjennomgått på både et overordnet nivå, og på et detaljnivå. Noe av dette arbeidet ble gjort i prosjektoppgaven, men store deler av den grundige sammenligningen har blitt gjort i masteroppgaven. En viktig, men tidkrevende del av arbeidet har vært å finne bakgrunnen for modellene som er valgt i de ulike kapasitetsmodellene. I spesielt den svenske og danske er det manglende forklaring på hvilken teori som ligger til grunn for de ulike beregningne. Det har til tider vært utfordrende å finne en forklaring. Teorien

ble forsøkt funnet ved å se om lignende metoder i de andre kapasitetsmodellene nevnte hvor teorien kom fra, eller ved å søke etter relevant litteratur til hvert tema. En svakhet ved denne metoden er at noe relevant teori kan bli oversett. Studering av kapasitetsmodellene gir heller ikke bakgrunnen og vurderingene bak valg av metoder. Det har derfor vært viktig å bruke annen litteratur for å få en bredere forståelse av temaet.

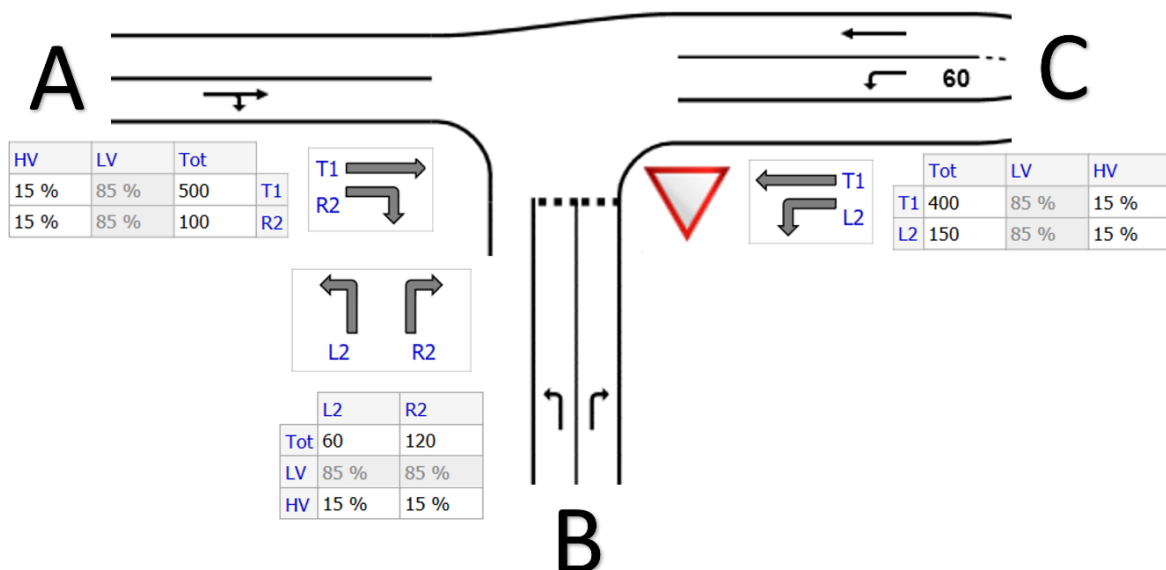
3.2.2 Beregning av eksempler

For å bli bedre kjent med de ulike kapasitetsmodellene ble det beregnet tre eksempler, hvorav to var forkjøringsregulerte T-kryss og et var en rundkjøring. Eksempelene er beregnet ved å følge beskrivelsen og metodikken i de ulike modellene. Der ikke spesielle opplysninger er gitt av eksempelet er standardverdier brukt. Dette gjelder også i SIDRA. Resultatene fra alle eksemplene som beregnes i denne oppgaven er i tillegg til å bli presentert i teksten lagt ved som elektroniske vedlegg.

Eksempel 1: I det første eksempelet ble et standard T-kryss valgt. Eksempelet er inspirert av eksempel 1 i den gamle norske kapasitetshåndboken. Som figuren under viser, har de fleste trafikkmengdene egne kjørefelt. Eksempelet ble i hovedsak valgt for å teste ut de ulike modellene i et standard kryss med relativt lav trafikkbetlastning. Listen og figuren under gir viktige opplysninger om krysset.

Opplysninger om krysset i eksempel 1:

- Trafikkmengde makstime ettermiddag, enhet [kjt/t]
- 15% tunge kjøretøy i alle tilfarter
- Fartsgrense 50 km/t i alle tilfarter
- 2% stigning i tilfart B, 0% stigning i tilfart A og C
- Separat venstresvingefelt i tilfart C, også eget høyre og venstresvingefelt i tilfart B

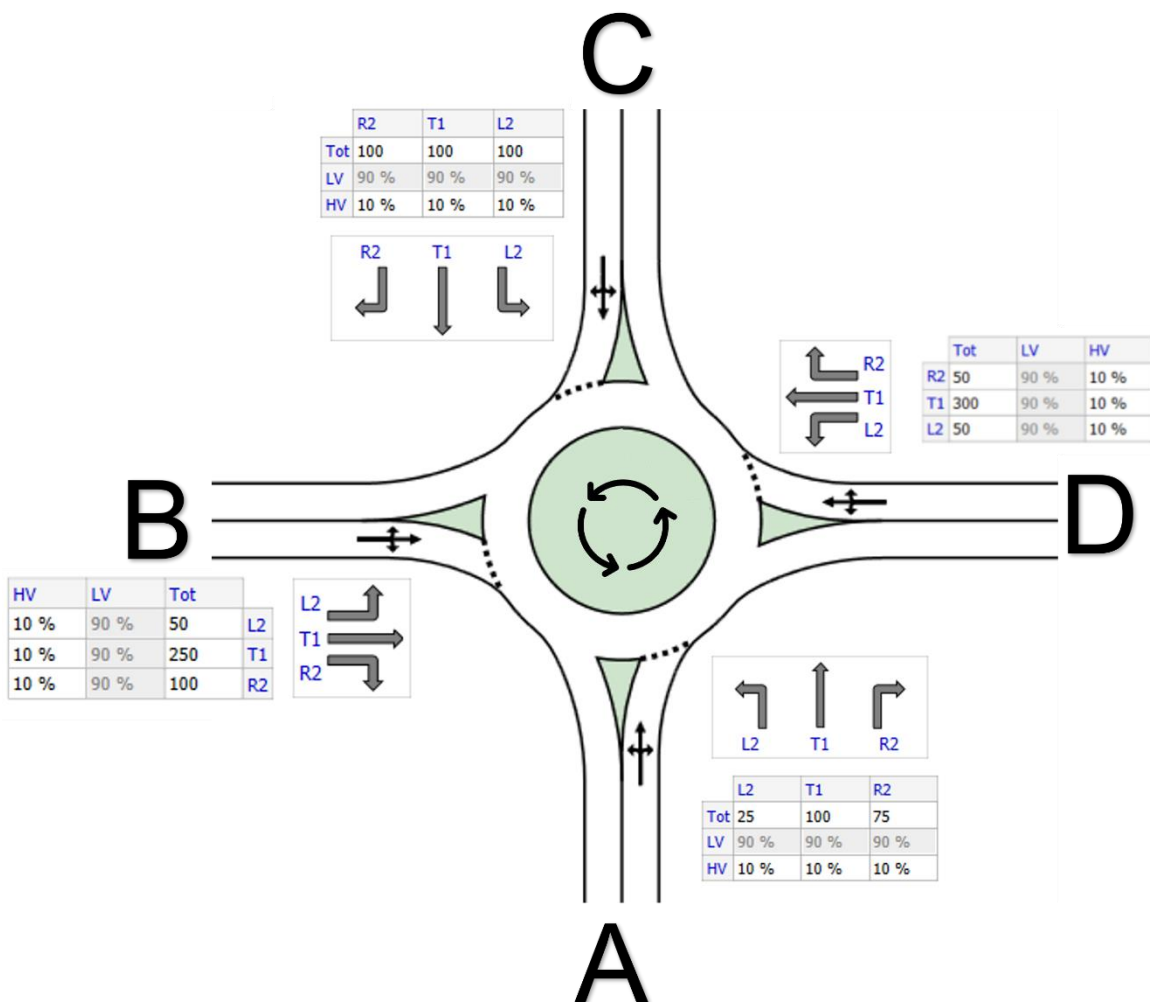


Figur 3.1 Utforming og trafikkmengder i eksempel 1

Eksempel 2: Eksempelen er hentet fra den svenske kapasitetsboken, og det er en rundkjøring med 4 armer og ett sirkulerende kjørefelt. Det er også et kjørefelt i hver tilfart. Trafikkmengde og utforming av rundkjøringen er vist i figuren under. Den norske modellen for rundkjøringer er ikke med i sammenligningen siden metoden er utdatert, som er videre beskrevet i avsnitt 4.1.2.

Opplysninger om krysset i eksempel 2:

- Trafikkmengde maksimum ettermiddag, enhet [kjt/t]
- 10% tunge kjøretøy i alle tilfarter
- Fartsgrense 50 km/t i alle tilfarter
- Ett sirkulerende kjørefelt
- Ett kjørefelt i alle tilfarter

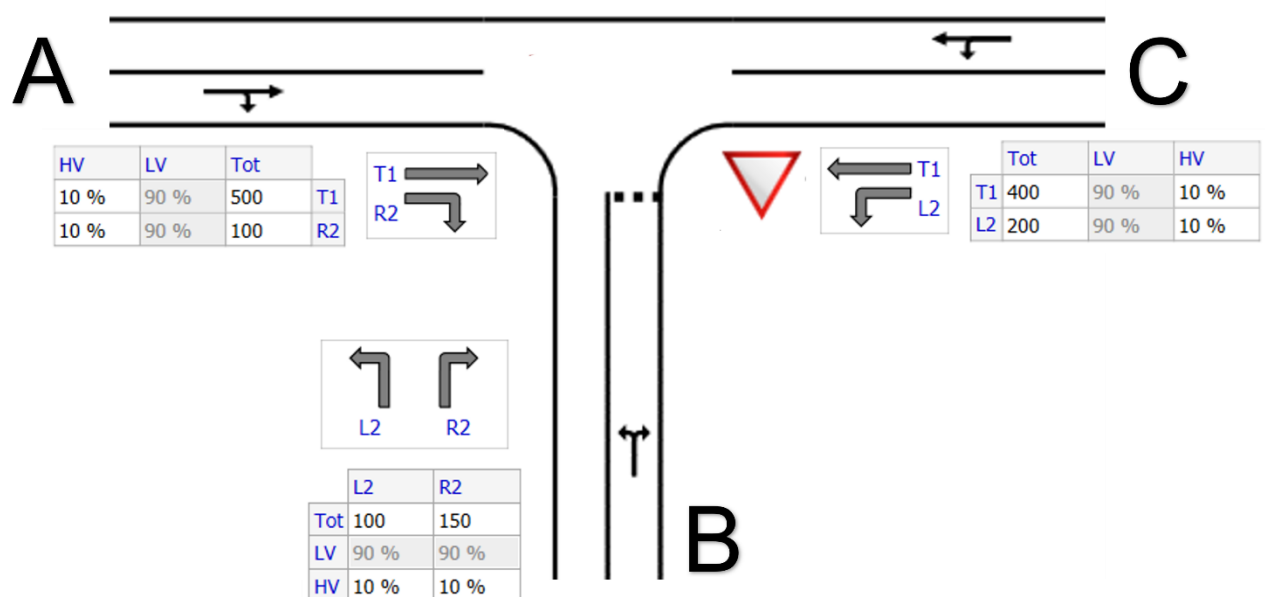


Figur 3.2 Utforming og trafikkmengder i eksempel 2

Eksempel 3: I det siste eksempelet er krysset fra det første eksempelet endret noe for å øke belastningsgraden. Dette er for å se hvordan de ulike beregningsmodellene oppfører seg når de nærmer seg overbelastning, og i noen av tilfellene er overbelastet. Listen og figuren under gir relevante opplysninger om krysset.

Opplysninger om krysset i eksempel 3:

- Trafikkmengde makstime ettermiddag, enhet [kjt/t]
- 10% tunge kjøretøy i alle tilfarter
- Fartsgrense 50 km/t i alle tilfarter
- 0% stigning i alle tilfarter
- Ett kjørefelt i alle tilfarter



Figur 3.3 Utforming og trafikkmengder eksempel 3

En svakhet ved metoden som er valgt er at det kun er sett på tre eksempelkryss. Dette er gjort på grunn av tidsbegrensning. Dersom enda flere eksempler hadde blitt beregnet kunne det vært inkludert høyere trafikkbelastning og større variasjon av utforming. Eksemplene er heller ikke sammenlignet med resultater fra feltobservasjoner.

På den andre siden, er dette kun en del av den totale sammenligningen som har blitt gjort. Sammen med den grundige gjennomgangen og teoretiske sammenligningen gir beregning av eksemplene et grunnlag for å begynne arbeidet med utviklingen av en ny kapasitetsmodell.

3.3 Utvikling av grunnmodell

Det neste steget i metoden var å utvikle en grunnmodell. Modellen skulle kun inneholde de viktigste hovedelementene, som var å kunne si noe om kapasitet, forsinkelse og kølengde i et gitt kryss. Målet var ikke å utvikle en fullstendig modell, men å kunne ha noe å jobbe videre med. Grunnmodellen ble basert på sammenligning av den norske modellen mot metodene i de andre kapasitetsmodellene.

Grunnmodellen ble også testet mot de samme eksemplene som de andre kapasitetsmodellene. Det var ikke et mål om at resultatene skulle være helt like, siden grunnmodellen har flere mangler og forenklinger. Likevel var det nyttig å teste for å se at resultatene ikke lå for langt unna. Det ble ikke definert en grense på hva som ville si at resultatene var for langt unna, dette var en helhetsvurdering som ble gjort. Dersom det var store forskjeller i resultatene, ble det forsøkt å finne mulige forklaringer på dette.

En utfordring med å bruke de andre kapasitetsmodellene som inspirasjon til grunnmodellen, er at kapasitetsmodellene er sammensatt og oppbygd på forskjellige måter. Det vi si at man ikke nødvendigvis kan hente en del fra en modell, og sette det sammen med en annen modell. Dette er fordi man kan risikere å ta hensyn til en faktor to ganger, eller ikke inkludere et viktig element. En annen utfordring er at de samme begrepene kan ha ulik betydning i ulike modeller. Før en sammenligner er det derfor viktig å sette seg inn i hva som menes med de ulike begrepene i de ulike modellene. Disse problemstillingene var viktig å tenke over når grunnmodellen ble utviklet.

3.4 Videreutvikling av modell

Videreutviklingen av modellen er gjort basert på mangler i grunnmodellen og andre utfordringer som er funnet. Et og et tema ble tatt for seg av gangen. Til slutt ble denne modellen testet på eksempelkryssene som også grunnmodellen ble testet mot. I denne fasen måtte det gjøres noen justeringer på eksemplene for å inkludere kryssende fotgjengere. Siden fotgjengere i ulik grad ble inkludert i kapasitetsmodellene ble det nødvendig å se bort fra resultatene fra noen av kapasitetsmodellene. Vurdering av resultatet fra den videreutviklede modellen ble derfor gjort annerledes enn for grunnmodellen.

For å utvikle en fullstendig kapasitetsmodell trengs både mer tid og erfaring enn det som er i dette prosjektet. Det ble i denne fasen derfor viktig å prioritere hva som skulle arbeides videre med. Noen utfordringer måtte bortprioriteres, og andre måtte løses på en forenklet måte. Det var også viktig å legge opp til at det skal være mulig å arbeide videre med modellen.

Utfordringene i denne fasen ble forsøkt løst ved å se på sammenligningene som hadde blitt gjort tidligere, og ved å søke videre etter annen relevant litteratur. Det ble også gjort beregninger for å se hvordan ulike løsninger kunne påvirke resultatet.

4 Beskrivelse og sammenligning av dagens modeller

I dette kapittelet skal kapasitetsmodellen fra Norge, Sverige, Danmark, USA og SIDRA Intersection gjennomgås. Først blir modellene og beregningsgangen beskrevet kort. Videre sammenlignes modellene på et mer detaljert nivå. Til slutt skal det beregnes tre eksempler med de ulike modellene.

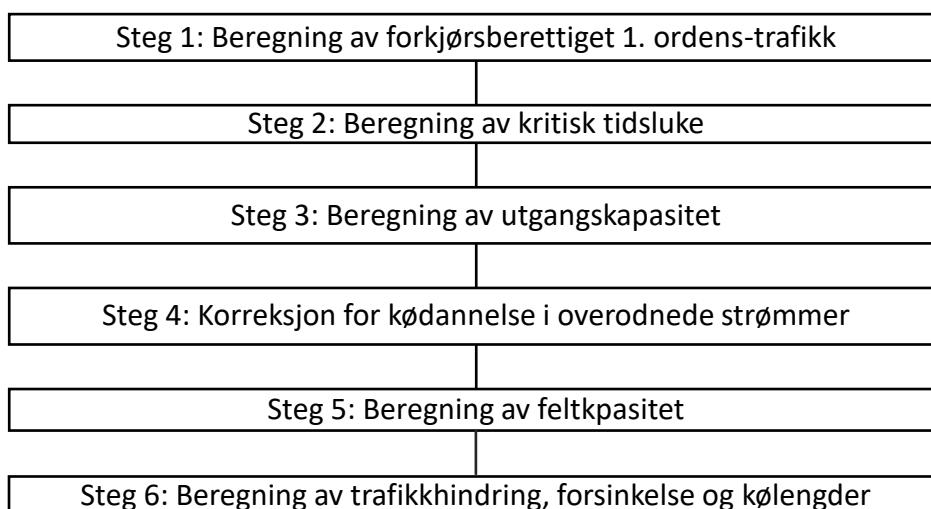
Kapittel 4.1-4.4 er hentet fra prosjektoppgaven, og kapittel 4.5 er delvis hentet derifra. Resten av arbeidet i dette kapittelet er gjort i masteroppgaven.

4.1 Håndbok 127- Kapasitet i kryss (Norge)

Håndbok 127 er den norske kapasitetshåndboken som ble utgitt i 1985 av vegdirektoratet (Vegdirektoratet, 1985). Håndboken ligger ikke lengre ute som en håndbok på Statens Vegvesen sine nettsider, og er derfor lite brukt i dag. Håndboken består av tre metoder. Metode F; kapasitetsberegninger i forkjørsregulerte kryss, metode R; Kapasitetsberegninger i rundkjøringer og metode U; kapasitetsberegninger i uregulerte kryss.

4.1.1 Metode F, forkjørsregulerte kryss

Metoden er basert på tidligere modeller fra andre land. Blant annet er håndbøkene fra Danmark og Tyskland nevnt som inspirasjonskilder. Beregningen er delt opp i to hoveddeler. De første beregningene gjøres for hver enkelt kjørebegevelse, mens de siste beregningene gjøres for hele kjørefeltet samlet. Hovedtrekkene i beregningsgangen er vist i figuren nedenfor.



Figur 4.1 Beregningsgang metode F

Det er flere utfordringer med denne metoden som gjør at den ikke brukes i dag. For det første sier den ikke noe om myke trafikanter. I noen tilfeller vil dette ha stor innvirkning på kapasiteten. En annen utfordring er at forsinkelsen beregnes med kapasitetsreserven, som er forskjellen mellom dimensjonerende trafikkmengde og kapasitet. Forsinkelsen er omvendt proporsjonal med kapasitetsreserven. Dette uttrykket kommer fra M/M/1 køteori som er beskrevet i avsnitt 2.2.4. En utfordring med dette uttrykket er at når kapasitetsreserven går mot null, vil forsinkelsen gå mot uendelig. Dersom kapasitetsreserven er mindre enn 10 kjt/t vil forsinkelsen være fra 6 minutter og oppover. En kapasitetsreserve på mindre enn dette kan gi urealistiske resultater.

4.1.2 Metode R, rundkjøringer

Metoden er basert på en tidligere engelsk metode for beregning av kapasitet i rundkjøringer. I denne metoden har den geometriske utformingen av rundkjøringen mye å si for kapasiteten. Dette gjelder spesielt innkjøringsbredden og lengden på breddeutvidelsen. Strømmene i tilfarten er ikke inndelt i kjørefelt, og det er heller ikke den sirkulerende trafikkstrømmen. Antall kjørefelt inngår ikke som en del av kapasitetsberegningen.

Måten man bygger rundkjøringer på i Norge i dag er annerledes enn man gjorde for 40 år siden. Større rundkjøringer blir i dag delt inn i flere kjørefelt i tilfarten og i sirkulasjonsarealet. Dette blir gjort for å bedre utnytte arealet i rundkjøringen. Det er også regler og skilting som sier noe om hvor man skal plassere seg i ulike situasjoner. Metode R fungerer derfor dårlig til å beregne kapasitet i dagens norske rundkjøringer.

4.1.3 Metode U, uregulerte kryss

Med et uregulert kryss menes kryss som bare reguleres med høyreregelen. Utfordringen med et slikt kryss er at avviklingsforholdene kan bli uryddige og at trafikken kan bli blokkert. Trafikken kan bli blokkert ved at alle bilene som står i krysset har vikeplikt for noen, og derfor etter reglene ikke kan kjøre. Dette gjør det vanskelig å utarbeide en nøyaktig kapasitetsmodell. Metode U består av å hente ut verdi fra en tabell, og deretter beregne gjennomsnittlig forsinkelse med kapasitetsreserven. I kryss med høy trafikkbelastning vil forsinkelsen bli stor. Det vil i disse tilfellene være hensiktsmessig å vurdere en annen kryssløsning som rundkjøring, signalregulert kryss eller forkjørsregulert kryss.

4.2 Kapasitet och framkommelighetseffekter (Sverige)

Den svenske kapasitetshåndboken er fra 2014, og er utgitt av det svenske trafikverket (Trafikverket, 2014). Et mål med modellen er at den skal være transparent slik at man skal forstå hvordan man kommer frem til resultatet. Modellene er makroskopiske og basert på kritisk tidsluke-teori. To mulige bruksområder til modellen er å sammenligne kapasitet for ulike alternativer og detaljprosjektering. Resultatene er basert på gjennomsnittsverdier, selv om det i virkeligheten er store variasjoner i trafikkmengde og atferd. Dette gjør at ytterligere målinger og beregninger anbefales før beslutninger skal tas.

Metoden tar hensyn til overbelastning som varer opp mot en time. En forutsetning for dette er at trafikkmengden i den påfølgende timen er null. Ved lave belastningsgrader antas det at sidevegen er et M/M/1 køsystem. Ved høye belastningsgrader antas det et D/D/1 køsystem.

I tillegg til den manuelle metoden er beregningsprogrammet Capcal utviklet. Her kan vanlige beregninger gjennomføres, men programmet kan i tillegg si noe om de årlige samfunnsøkonomiske konsekvensene av forsinkelsen i krysset.

4.2.1 Forkjøringsregulerte kryss

Kapittelet inneholder beregning for kryss med tre og fire armer, der sidevegen har enten stopplikt eller vikeplikt. Metoden tar ikke hensyn til kryssende gående og syklende på forkjøringsveg ved innkjøring og utkjøring. Dersom det er en viss mengde gående og syklende vil dette føre til en overestimert kapasitet. Kryssing av syklist og gående på sidevegen blir tatt hensyn til ved det legges til i den overordnede trafikkstrømmen med en personbilkvivalent på 0,5.

Metoden tar heller ikke hensyn til påvirkning fra nærliggende kryss. En fare ved å ikke ta hensyn til dette er at framkommeligheten kan bli overestimert. Dersom det kan være fare for påvirkning av kø i nærliggende kryss må tilgjengelig plass og kølengde sammenlignes.

Figur 4.2 viser beregningsgangen for forkjøringsregulerte kryss med den svenske metoden. Steg 2-5 gjøres separat for hver svingebevegelse, mens steg 6-9 gjøres for hele kjørefeltet samlet.



Figur 4.2 Beregningsgang for forkjøringsregulerte kryss og rundkjøringer i svensk modell

4.2.2 Rundkjøringer

Metoden er begrenset til rundkjøringer med tre og fire armer med ett eller to sirkulerende kjørefelt. Det er ikke mulig å ta hensyn til et varierende antall sirkulerende kjørefelt. Gående blir tatt hensyn til dersom gangfeltet er mellom vikepliktslinja og det sirkulerende kjørefeltet. Når det er to sirkulerende kjørefelt, beregner man fordelingen av trafikk mellom de to kjørefeltene. Dette gjøres ved å se på trafikkmengdene mellom de ulike armene, og anta hvor de plasserer seg i rundkjøringen. Normalt sett antas det at de som skal til venstre bruker det indre kjørefeltet, og de som skal rett frem og til høyre bruker det ytre kjørefeltet. Det er mulig å justere denne antakelsen.

Ellers er beregningsgangen tilsvarende den for forkjøringsregulerte kryss. Figur 4.2 viser derfor også beregningsgangen for rundkjøringer med den svenske metoden. Her er gjøres også steg 2-5 separat for hver svingebevegelse, mens steg 6-9 gjøres for hele kjørefeltet samlet.

4.3 Kapasitet og serviceniveau (Danmark)

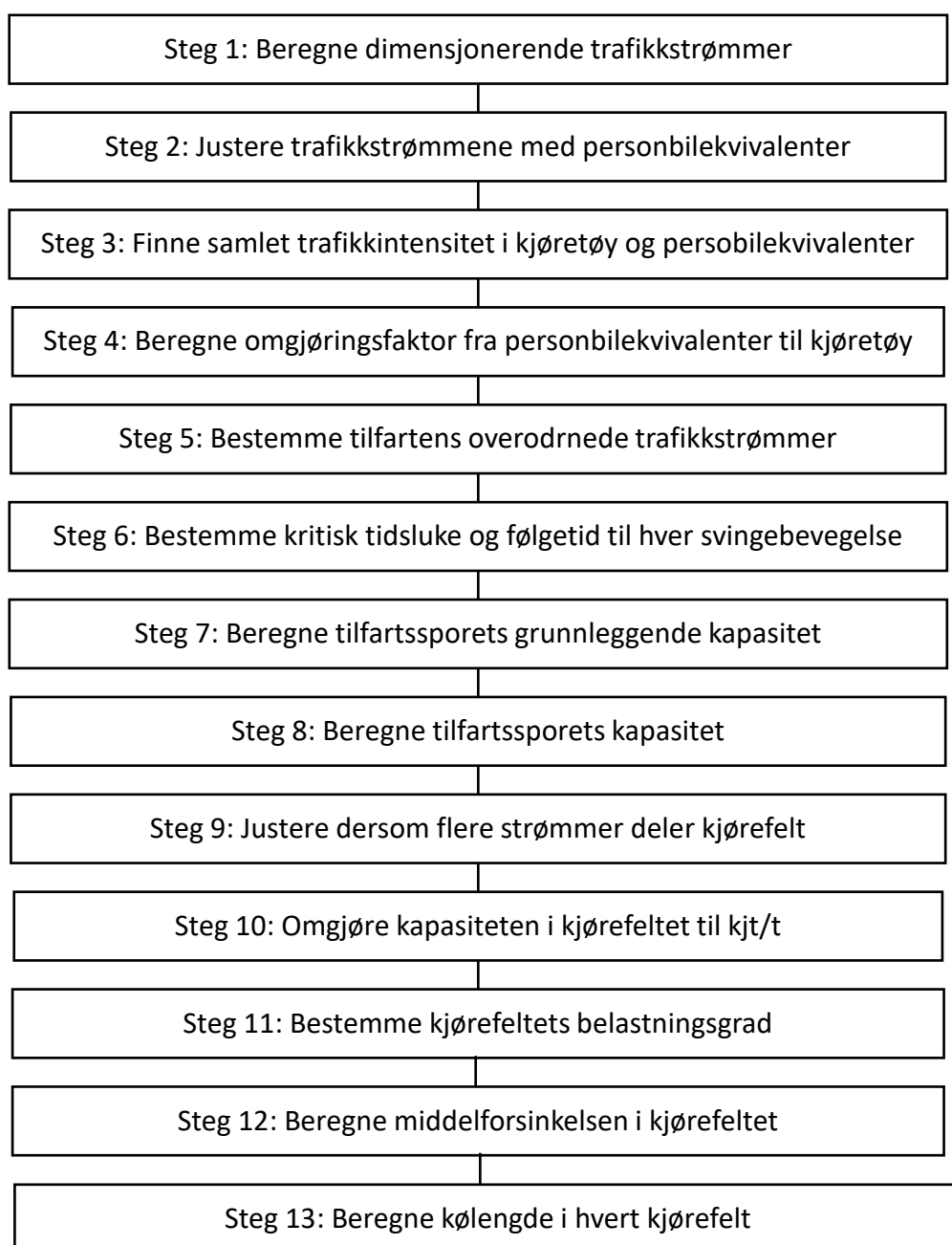
Den danske kapasitetshåndboken er utgitt i 2019 av det danske Vegdirektoratet (Vejdirektoratet, 2019). Metoden er en oppdatering av 2015-versjonen og inneholder flere endringer. Håndboken inneholder makroskopiske analyser av kapasitet og servicenivå for veger i byer og på landet. Metodene er i hovedsak basert på utenlandske teorier og modeller, men noen parametere er basert på observasjoner gjort i Danmark. Det er de kjørende som er i fokus i modellen, gående og syklende er kun med ved at de er med på å bestemme bilenes kapasitet.

I tillegg til den manuelle metoden i håndboken, er dataprogrammet DanKap utviklet. Beregningene i programmet blir gjennomført på samme måte som beskrevet i håndboken. Som resultat av analysen får man det samme skjemaet som man bruker til håndberegningene. Dette gjør at beregningsgangen fortsatt er enkel å følge.

4.3.1 Forkjøringsregulerte kryss

Modellen inneholder beregning av forkjøringsregulerte T-kryss, og metoden er basert på kritisk tidsluke-teori. Det anbefales å gjennomføre beregninger dersom trafikken på primærveien er større enn 500 kjt/time i makstimen. Makstimen er trafikken i den 30. eller 100. mest belastede timen i løpet av året. For å få mindre forsinkelse bør man velge den mest belastede timen, men dette gjør at man må bygge dyrere løsninger. En må derfor leve med at det noen ganger blir store forsinkelser.

Beregningene gjøres i to skjemaer. Skjema A er innledende beregninger, mens skjema B inneholder beregning av kapasitet, middelforsinkelse og kødannelse. Beregningsgangen er illustrert i Figur 4.3.



Figur 4.3 Beregningsgang for forkjørsregulerte kryss i dansk modell

4.3.2 Rundkjøringer

Metoden beregner kapasitet, kølengde og forsinkelse i tilfarten til rundkjøringen. Den tar ikke hensyn til utgangskapasitet som kan bli begrenset av fotgjengerfelt og nærliggende kryss. Beregningsmetoden er basert på kritisk tidsluke-teori. Det er gjort en forenkling ved at man antar at man viker for all sirkulerende trafikk når rundkjøringen har to sirkulerende kjørefelt. Beregningsgangen minner mye om den for forkjørsregulerte kryss. Flytskjemaet i Figur 4.4 viser trinnene i modellen.



Figur 4.4 Beregningsgang for rundkjøringer i dansk modell

4.4 Highway capacity manual 7th Edition (USA)

Den syvende utgaven av Highway capacity manual ble utgitt i 2022 av Transportation Research Board. Den inneholder analysemetoder for gater, hovedveier og motorveger. I denne oppgaven har kapittelet om rundkjøringer og toveis stopp-kontrollert kryss blitt studert. Toveis-stopp kontrollerte kryss er det som ligner mest på forkjørsregulerte kryss. Forskjellen er at sideveiene har stopplikt, og ikke vikeplikt. Men man kan justere modellen sånn at den tilpasses dette, siden hovedprinsippene for prioritering er det samme for de to krysstypene.

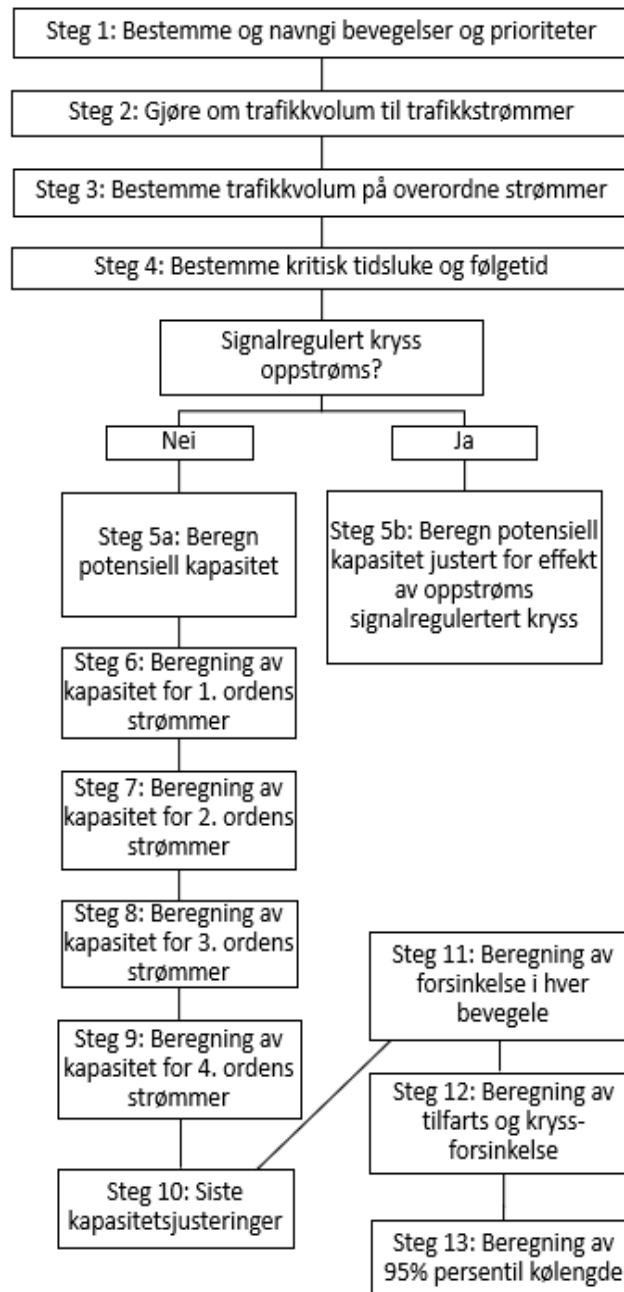
Den nest siste utgaven av HCM kom i 2016. For de relevante kapitlene om toveis-stop kontrollerte kryss og rundkjøringer er det et par endringer. Noen av disse endringene har hatt innvirkning på oppgaven. Dette er fordi arbeidet med denne oppgaven starten høsten 2021, før versjon 7 ble publisert. Likevel er det meste av beregningen lik, så mye av det som ble gjort i prosjektoppgaven er fortsatt gyldig etter den nye oppdateringen kom.

4.4.1 Toveis stopp-kontrollerte kryss(TWSC)

Metoden for TWSC kryss er basert på kritisk tidsluke-teori med parametere tilpasset til amerikanske forhold gjennom feltobservasjoner. En styrke ved modellen er at den er internasjonalt anerkjent og at resultatene stemmer godt overens med feltobservasjoner (Transportation Research Board, 2022). Den er også avansert siden den for eksempel tar hensyn til todelt kritisk tidsluke og breddeutvidelse i høyresving.

En svakhet ved modellen er at det antas at trafikkmengden er konstant. I realiteten varierer trafikkmengden, og dette vil ha innvirkning på resultatet. En annen svakhet er at det ikke konkret er beskrevet hvordan kritisk tidsluke og følgetid endrer seg i forkjørsregulerte kryss, som gjør det mer utfordrende å tilpasse modellen til dette.

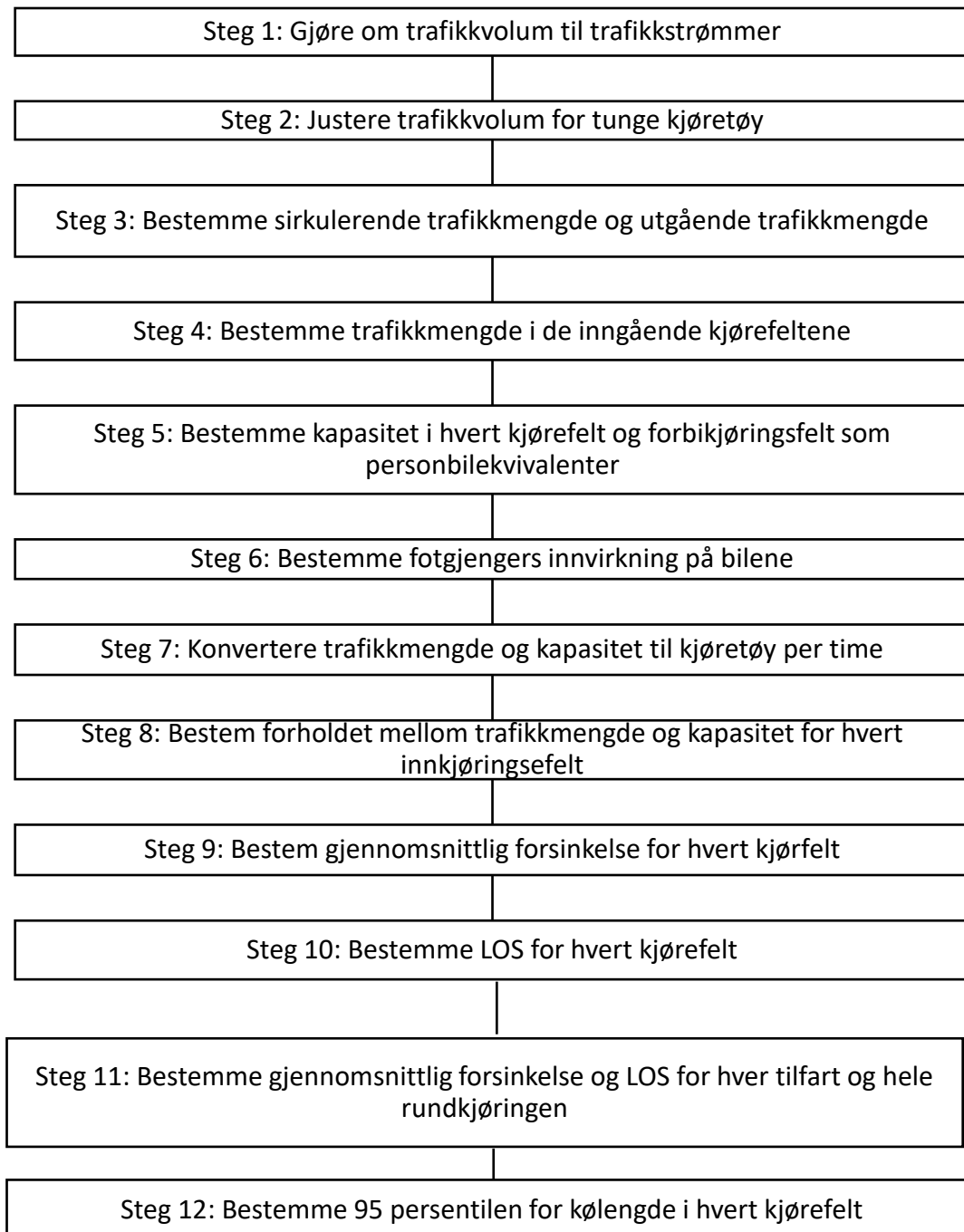
Figur 4.5 viser beregningsgangen i metoden for TWSC kryss. Som flytskjema viser, tar modellen hensyn til om det er signalregulerte kryss oppstrøms. Dette gjøres fordi kjøretøyene ankommer fra det signalregulerte krysset i puljer, også kalt platooning. Modellen justerer også kapasiteten som følge av fotgjengere. Dette gjøres ved å legge til fotgjengere som en del av strømmen som kjøretøyene må vike for. Kapittelet inneholder også en egen metode for å beregne kapasitet og forsinkelse for fotgjengere. Denne metoden er ikke vurdert siden oppgaven er begrenset til å se på fotgjengers påvirkning på motortrafikkens kapasitet.



Figur 4.5 Beregningsgang for TWSC kryss i HCM

4.4.2 Rundkjøringer

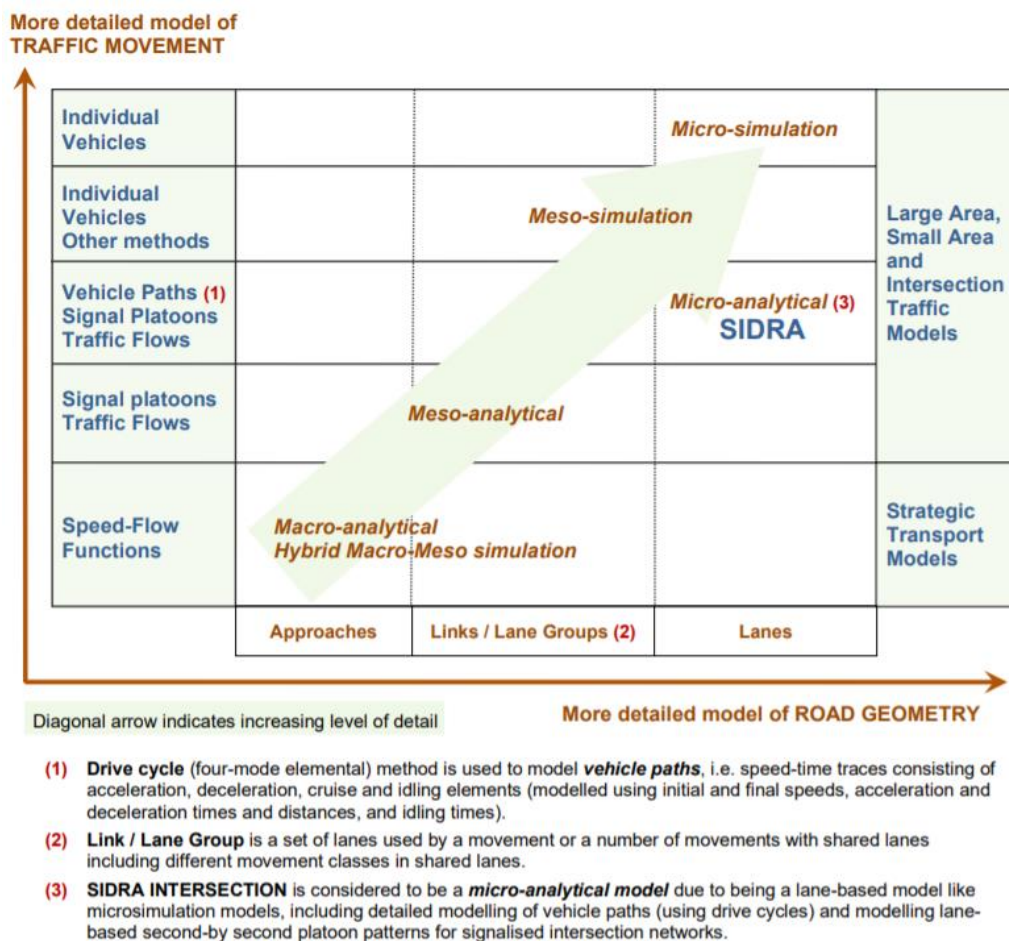
Metoden for kapasitetsberegning i rundkjøringer er basert på et datasett med observasjoner fra 24 rundkjøringer med ett sirkulerende kjørefelt, og 37 rundkjøringer med flere sirkulerende kjørefelt. Modellen er en kombinasjon av analytisk kritisk tidsluke-modell og regresjonsmodell. Fordelen med dette er at modellen kan ta hensyn til sjåfør oppførsel som ikke kan forklares med kritisk tidsluke-teori. Det er dette som brukes som argument for at metoden ikke er ren analytisk. Figur 4.6 viser beregningsgangen i metoden. LOS står for level of service, og er et slags mål på avviklingskvaliteten. I dette tilfellet er LOS basert på forsinkelse.



Figur 4.6 Beregningsgang for rundkjøringer i HCM

4.5 SIDRA intersection

SIDRA Intersection er en mye brukt mikro-analytisk beregningsmodell (Sidra Solutions, 2021a). Programmet kan brukes til å analysere mange typer kryss, og dekker de krysstypene denne oppgaven er avgrenset til. Modellen gir et estimat på kapasitet og avviklingskvalitet som forsinkelse, kølengde, andel stopp, estimert drivstofforbruk og utslipp (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020). Modellen skiller på resultater fra hver svingebevegelse, kjørefelt og tilfart. Figuren under illustrerer hva som menes med en mikro-analytisk modell. Som figuren viser, er SIDRA like detaljert på geometrien i krysset som en mikro-simuleringsmodell. Det som skiller modellen fra mikrosimulering er at man ser på trafikkstrømmer, og ikke individuelle kjøretøy. Det vil si at man ser på gjennomsnittsverdier, og derfor vil få likt resultat hver gang man gjør den samme beregningen.



Figur 4.7 Oversikt over trafikkmodeller (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020)

En fordel med SIDRA er at det kan være lettere å gjøre beregninger for kryss som avviker fra normalen. Det er også mulighet for å se på et nettverk av kryss. Dette kan være nyttig i de tilfellene der nærliggende kryss påvirker kapasiteten. Den niende versjonen av SIDRA kom i 2020. Den nye versjonen av SIDRA kan se på et nettverk med opptil 50 kryss (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020).

Beregningen kan gjøres kjørefelt for kjørefelt, eller for hver kjøretøysbane. Videre kan dette legges sammen for å estimere blant annet kapasitet, forsinkelse og kølengde (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020). Inndata i modellen er i hovedsak:

- Kryssutforming
- Definisjon av svingebevegelser
- Kjørefeltsgometri
- Svingebevegelser i kjørefelt
- Fotgjengere
- Trafikkvolum
- Prioritet
- Kritisk tidsluke
- Kjøretøysdata for hver bevegelse
- Endring av parametere og sensitivitet

Kapasitetsberegning av ikke signalregulerte kryss er i SIDRA basert på teori fra signalregulerte kryss (Akcelik, 1994). Det vil si at tiden fortsatt deles inn i «rødtid» og «grønntid». Der rødtid er tiden man må vente grunnet et kjøretøy i konflikt i den overordnede strømmen. Grønntid er når det er en åpning i den overordnede trafikkstrømmen, som gjør at det er mulig å kjøre ut i krysset.

I SIDRA kan også HCM brukes til kapasitetsberegning. Dette kan gjøres med et eget oppsett i programmet (Sidra Solutions, 2021b). Dette er ikke en kopi av metodene i HCM, men de er inspirert av metodene. Blant forbedringene i SIDRA er at kritisk tidsluke blir redusert ved høy trafikkmengde. Dette gjenspeiler virkeligheten bedre, siden man ofte er villig til å akseptere en mindre tidsluke dersom man har ventet lenge.

Når man gjør beregninger i SIDRA kan man velge mellom ulike beregningsmetoder, som for eksempel SIDRA Standard, HCM 6 og HCM 2010. SIDRA modellen bruker avansert kritisk tidsluke-teori for beregning av kapasitet i rundkjøringer. Empiriske modeller blir brukt til å beregne den kritiske tidsluken (Akcelik & Associates PTY LTD, 2020). Kritisk tidsluke-modellene blir også brukt for beregning av forsinkelse, kølengde og andre parametere.

I denne oppgaven kan SIDRA brukes til å kontrollere resultater i beregningsmodellen. Fordelen med å bruke dette programmet er at det kan ta hensyn til flere faktorer enn beregningsmodellene som er beskrevet tidligere i dette kapittelet. Beregningene er også mer avansert, som kan gi mer nøyaktige resultater. Men dette forutsetter riktig inndata og justering av parametere.

4.6 Sammenligning av modellene

I dette avsnittet skal metodene i «Kapasitet i kryss», «Highway capacity manual», «Kapasitet og serviceniveau», «Kapasitet och framkommelighetseffekter» og SIDRA Intersections sammenlignes. Dette vil svare på det første forskningsspørsmålet som er å gjøre rede for og diskutere hva som skiller de ulike modellene. SIDRA Intersections vil være en del av sammenligningen der det er funnet relevante opplysninger.

Sammenligningen deles inn i en generell sammenligning og en sammenligning for modellene for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer. Deler av sammenligningene i tabellene for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer er hentet fra prosjektoppgaven. Sammenligning av modellene danner grunnlaget for utviklingen av grunnmodellen.

4.6.1 Modellene generelt

Kjøretøyskategorier:

Norsk modell: Skiller mellom lette og tunge kjøretøy. Standard er 10% tunge kjøretøy. Den potensielle kapasiteten blir korrigert etter andel tunge kjøretøy og stigning i krysset.

Svensk modell: Skiller mellom lette og tunge kjøretøy. Andelen tunge kjøretøy er en av faktorene som er med på å bestemme kritisk tidsluke. Modellen for forkjørsregulerte kryss har ulik andel tunge kjøretøy som gir null korreksjon enn modellen for rundkjøringer. For forkjørsregulerte kryss er det en andel på 5,6%, mens for rundkjøringer er andelen 10%. Videre inngår andel tunge kjøretøy i en korreksjonsfaktor som påvirker betjeningstiden i noen beregningstilfeller.

Dansk modell: Mange kjøretøyskategorier. Skiller mellom personbil uten tilhenger, personbil med tilhenger, lastebil og busser, vogntog, motorsykler og mopeder. Kjøretøyskategori bestemmer sammen med stigningen i tilfarten verdien på personbilekvivalenten. Deretter vektes den totale trafikkmengden i enheten personbilekvivalenter per time etter hvor stor andel det er av hver kjøretøyskategori.

HCM: Skiller mellom lette og tunge kjøretøy. Korreksjonen er forskjellig for TWSC og rundkjøringer. I TWSC kryss justeres kritisk tidsluke for blant annet andelen tunge kjøretøy. Det er justering på grunn av tunge kjøretøy så lenge andelen ikke er 0%. I modellen for rundkjøringer justeres trafikkmengden med en «tunge kjøretøy faktor». Faktoren bestemmes av andelen tunge kjøretøy og personbilekvivalenten til tunge kjøretøy som er satt til 2,0.

SIDRA: Kan velge mellom standard kjøretøysklasser og brukerdefinerte brukerklasser. Standard klasser er lette kjøretøy, tunge kjøretøy, busser, sykler, store lastebiler og trikker (Sidra Solutions, 2021b). Disse blir tatt hensyn til ved bruk av kritisk tidslukefaktor og møtende («opposing») kjøretøys-faktor. Dersom man velger HCM innstillingene vil korreksjonen gjøres på samme måte som i HCM.

4.6.2 Forkjøringsregulerte kryss

Først skal det gjøres en sammenligning hvordan de ulike modellene tar hensyn til noen faktorer. Videre skal fremgangsmåten i de ulike modellene gjennomgås og sammenlignes.

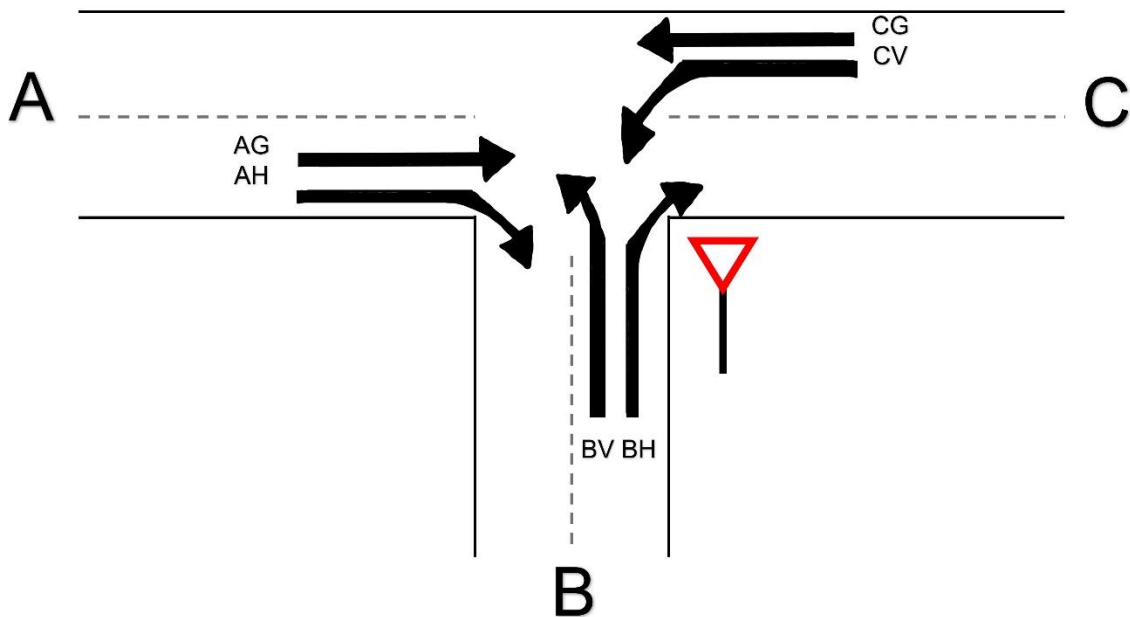
Tabell 4.1 Sammenligning av faktorer i modellene for forkjøringsregulert kryss

Faktor	Norsk modell	Svensk modell	Dansk modell	HCM	SIDRA
Fartsgrense	Inkludert, kritisk tidsluke justeres	Inkludert, kritisk tidsluke justeres	Ikke inkludert	Ikke inkludert	Inkludert, påvirker forsinkelsen
Stigning i krysset	Inkludert, utgangskapasitet justeres	Inkludert, kapasiteten justeres	Inkludert, personbil-ekvivalenten til de ulike kjøretøys-kategoriene justeres	Inkludert, kritisk tidsluke justeres	Inkludert, kritisk tidsluke justeres
Fotgjengere og syklister	Ikke inkludert	Delvis inkludert, tar bare hensyn til gående og syklende som krysser sidevegen. Legges til som en overordnet strøm med personbil-ekvivalent 0,5	Delvis inkludert, tar hensyn til sykler i kjørebanelen. Tar ikke hensyn til fotgjengere	Inkludert, legges til som en strøm man må vike for	Inkludert, kan ha kryssing av alle tilfarer. Påvirker kapasiteten til kjøretøy
To stegs utkjøring*	Ikke inkludert	Inkludert, kritisk tidsluke justeres	Ikke inkludert	Inkludert, bruker to stegs kritisk tidsluke	Ikke funnet informasjon om dette

*Med to stegs utkjøring i krysset menes det at utkjøring kan gjøres i to steg. I et T-kryss kan dette være en mulighet for svingebevegelsen venstresving fra sideveg. Dette kan gjøres der det er plass til å stå mellom de to kjøreretningene på forkjøringsvegen.

Overordnet trafikkmengde:

Med overordnet trafikkmengde menes den totale trafikkmengden en vikepliktig strøm må vike for. I noen tilfeller blir også utkjørende trafikkstrøm lagt til som overordnet trafikkmengde. Det er i hovedsak på dette punktet modellene skiller seg fra hverandre. Standardverdien i SIDRA er brukt i sammenligningen, men det er mulig å gjøre endringer i faktoren for utkjørende trafikkmengde i programmet.



Figur 4.8 Oversikt over trafikkstrømmer i et T-kryss

Venstresving av forkjørsvog (CV): Overordnet trafikkmengde er lik for alle modellene. Må vike for trafikkstrømmer i motgående kjøreretning på hovedveien. Det vil si at CV må vike for AG og AH.

Høyresving inn på forkjørsvog (BH): Felles for alle modellene er at AG er overordnet trafikkstrøm. HCM og den norske modellen legger også til halve trafikkmengden fra den utkjørende trafikkstrømmen AH. I den nye versjonen av HCM kan denne faktoren endres, men standardverdien er fortsatt 0,5. At faktorene kan endres i HCM er nytt fra den 7. utgaven.

Venstresving inn på forkjørsvog (BV): Svensk og dansk modell teller kun med strømmer grunnet vikepliktsregelen, altså AG, CG og CV. SIDRA, den norske modellen og HCM legger også til halve trafikkmengden fra den utkjørende trafikkstrømmen AH. HCM teller med venstresvingene av forkjørsvogen dobbelt opp. Dette begrunnes med feltobservasjoner (Kyte et al., 1996). I den norske modellen legges ikke venstresvingene av forkjørsvogen som en overordnet trafikkstrøm. Som for høyresvingene inn på forkjørsvog kan også faktorene endres i HCM dersom feltobservasjoner tilsier det.

Sammenligningen viser at modellene stort sett definerer de samme overordnede strømmene. Hovedforskjellen er hvorvidt de definerer den utkjørende trafikkstrømmen som en overordnet trafikkmengde eller ikke. Det kan diskuteres om det

er riktig å telle med den utkjørende trafikkmengden. Dette er noe som kan variere utfra geometrisk utforming, men også være en individuell forskjell mellom sjåførere. En annen utfordring er ved å legge til de til sammen med resten av den overordnede trafikkmengden er at de ikke vil blokkere like lenge som annen overordnet trafikkmengde. Det vil si at på et tidspunkt skjønner sjåføren som skal ut i krysset at kjøretøyet skal svinge av veien, og da har mulighet til å kjøre ut dersom luken er stor nok. Nøyaktig bestemmelse av faktoren kan derfor være utfordrende.

Kritisk tidsluke og følgetid

I alle modellene danner kritisk tidsluke, følgetid og overordnet trafikkmengde grunnlaget for å beregne kapasitet. Modellene skiller noe på hva som er med på å påvirke kritisk tidsluke og følgetid. Nedenfor er det listet noe av det som bestemmer kritisk tidsluke for de ulike modellene.

Tabell 4.2 Faktorer som påvirker kritisk tidsluke

Faktor	Norsk modell	Svensk modell	Dansk modell	HCM
Svingebevegelse	X	X	X	X
Reguleringsform (vikeplikt/stoppplikt)	X	X	X	
Fartsgrense	X	X		
Antall kjørefelt på forkjørsvveg	X	X	X	X
Andel tunge kjøretøy	*1	X	*3	X
Helning i krysset	*1	*2	*3	X
Radius og vinkel i krysset		X		

*1: Kapasitet korrigeres for andel tyngre kjøretøy og helning i tilfarten

*2: Kapasitet korrigeres for helning i krysset

*3: Deler inn trafikstrømmen i ulike kjøretøyskategorier. Disse kjøretøyene omgjøres til personbilekvivalenter som påvirkes av type kjøretøy og helningen i krysset

I SIDRA vil kritisk tidsluke bestemmes blant av geometri og trafikkmengder. Det er også mulig å legge inn egne verdier for kritisk tidsluke og følgetid.

I den svenske og norske modellen er de en fast sammenheng mellom kritisk tidsluke og følgetid. Følgetiden er 60% av kritisk tidsluke. I de andre modellene er det ingen fast sammenheng, men forholdet mellom følgetid og kritisk tidsluke ligger likevel rundt 60%.

Grunnleggende kapasitet

I HCM, dansk og norsk modell beregnes den grunnleggende kapasiteten for hver trafikstrøm med Harder's formel som er beskrevet i avsnitt 2.2.2. I den svenske metodikken beregnes betjeningstid ved kø først, ikke kapasiteten. Betjeningstiden er omvendt proporsjonal med betjeningstiden, og formelen for beregning er nesten lik som en delt på Harder's formel. Det som skiller beregningen i den svenske er at utgangskapasiteten igjen blir justert for antall kjørefelt og andel tunge kjøretøy.

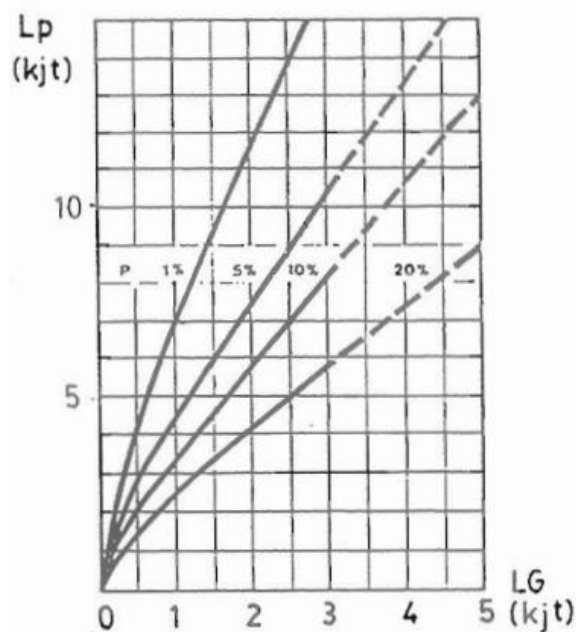
Hvordan den grunnleggende kapasiteten for rett frem og høyresvingene av forkjørsveg beregnes, er ulikt fra modell til modell. I den danske modellen argumenteres det for at Harder's formel går mot $T/følgetid$ når den overordnede trafikkmengden går mot null. I HCM er kapasiteten satt til å være 1800kjt/t for trafikkstrømmene rett frem på forkjørsvegen og 1500kjt/t for høyresving av forkjørsveg. I den svenske modellen settes betjeningstiden lik en korreksjonsfaktor for tunge kjøretøy. Med 10% tunge kjøretøy er kapasiteten i modellen 1800kjt/t.

Kapasitetskorreksjon

Den grunnleggende kapasiteten som beregnes må i noen tilfeller korrigeres. I alle modellene korrigeres kapasiteten for kødannelse i overordnede strømmer. I et T-kryss må derfor kapasiteten i strømmen BV korrigeres for mulig kødannelse i strømmen CV. Dersom det er kø i CV vil disse benytte seg av ledige tidsluker, og dermed redusere kapasiteten til trafikkstrømmen BV. I alle modellene gjøres det ved å gange den grunnleggende kapasiteten til BV med sannsynligheten for at det ikke er kø i CV. I den danske modellen korrigeres det også for at det kan være noe opphopning i strømmene på forkjørsvegen som ikke har vikeplikt. Siden belastningsgraden i disse strømmene ofte er liten, vil dette ha begrenset kapasitetsreducerende effekt på de underordnede strømmene. I den svenske modellen justeres også kapasiteten for bredden på kjørefeltet, antall sykler og helning i tilfarten.

Kølengde

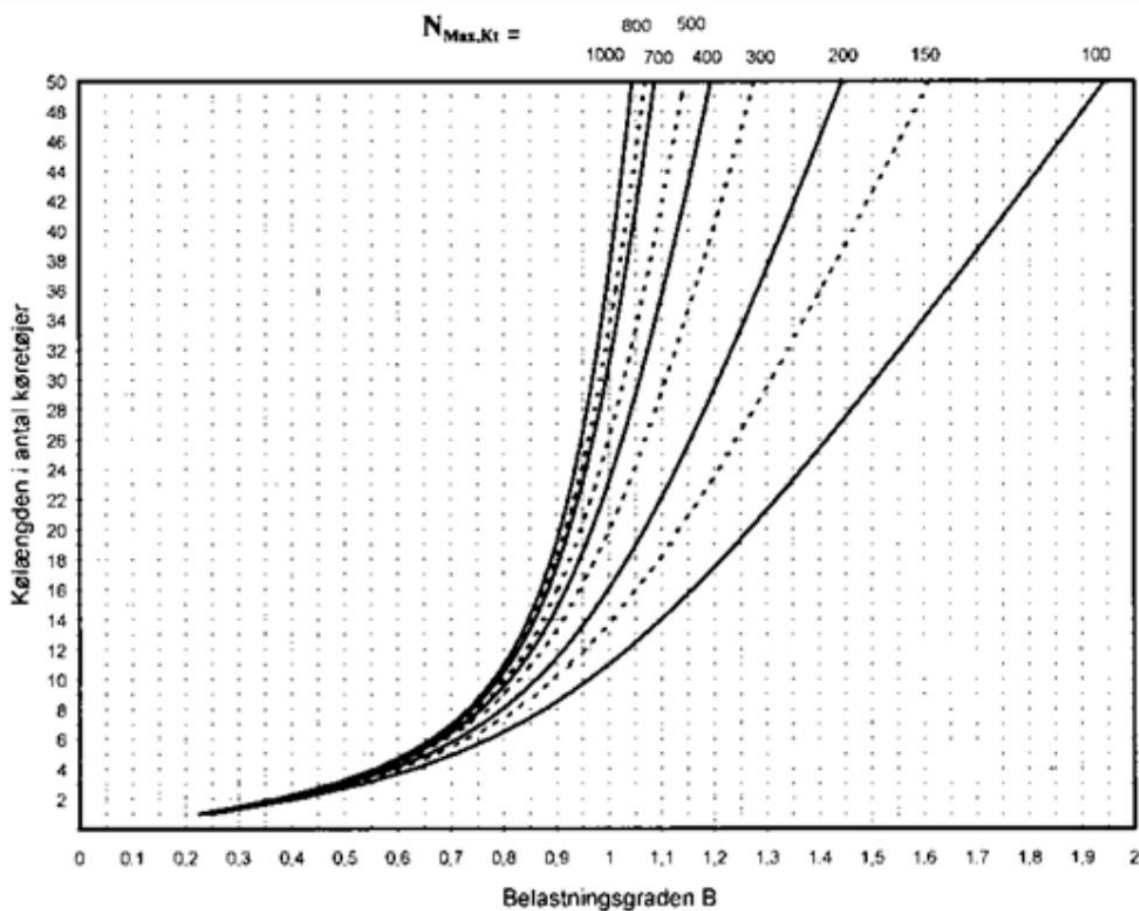
Norsk modell: I denne modellen beregnes først gjennomsnittlig antall kjøretøyer i kø (LG). Det den norske modellen definerer som gjennomsnittlig antall kjøretøyer i kø er det som i M/M/1 køteori defineres som «gjennomsnittlig antall kjøretøyer i systemet» (Aakre, 2020a). Deretter kan dimensjonerende kølengde (L_p) leses av fra en figur. En kan velge mellom 1, 5, 10 og 20% persentil på dimensjonerende kølengde. Det vil si at man velger i hvor mange prosent av tiden den maksimale køen kan være av en viss lengde. Som figuren under viser har den et gyldighetsområde for gjennomsnittlig kølengde opp til 5 kjt og dimensjonerende antall kjøretøy på 15.



Figur 4.9 Dimensjonerende kølengde(L_p) norsk modell (Vegdirektoratet, 1985)

Svensk modell: I den svenske modellen er det kun gjennomsnittlig kølengde som beregnes. Den gjennomsnittlige kølengden er en funksjon av belastningsgraden, kapasiteten og beregningsperiodens lengde. Formelen er tilsvarende den i koordinattransformasjonsmetoden som er beskrevet i avsnitt 2.2.5. Siden den svenske modellen kun beregner gjennomsnittlig kølengde vil det være vanskelig å sammenligne resultater med de andre modellene, som kun beregner dimensjonerende kølengde.

Dansk modell: I den danske modellen kan kø som overskrives i 1% og 5% av beregningsperioden beregnes. Den dimensjonerende kølengden kan leses av fra en figur. Også i denne modellen er dimensjonerende kølengde avhenge av kapasitet og trafikkmengde. Figuren for 5% er vist under, der $N_{max,kt}$ er kapasiteten i tilfarten. En sammenligning av verdier for dimensjonerende kølengde avlest på figuren og beregnet med formelen i HCM gir like resultater.



Figur 4.10 95% persentil kølengde dansk modell

HCM: I denne modellen beregnes 95% persentil kølengde. Det vil si at i 5% av tiden vil være kølengde som er større enn en viss verdi. Kølengden beregnes utfra kapasitet, trafikkmengde og analyseperiodens lengde. Den standard analyseperioden i HCM er 15 minutter. Beregningen argumenteres med teoretiske studier og empiriske observasjoner (Wu, 1994).

Formel 4-1 95% persentil kølengde HCM

$$Q_{95} = 900 * T * \left(\frac{v_i}{c_m} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_i}{c_m} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_m}\right)\left(\frac{v_i}{c_m}\right)}{150 * T}} \right) * \left(\frac{c_m}{3600}\right)$$

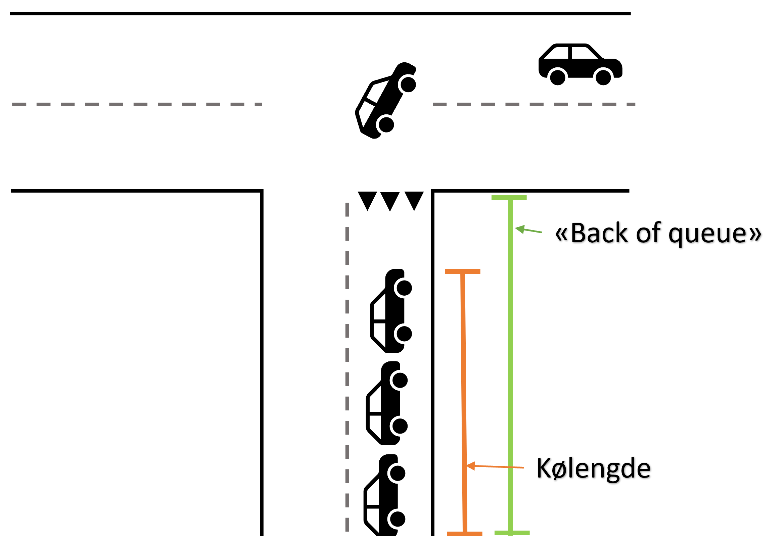
Q_{95} = 95% persentil kølengde [kjt]

T = beregningsperiodens lengde [t]

v_i = trafikkmengde i trafikkstrøm i [kjt/t]

c_m = Kapasitet for svingebevegelsen (movement) [kjt/t]

SIDRA: I denne modellen beregnes «Back of queue», altså hvor langt bakenden av køen strekker seg. Det er 95% persentil av «back of queue» som er standard i beregningen. Dette er en nyttig parameter siden det er denne kølengden som tilsier om det kan bli tilbakeblokkering, som er relevant ved dimensjonering av kryss. Denne verdien vil ikke være lik som 95% dimensjonerende kølengde, siden den dimensjonerende kølengden bare måler hvor lang selve køen er, målt fra første kjøretøy i kø. En illustrasjon av forskjellen mellom disse to begrepene er vist i figuren under.



Figur 4.11 Forskjell mellom kølengde og "Back of queue"

I tillegg til «Back of queue» er det også mulighet for å se på en utvidet kø-analyse. Her kan en blant annet se på gjennomsnittlig kølengde.

Sammenligningen viser at den dimensjonerende kølengden med den danske modellen og HCM ligner mest på hverandre. I mange tilfeller skal kapasitetsberegninger brukes for å bestemme utforming av kryss og valg av kryssløsninger. Det kan derfor være mer nyttig å se på dimensjonerende kølengde enn en gjennomsnittlig kølengde. Kølengden ved bruk av SIDRA kommer til å være lengre siden lengden til bakenden av køen måles, som vist i figuren over.

Forsinkelse

Norsk modell: Som diskutert tidligere i avsnitt 4.1.1 er forsinkelse i den norske modellen basert på kapasitetsreserven og et uttrykk fra M/M/1 køteori. Dette vil gi urealistisk stor forsinkelse når belastningsgraden øker. Dette er en av de store svakhetene med den gamle norske modellen, og er noe som må endres når modellen skal videreutvikles.

Svensk modell: Den svenske modellen har som tidligere nevnt en litt annet beregningsgang enn de andre modellene. Betjeningstiden blir brukt til å beregne belastningsgraden, istedenfor kapasiteten som i de andre modellene. Når det kommer til forsinkelse i tilfarten, blir først ventetiden til hver trafikkstrøm beregnet. Ventetid defineres som den tiden det tar fra man ankommer køen til man er først i køen. Ventetiden er i likhet med de andre modellene avhenge av kapasitet, belastningsgrad og beregningsperiodens lengde. Utrykket for beregning av ventetid i den svenske modellen er vist under.

Formel 4-2 Utrykk for ventetid svensk modell

$$w = \frac{-(2 + c_m * T - x * c_m * T) + \sqrt{(2 + c_m * T - x * c_m * T)^2 + 8 * x * c_m * T}}{4 * c_m}$$

w = Gjennomsnittlig ventetid (waiting time) [s]

Formelen for ventetid i den svenske modellen er likt med resultater fra koordinattransformasjonsmetoden som er omtalt i kapittel 2.2.5. Videre beregnes «interaksjonsforsinkelsen». Dette defineres i håndboken som den forsinkelsen som oppstår som følge av konflikt med andre trafikkstrømmer (Trafikverket, 2014). Interaksjonsforsinkelsen er summen av betjeningstid og ventetid. I den svenske modellen beregnes også geometrisk forsinkelse. Den geometriske forsinkelsen defineres som forsinkelsen som kommer av geometrien i krysset, altså at ikke krysset er en rett strekning (Trafikverket, 2014). Deretter kan total forsinkelse beregnes ved å vurdere interaksjonsforsinkelse og geometrisk forsinkelse.

Dansk modell: Utregningen av forsinkelse i den danske modellen er basert på tidsavhengig køteori med koordinattransformasjonsmetoden som beskrevet i avsnitt 2.2.5. Forsinkelsen er delt opp i to, ledd t_1 og t_2 . Det første leddet beskriver ventetiden når man står først i køen. Det andre leddet representerer den tiden man venter på å komme først i køen. Ved lave belastningsgrader vil t_1 ha den høyeste verdien.

Formel 4-3 Utrykk for forsinkelse dansk modell

$$d = \frac{T}{c_m} + \frac{T}{4} \left((x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8 * x}{c_m}} \right)$$

d = Gjennomsnittlig forsinkelse [s]

x = Belastningsgrad []

HCM: I HCM brukes «control delay» som parameter for å beskrive forsinkelse. Definisjonen av dette begrepet er andel forsinkelse som blir skapt av kontrollenheten, som i dette tilfellet er stop-skiltet (Transportation Research Board, 2022). Denne forsinkelsen kan beregnes ved å se på forskjellen mellom forsinkelsen med og uten stop-skiltet. Denne forsinkelsen er avhenge av kapasitet, trafikkmengde og analyseperiodens lengde. Det står også at dersom belastningsgraden er over 0,9 vil den gjennomsnittlige forsinkelsen påvirkes veldig av analyseperiodens lengde.

Formel 4-4 Utrykk for forsinkelse HCM

$$d = \frac{3600}{c_m} + 900 * T \left(\frac{v_i}{c_m} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_i}{c_m} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_m}\right)\left(\frac{v_i}{c_m}\right)}{450 * T}} \right) + 5$$

De fem sekundene som legges til tar hensyn til forsinkelsen som oppstår ved oppbremsing og akselerasjon tilbake til kjørefarten.

SIDRA: Det SIDRA definerer som gjennomsnittlig forsinkelse inkluderer også geometrisk forsinkelse. I oppsummeringen av resultater er det ikke mulig å skille ut geometrisk forsinkelse fra den gjennomsnittlige forsinkelsen. I de tilfellene den geometriske forsinkelsen utgjør en betydelig andel av forsinkelsen kan det derfor være vanskelig å sammenligne med modeller som ikke inkluderer geometrisk forsinkelse. Denne forskjellen vil minke når belastningsgraden øker, siden den geometriske forsinkelsen da kun vil utgjøre en mindre andel av den totale gjennomsnittlige forsinkelsen.

Sammenligningen viser at HCM, den danske og den svenske modellen har relativt lik definisjon av interaksjonsforsinkelsen. HCM skiller seg fra den danske ved at fem sekunder legges til som følge av akselerasjon opp og ned i fart. Ellers er den danske modellen og HCM like. Selv om formelen for interaksjonsforsinkelse i den svenske modellen har et litt annerledes utseende, gir eksempelberregninger nesten like resultater. Videre er den svenske modellen utvidet ved at den også ser på geometrisk forsinkelse. I kryss der det er stor belastningsgrad vil ikke den geometriske forsinkelsen bidra like mye til total forsinkelse som det interaksjonsforsinkelsen gjør.

4.6.3 Rundkjøringer

Sammenligning av beregningsmetodene består først av å sammenligne noen ulike faktorer modellene tar hensyn til. Videre skal oppbygningen sammenlignes og diskuteres. Som diskutert i avsnitt 4.1.2 er den norske modellen for rundkjøringer bygd opp på en annen måte enn de andre modellene. Metode R er derfor ikke en del av sammenligningen.

Tabell 4.3 Sammenligning av faktorer i modellene for rundkjøringer

Faktor	Svensk modell	Dansk modell	HCM	SIDRA
Fotgjengere og syklist	Delvis inkludert, tar hensyn til fotgjengere som krysser tilfarten mellom vikeplikts-linja og det sirkulerende kjørefeltet. Fotgjengere legges til med en personbilkviva lent på 0,5. Antall sykler er inkludert som en del av kapasitetskorreksjonen	Delvis inkludert, korrigerer kapasiteten for antall fotgjengere som krysser tilfart. Bruker metoden til Brilon et. al som beskrevet i 2.2.7.	Delvis inkludert, korrigerer kapasiteten. Tar kun hensyn til fotgjengere som krysser tilfarten. Bruker og metoden til Brilon et. al	Inkludert, kan ha kryssing av alle tilfarter. Påvirker kapasiteten til kjøretøy. Metoden er basert på det som gjøres i HCM
Utgangskapasitet	Ikke inkludert	Ikke inkludert, henviser til simulering dersom det er mye kryssing i utfarten	Ikke inkludert, fotgjengere i utfart antas å ha liten innvirkning på kapasiteten	Kan ha nettverksanalyse. Utgangskapasitet er ikke et resultat i beregning av en enkel rundkjøring
Utkjørende trafikkmengde ved tilfarten	Ikke inkludert	Inkludert, kapasiteten korrigeres med en faktor basert på utkjørende trafikkmengde i hosliggende utfart	Delvis inkludert, men påvirker ikke kapasiteten til trafikkstrømmene som kjører inn i rundkjøringen	Ikke funnet informasjon om dette

Overordnet trafikkmengde:

Svensk modell: Den sirkulerende trafikkmengden blir fordelt mellom indre og ytre kjørefelt. De som ligger i høyre kjørefelt i tilfarten trenger kun å vike for trafikstrømmen i det ytre sirkulerende kjørefeltet. I det venstre kjørefeltet i tilfarten må trafikken vike for trafikstrømmen i både det indre og det ytre sirkulerende kjørefeltet. Trafikken blir fordelt mellom de ulike sirkulerende kjørefeltene med en faktor β . Standard er at det antas at all trafikk som skal rett frem og til høyre bruker det ytre kjørefeltet. Trafikkstrømmen som skal til venstre antas å bruke det indre kjørefeltet. Dersom oppmerking eller annet skulle tilsi en annen fordeling, kan dette justeres i modellen.

Dansk modell: Modellen gjør en forenkling ved at den ikke skiller mellom trafikkmengde i indre og ytre sirkulerende kjørefelt. Dermed antas all sirkulerende trafikkmengde i forkant av tilfarten som overordnet trafikkmengde.

HCM: I denne modellen anses all sirkulerende trafikkmengde foran tilfarten som overordnet trafikkmengde. Det vil si at modellen ikke skiller på trafikstrømmer i indre og ytre sirkulerende kjørefelt.

Sammenligningen viser at både HCM og den danske modellen gjør forenklinger når det kommer til å definere hva som er overordnet trafikkmengde. Den svenske modellen er mer detaljert når det kommer til overordnet trafikkmengde ved at den skiller på trafikstrømmer i indre og ytre del av del av sirkulasjonsarealet.

Kritisk tidsluke og kapasitet

Svensk modell: Som for forkjørsregulerte kryss beregnes betjeningstiden ved kø før kapasiteten. Det er betjeningstiden ved kø som sammen med trafikkmengden brukes til å beregne belastningsgrader. Formelen for beregning av betjeningstid ved kø er ulik for rundkjøringer med et og to sirkulerende kjørefelt.

Dansk modell: I den danske modellen for rundkjøringer brukes samme formel for å beregne kapasitet som i modellen for forkjørsregulerte kryss. Det er Harder's formel som brukes, og det skiller på trafikstrømmer av motortrafikk og sykler. Syklistene i rundkjøringer er mest vanlig når det kun er et sirkulerende kjørefelt. Den kritiske tidsluken som benyttes for å beregne kapasiteten hentes fra en tabell, og er avhenge av antall sirkulerende kjørefelt, og om beliggenheten er by eller land.

HCM: Som diskutert i avsnitt 4.4.2 er HCM sin kapasitetsmodell for rundkjøring en kombinasjon av analytisk kritisk tidsluke-teori og regresjonsmodell. Utrykket for kapasitet i et kjørefelt i tilfarten er gitt under.

Formel 4-5 Kjørefeltkapasitet rundkjøring HCM

$$c_p = A * e^{-B*v_c}$$

$$A = \frac{3600}{t_f}$$

$$B = \frac{t_c - \left(\frac{t_f}{2}\right)}{3600}$$

Denne kapasitetsberegningen gjøres med Siegloch's formel som er beskrevet i avsnitt 2.2.2. Forskjellen mellom denne beregningsmetoden og Harder's formel som brukes for T-kryss er at trafikstrømmen inn i rundkjøringen antas som kontinuerlig og lineær, i

motsetning til en trappefunksjon som i Harder's formel. Modellen kan kalibreres ved å beregne verdier for A og B. Vanligvis brukes en regresjonsmodell med fastsatte verdier for A og B til beregning av ulike eksempler. Disse verdiene er gitt ut fra ulik geometrisk utforming av rundkjøringen.

Sammenligning av de ulike metodene for å beregne kapasitet i rundkjøringer, viser at metodene er mer ulike enn for forkjørsregulerte kryss. Likevel har metodene til felles at kritisk tidsluke, følgetid og overordnet trafikkmengde brukes til å beregne kapasitet og betjeningstid.

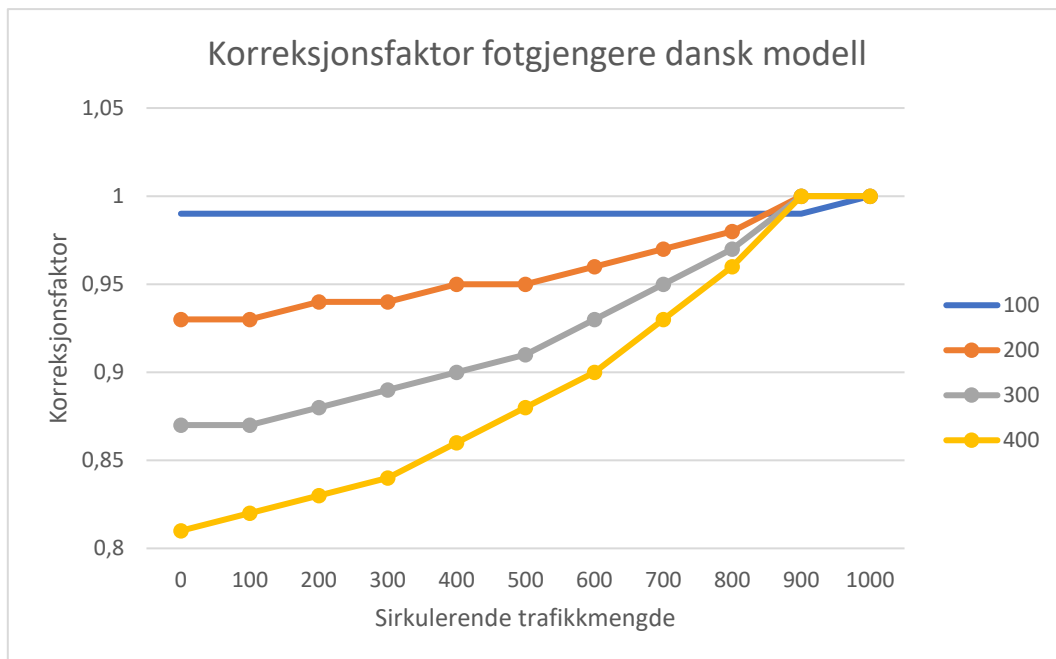
Kapasitetskorreksjon:

Svensk modell: Modellen korrigerer kapasitet som følge av syklist, kjørefeltsbredde og helning i tilfarten. Sykler blir korrigert for ved å se på andelen syklist og bredden på kjørefeltet. Det er også en egen korreksjonsfaktor for bredden på kjørefeltet. Dersom bredden på kjørefeltet er over fem meter anses det som et eget kjørefelt, selv om det ikke er separert med kjørefeltsmarkering. Helningen de siste 80 meterne inn på krysset danner også grunnlaget for en korreksjonsfaktor.

Dansk modell: Kapasiteten i denne modellen blir korrigert for trafikkmengde i hosliggende utfart og antall kryssende fotgjengere i tilfarten. Hver av disse elementene danner grunnlaget for korreksjonsfaktorer som ligger mellom 1,0 og 0,81.

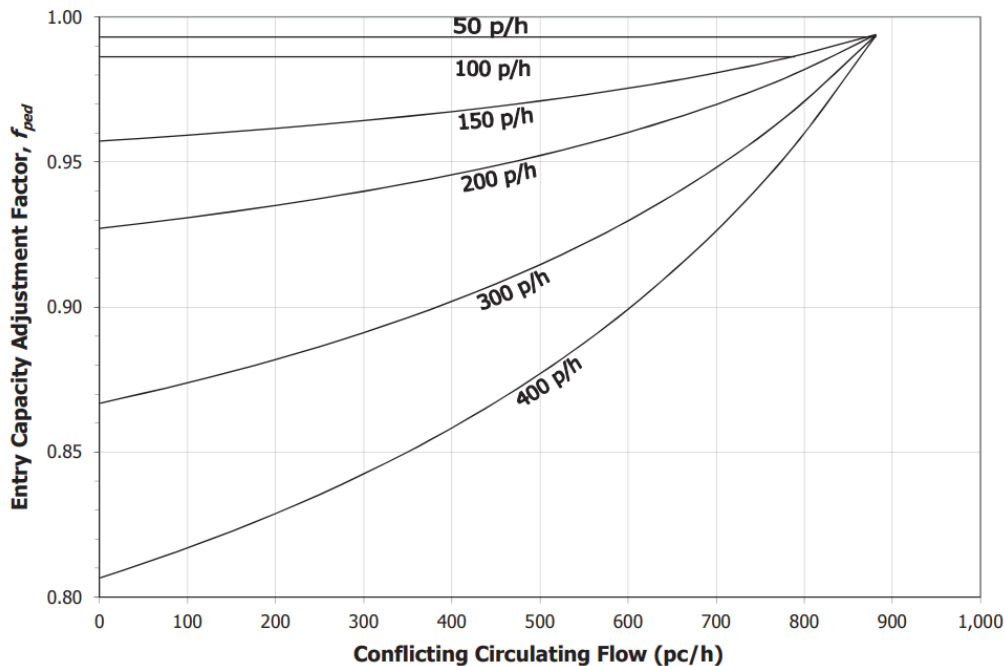
HCM: I denne modellen blir kapasiteten korrigert for både tunge kjøretøy og fotgjengere. Det beregnes en tunge kjøretøys-faktor som baserer seg på at personbiler har en kjøretøyskvalivalent på en, mens tunge kjøretøy har en personbilekvalivalent på to.

Det er flere av modellene som korrigerer kapasitet på grunn av fotgjengere. Figurene under viser korreksjonsfaktor for fotgjengere i den danske modellen og HCM. I HCM skilles det på korreksjonsfaktor ved ett og to kjørefelt i tilfarten.



Figur 4.12 Korreksjonsfaktor fotgjengere dansk modell

Figuren over er basert på verdier hentet fra tabell i den danske modellen (tabell 5.4 i «Kapasitet og Serviceniveau»).



Figur 4.13 Korreksjonsfaktor fotgjengere HCM, ett kjørefelt inngående (Transportation Research Board, 2022)

Korreksjonsfaktoren er lik i de to modellene. I HCM står det at justeringsfaktoren kommer fra formelen til Brilon, Stuwe og Dreyer (Brilon et al., 1993). Denne formelen er basert på regresjonsanalyse av målinger gjort i Tyskland (Brilon et al., 1997). Justeringsfaktoren blir forklart med at fotgjenger vil ha større påvirkning når det er lavere trafikkmengde. Dette er fordi ved høyere sirkulerende trafikkmengde vil det oppstå litt kø, som gjør at fotgjengere kan passere mellom to kjøretøy som står i kø. De vil da ikke ha like stor påvirkning på kapasiteten, som om et kjøretøy måtte stoppe opp bare på grunn av en fotgjenger (Transportation Research Board, 2022).

Sammenligningen viser at modellene justerer kapasiteten basert på forskjellige faktorer. Ulik geometrisk utforming og trafikkdata kan derfor gi ulik korrigerings av kapasitet i de forskjellige modellene. Valg av eksempel vil derfor påvirke hvordan resultatet fra de ulike modellene vil avvike.

Kølengde:

Beregning av kølengde i de ulike modellene for rundkjøringer gjøres på tilsvarende måte som beregningene av kølengde i forkjørsregulerte kryss. Gjennomgang og sammenligning av beregning av kølengde kan derfor finnes under avsnitt 4.6.2.

Forsinkelse:

Beregning av forsinkelse gjøres også på samme måte i kapasitetsmodellene for rundkjøringer. Unntaket er i HCM der det i modellen for TWSC kryss legges til fem sekunder for å ta hensyn til oppbremsing og akselerasjon. Siden modellen er for stop-kontrollerte kryss må alle kjøretøy stoppe opp før de kan kjøre ut i krysset, uavhengig om det er en ledig luke i den overordnede trafikkstrømmen. Siden rundkjøringer er regulert med vikeplikt er det ikke gitt at man må stoppe opp med vikepliktslinjen. Dette blir justert for ved at tillegget på fem sekunder blir ganget med belastningsgraden som i

køteori er lik sannsynligheten for at man ikke kan kjøre rett ut i krysset når man ankommer vikepliktlinjen.

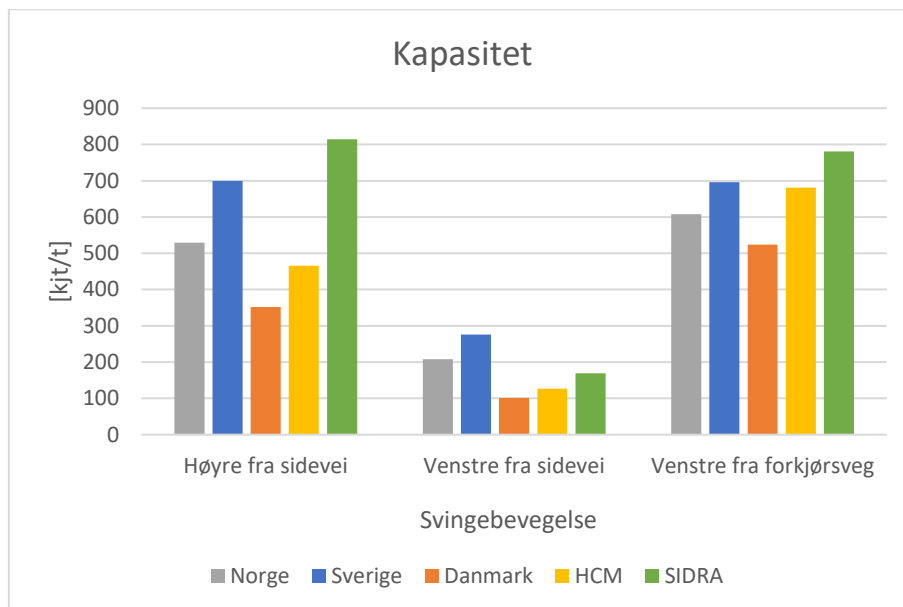
4.7 Beregning av eksempelkryss

Som beskrevet i metodekapittelet skal de ulike kapasitetsmodellene sammenlignes ved beregning av tre eksempelkryss. Detaljer rundt utforming, trafikkmengder og andre relevante opplysninger er gitt i kapittel 3.2.2.

4.7.1 Eksempel 1- T- kryss 1

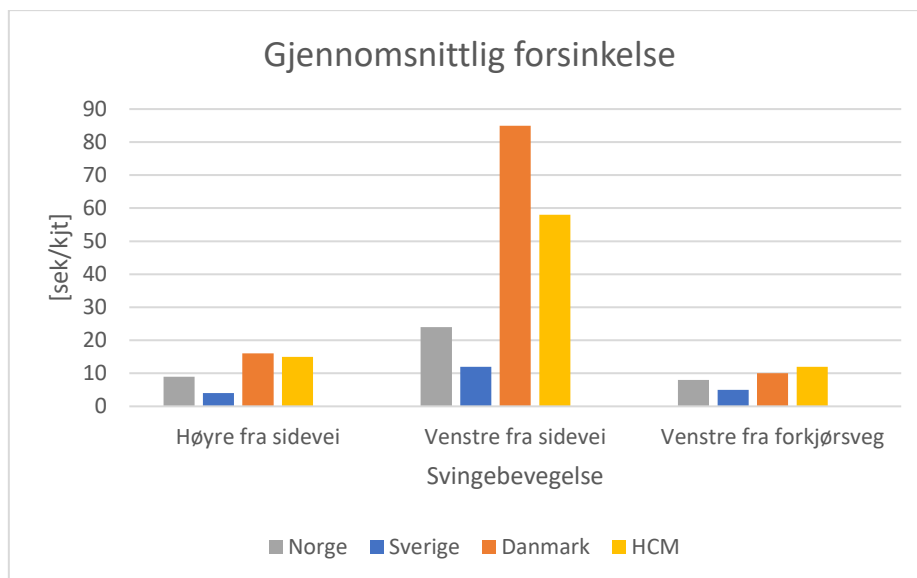
Det første eksempelet er et T-kryss der det er egne kjørefelt til hver svingebevegelse på sideveien, samt for venstresvingene på forkjørsvegen.

Figuren under viser resultater av kapasitetsberegningene med de forskjellige modellene. For venstresving fra forkjørsveg gir modellene relativt like resultater. Det er størst forskjell i resultatene for kapasitet for de som skal svinge til høyre inn på forkjørsveg. Her gir den danske modellen knapt halvparten av kapasiteten som SIDRA gir.



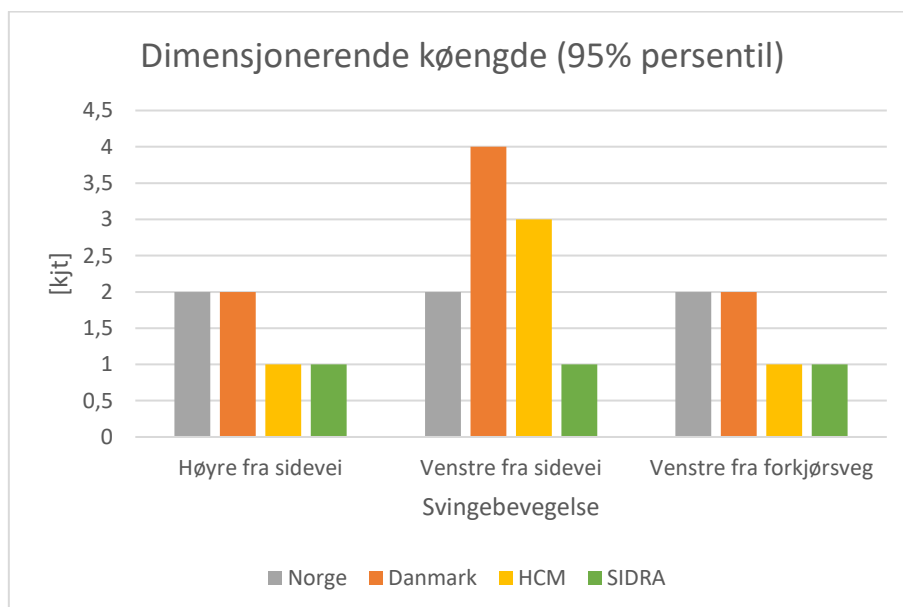
Figur 4.14 Beregnet kapasitet i eksempel 1

I dette eksempelet er det forsinkelsen fra ankomst i krysset til man kjører ut i krysset som menes med «gjennomsnittlig forsinkelse». Altså det som i HCM defineres som «control delay». Derfor er ikke resultatene fra SIDRA inkludert, siden forsinkelsesbegrepet her også inneholder geometrisk forsinkelse. Resultatene fra beregningene er vist i figuren under. Også for den gjennomsnittlige forsinkelsen gir den danske modellen størst forsinkelse for alle svingebevegelsene. Forskjellen er spesielt stor for svingebevegelsen venstresving fra forkjørsveg. Dette kan også delvis forklares med kjøretøysekvivalenter, siden forskjellen blir spesielt stor når det er helning i tilfarten. Da er kjøretøysekvivalenten til tunge kjøretøy på 2,0.



Figur 4.15 Beregnet gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 1

Det siste resultatet som er sammenlignet er 95% kølengde. Det presiseres at i SIDRA beregnes «95% back of queue», mens i de andre modellene beregnes 95% kølengde. Den svenske modellen er ikke med i sammenligningen siden gjennomsnittlig kølengde er det eneste som beregnes i den modellen. Siden kølengden er avhenge av kapasiteten, forklarer dette at den danske modellen gir størst dimensjonerende kølengde.



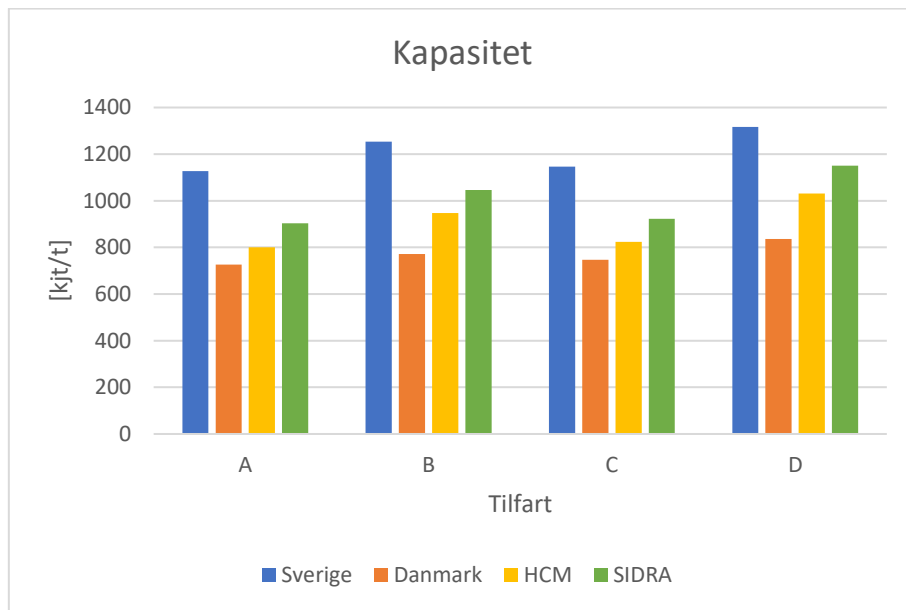
Figur 4.16 Dimensjonerende kølengde i eksempel 1

Sammenligningen viser at modellen gir noe forskjellige resultater for kapasitet, forsinkelse og dimensjonerende kølengde. Det er også tydelige sammenhenger mellom kapasitet, forsinkelse og kølengde. Dette forklares med at kapasitet er inndata i beregningen av kølengde og forsinkelse i alle modellene. Hvilke modeller som ga størst og minst verdier for de ulike parameterne kan være avhenge av blant annet tungtrafikkandel, helning i krysset og fordeling av trafikken. En kan derfor ikke konkludere med at for eksempel den danske modellen vil gi minst kapasitet i alle beregningseksempler. For å kunne se slike trender må flere kryss sammenlignes.

4.7.2 Eksempel 2- Rundkjøring 1

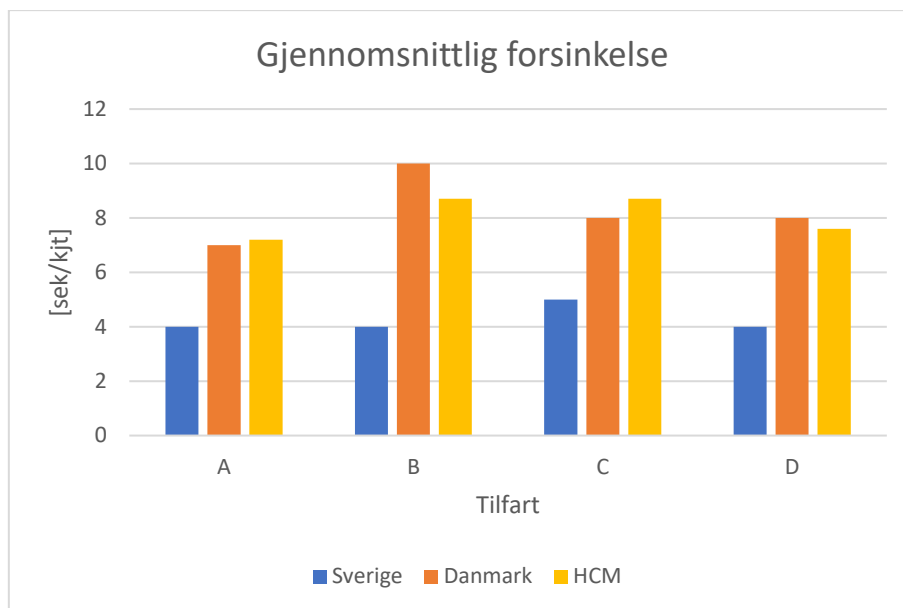
Det andre eksempelet er en rundkjøring med fire tilfarter, et kjørefelt i hver tilfart og et sirkulerende kjørefelt.

Figuren under viser resultatet av beregning av kapasitet i de ulike modellene. I alle tilfartene kan man se den samme trenden i hvilke modeller som gir høyest kapasitet. En mulig forklaring på dette er forskjellen i kritisk tidsluke. Den svenske modellen bruker minst kritisk tidsluke etterfulgt av HCM og dansk modell. I SIDRA modellen er det i dette tilfellet ikke valgt kritisk tidsluke, siden dette blir bestemt av programmet.



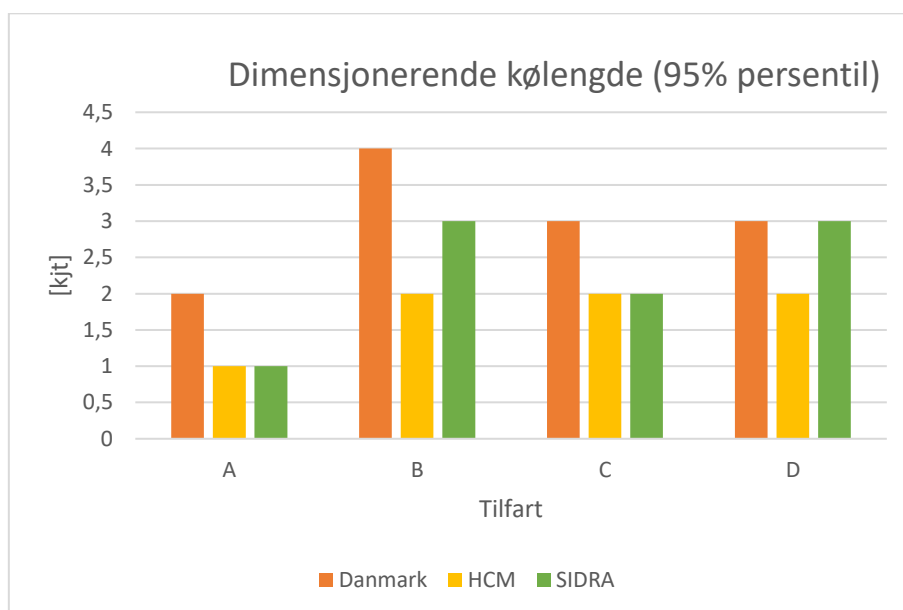
Figur 4.17 Beregnet kapasitet i eksempel 2

Også for den gjennomsnittlige forsinkelsen er det noe forskjeller i resultatene. Spriket mellom størst og minst forsinkelse varierer fra 2 til 6 sekunder. Man kan se en sammenheng mellom kapasitet og den gjennomsnittlige forsinkelsen. Dette er fordi kapasitet inngår som en parameter i beregningen av forsinkelse i alle de tre modellene.



Figur 4.18 Beregnet gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 2

Figuren under viser resultatet for beregningen av dimensjonerende kølengde med de ulike modellene. Som for eksempel 1, er ikke den svenske modellen inkludert i dette resultatet siden det kun beregnes en gjennomsnittlig kølengde. Resultatene fra SIDRA er tatt med selv om det beregnes «95% back of queue» istedenfor 95% kølengde. Selv om det er noe forskjell på resultatene, er den største forskjellen på dimensjonerende kølengde innenfor en tilfart på 2 kjøretøy. Ved en så lav dimensjonerende kølengde som i dette eksempelet, vil ikke forskjellet i resultatet ha så stor betydning. For å bedre se forskjell på modellene, kan det vært nyttig å se på et eksempel med høyere belastningsgrad.

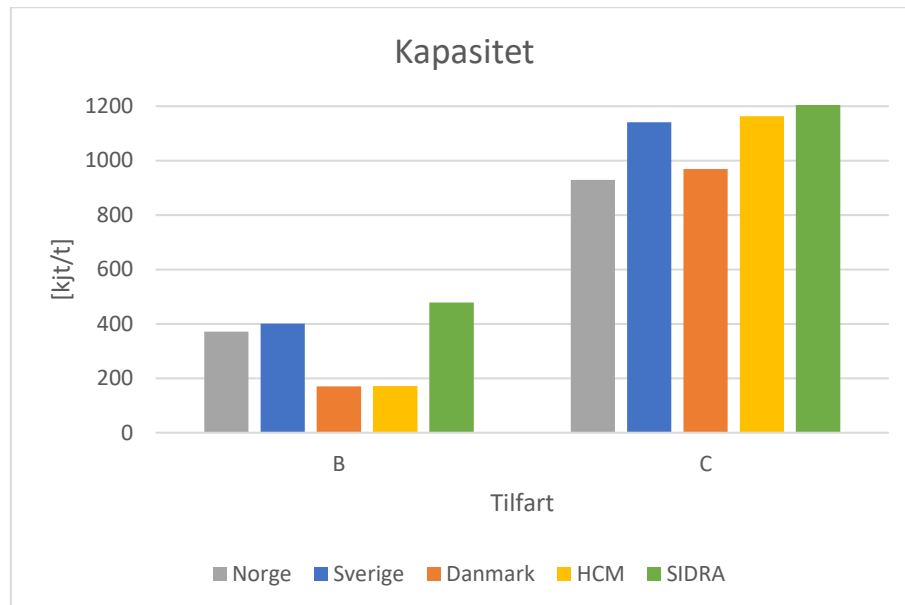


Figur 4.19 Beregnet 95% persentil kølengde i eksempel 2

4.7.3 Eksempel 3- T kryss 2

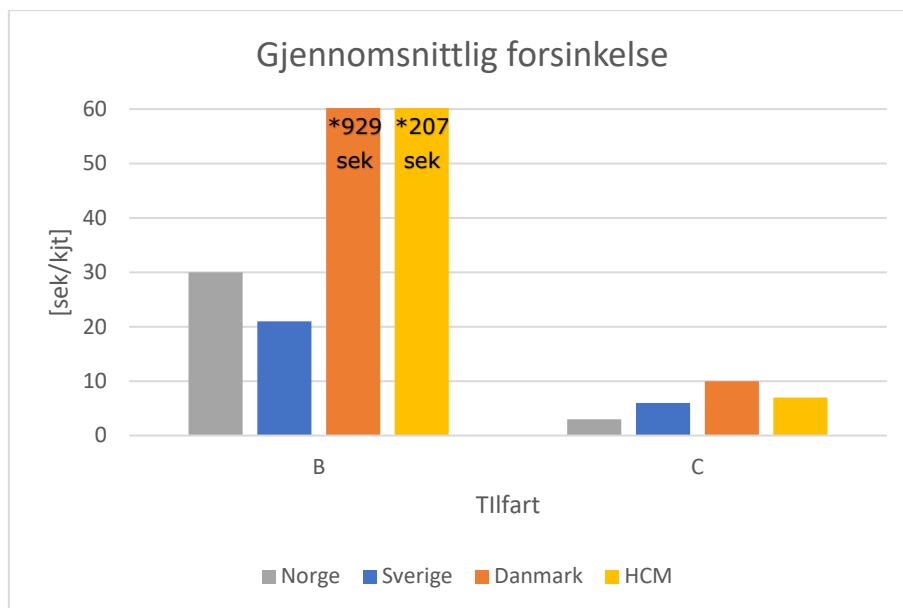
Det tredje eksempelet er en videreutvikling av eksempel 1. Her er det kun et kjørefelt i hver tilfart. Detaljer om krysset er gitt i kapittel 3.2.2.

Figuren under viser resultatet av kapasitetsberegningen i eksempel 3. I tilfart B gir både den danske modellen og HCM en kapasitet som er mindre enn trafikkmengden i makstimen. Det vil si at belastningsgraden er større enn 1, som er definisjonen på overbelastning.



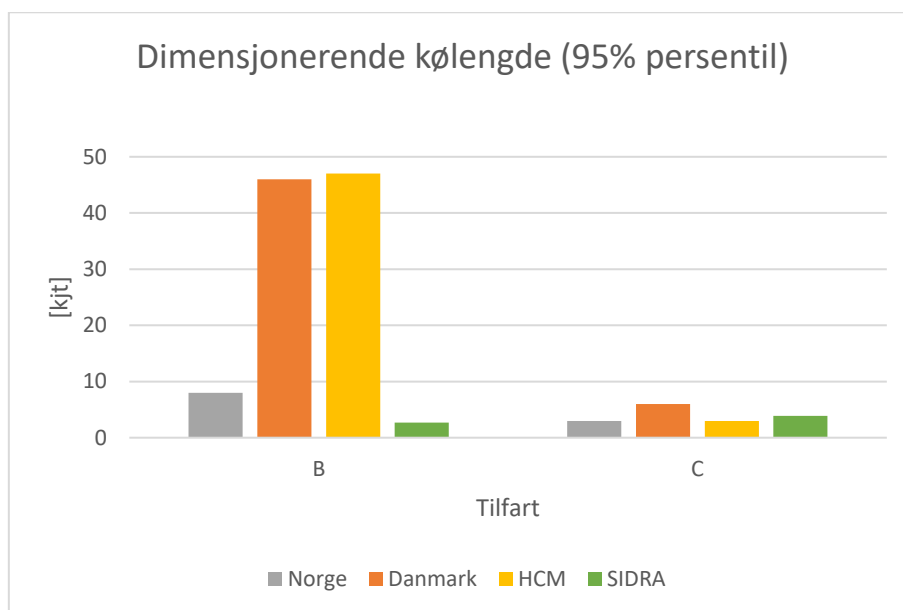
Figur 4.20 Beregnet kapasitet i eksempel 3

Figuren under viser resultatet av beregning av gjennomsnittlig forsinkelse. Som nevnt over er den beregnede kapasiteten i tilfart B mindre enn trafikkmengden i den danske modellen og HCM. For å gjøre figuren mer lesbar er derfor y-aksen i figuren under justert. Den gjennomsnittlige forsinkelsen med den danske modellen er beregnet til å være 929 sekunder/kjt, og med HCM er forsinkelsen beregnet til å være 207 sekunder/kjt i tilfart B. Selv om begge disse modellene ikke er basert på M/M/1 køteori som den gamle norske modellen, blir den beregnede forsinkelsen veldig stor ved overbelastning.



Figur 4.21 Beregnet gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 3 *Y-aksen på figuren er justert siden gjennomsnittlig forsinkelse for dansk modell og HCM er veldig stor

Også for kølengde gir den danske modellen og HCM mye større verdier enn de andre modellene. Dette kommer av at kapasiteten er inngangsdata i beregningen av kølengde.



Figur 4.22 Beregnet dimensjonerende kølengde eksempel 3

Dette eksempelet viser at både den danske modellen og HCM beregner stor gjennomsnittlig forsinkelse og dimensjonerende kølengde ved overbelastning. En kan se en klar forskjell på resultatene fra disse modellene og de andre modellene som ikke beregner en kapasitet som overskrider trafikkmengden. Det kan se ut som det fortsatt er en utfordring for kapasitetsmodellene å beregne forsinkelse og kølengde ved overbelastning, selv om ikke metodene er basert på M/M/1 køteori som den gamle norske modellen.

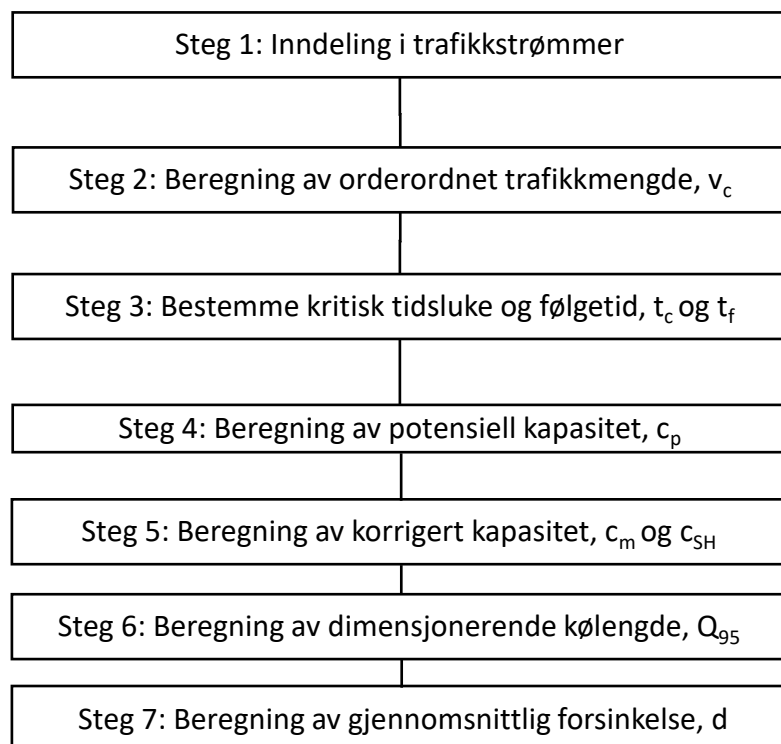
5 Utvikling av grunnmodell

I dette kapitlet skal resultatet av grunnmodellen som er utviklet presenteres. Denne modellen vil være basert på sammenligningen av de internasjonale modellene i kapittel 4. Dette vil svare på det andre forskningsspørsmålet som er hvordan sammenligningen av de internasjonale kapasitetsmodellene kan brukes til å utvikle en ny norsk beregningsmodell.

I hovedsak skal grunnmodellen være et utgangspunkt for utviklingen som skal gjøres videre. Målet med grunnmodellen er at den skal gi tilfredsstillende resultater på standard kryss. Det vil derfor bli gjort en beregning av eksempelkryssene fra 0 for å se om resultatene er i nærheten av resultatene fra de andre kapasitetsmodellene.

5.1 Grunnmodell for forkjørsregulert T-kryss

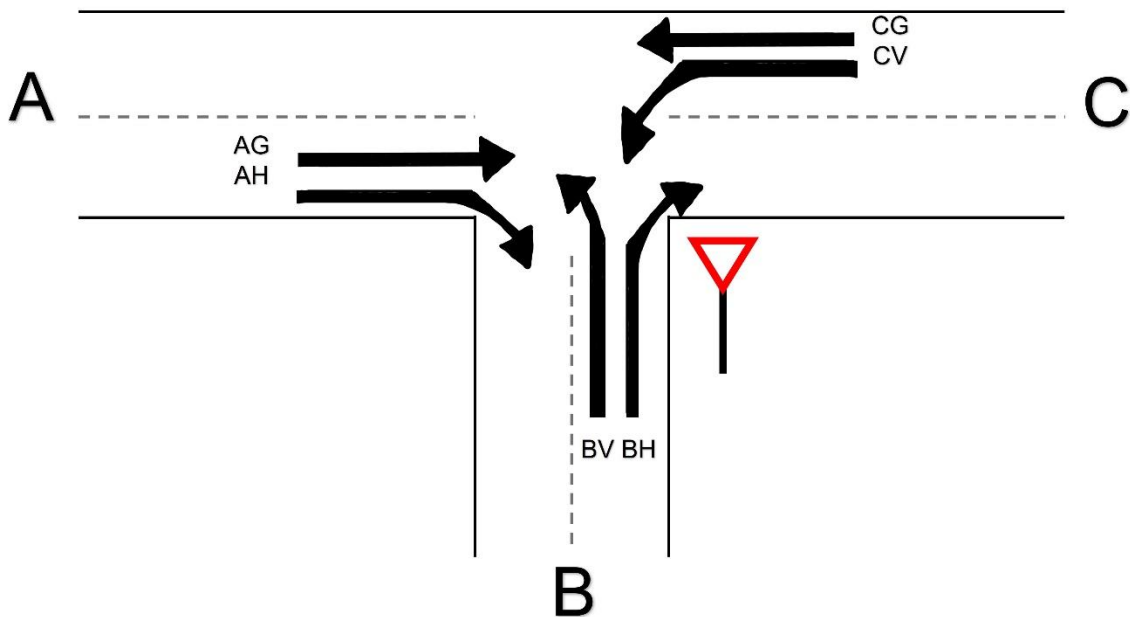
Den gamle norske modellen har i flere likhetstrekk med de kapasitetsmodellene som har blitt studert i denne oppgaven. Den foreslåtte grunnmodellen her vil derfor ha samme beregningsgang som før, men noen av metodene i stegene er endret. Figuren under viser gangen i beregningsmodellen som er foreslått for forkjørsregulerte T-kryss. Videre i dette kapitlet skal metodene i beregningen presiseres, og det skal gjøres rede for hvilke endringer som er foreslått.



Figur 5.1 Beregningsgangen i grunnmodellen

5.1.1 Inndeling i trafikkstrømmer

I det første steget skal trafikken deles inn i ulike trafikkstrømmer. De ulike trafikkstrømmene har tilhørende forkortelser. Første bokstav viser hvilken tilfart de kommer fra, og den andre bokstaven beskriver retningen trafikkstrømmen går i. G betyr gjennom krysset, H betyr høyre og V betyr venstre. En oversikt over de forskjellige trafikkstrømmene i et T-kryss er vist i figuren under.



Figur 5.2 Oversikt over trafikkstrømmer i T-kryss

Trafikkmengden i de ulike trafikkstrømmene føres inn i regnearket under kolonnen trafikkmengde. Enheten for trafikkmengde skal være kjøretøy per time. Dette steget er likt som i den gamle norske metoden.

5.1.2 Beregning av overordnet trafikkmengde

I dette steget skal overordnet trafikkmengde beregnes. Det vil si å legge sammen trafikkmengden i alle de strømmene som den gjeldene trafikkstrømmen må vike for. Flere av kapasitetsmodellene tar hensyn til at utkjørende trafikkstrømmer kan ha innvirkning på kapasiteten. Dette er fordi sjåførene kan være usikre på om de utkjørende bilene faktisk skal kjøre ut, og dermed usikre på om de må vente.

Venstresving fra forkjørsvveg:

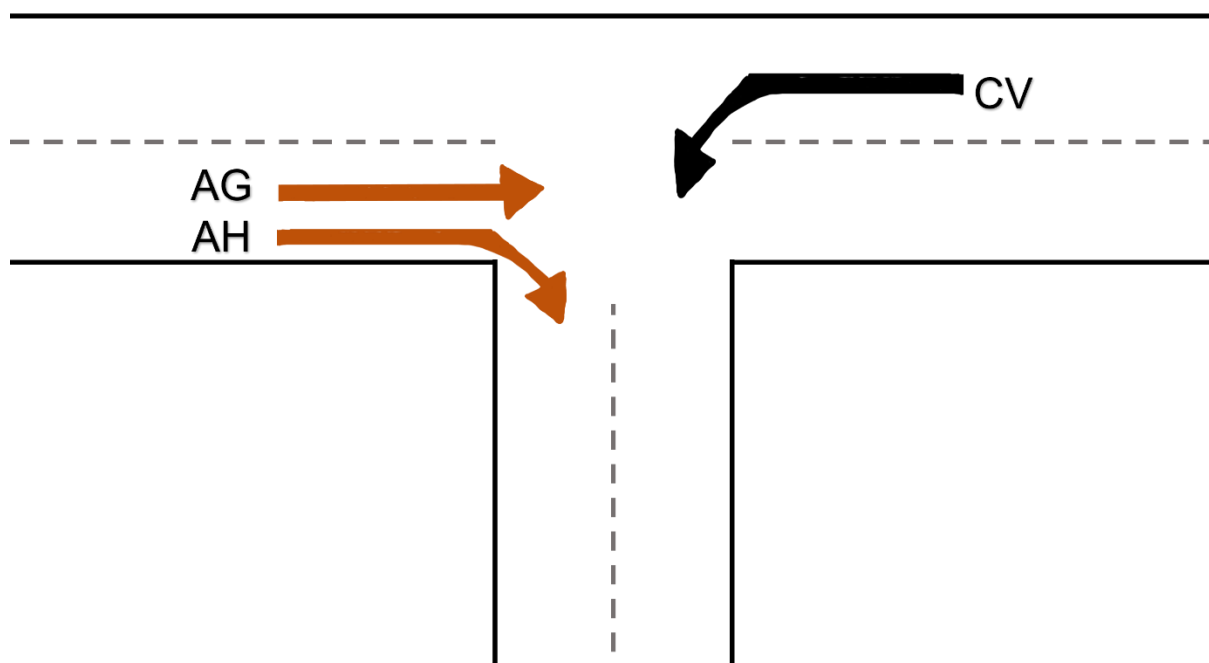
De venstresvingene fra forkjørsvvegen må vike mot både trafikkstrømmene som kjører rett frem og svinger til høyre på forkjørsvvegen. Dette er illustrert i figuren under. Dette er likt med den gamle norske metoden.

Formel 5-1 Overordnet trafikkmengde CV

$$v_{c,CV} = v_{AG} + v_{AH}$$

$$v_{c,i} = \text{Overordnet trafikkmengde for trafikkstrøm } i \left[\frac{kJt}{t} \right]$$

$$v_i = \text{Trafikkmengde i trafikkstrøm } i \left[\frac{kJt}{t} \right]$$



Figur 5.3 Overordnet trafikkmengde CV

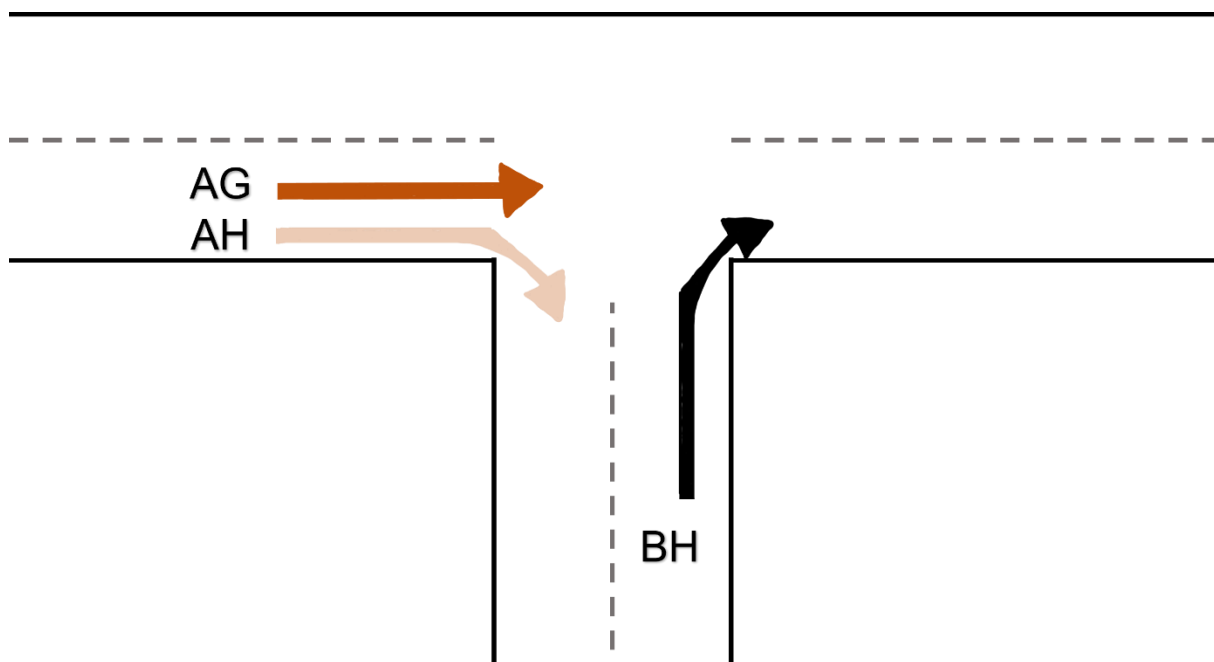
Høyresving fra sidevei:

Høyresvingene fra sideveien må vike for trafikken som skal rett frem i tilfart A. De vil også bli noe påvirket av trafikken som svinger til høyre i tilfart A. Dette kan tas hensyn til ved å legge til denne strømmen ganget med en faktor f . Denne faktoren skal være mellom 0 og 1,0. Vanligvis brukes verdien 0,5. Den gamle norske modellen har en fast faktor på 0,5, men ellers er den overordnede trafikkmengden for BH lik. Det vurderes at det kan være nyttig å ta hensyn til utkjørende trafikkmengde. Samtidig er metoden med å ha en faktor ganget med denne trafikkmengden mer fleksibel enn tidligere der faktoren 0,5 var fast. Dersom det er spesielle forhold som tilsier at de høyresvingene fra sidevegen blir mer eller mindre påvirket av utkjørende trafikkmengde er det nå mulighet for å gjøre tilpasninger.

Formel 5-2 Overordnet trafikkmengde BH

$$v_{c,BH} = v_{AG} + f * v_{AH}$$

f = faktor for utkjørende trafikkmengde []



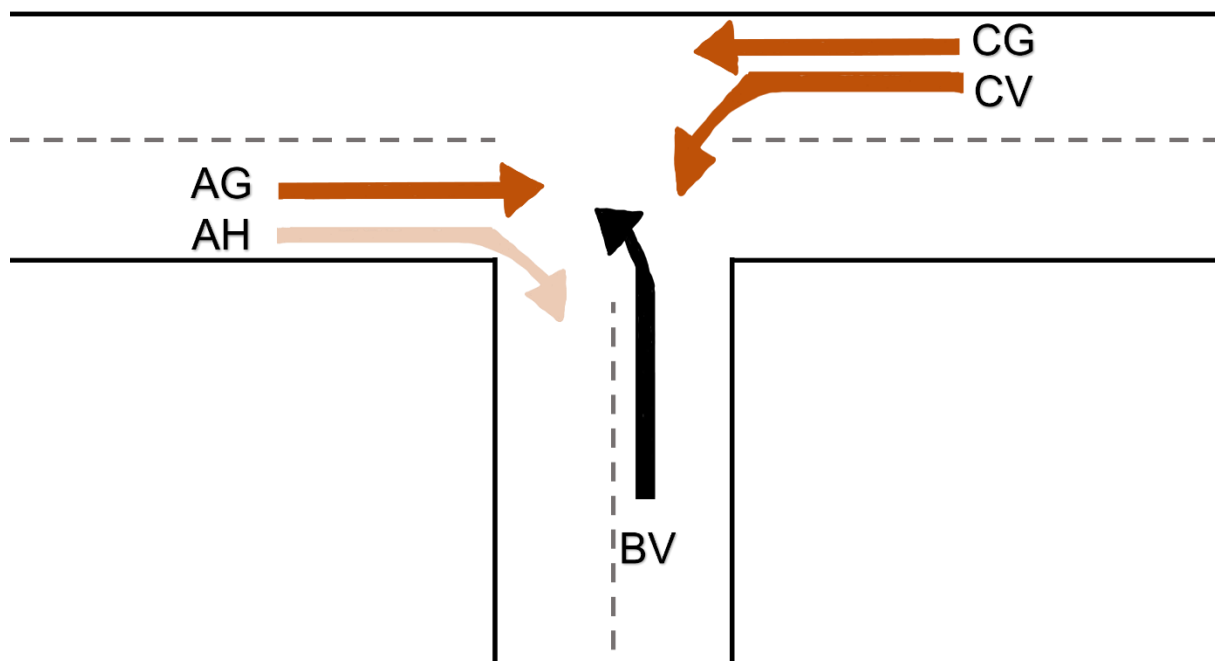
Figur 5.4 Overordnet trafikkmengde BH

Venstresving fra sidevei:

De som svinger venstre fra sideveien må vike for alle strømmer i tilfart C, samt de som kjører rett fram i tilfart A. Også i dette tilfellet kan trafikkstrømmen som kjører til høyre i tilfart A legges til med en faktor f . Faktoren skal være mellom 0 og 1,0. Verdien til faktoren kan bli påvirket av blant annet geometrisk utforming av krysset, bruk av blinklys, fartsgrense og individuelle forskjeller blant sjåførere. I HCM og den gamle norske modellen er standardverdien 0,5, så denne verdien kan brukes som et utgangspunkt. Overordnet trafikkmengde for svingebevegelsen BV er illustrert i figuren under.

Formel 5-3 Overordnet trafikkmengde BV

$$v_{c,BV} = v_{CG} + v_{CV} + v_{AG} + f * v_{AH}$$



Figur 5.5 Overordnet trafikkmengde BV

Som for høyresvingene fra hovedvei er bruken av faktor med på å gjøre modellen mer fleksibel enn tidligere.

5.1.3 Bestemme kritisk tidsluke og følgetid

I dette steget skal kritisk tidsluke og følgetid for hver trafikkstrøm bestemmes. Av nyere feltobservasjoner i Norge, er det er kun funnet en masteroppgave som har estimert kritisk tidsluke og følgetid basert på fem ulike T-kryss (Kerro, 2019). Dette er for få observasjoner til å direkte kunne bruke resultatene i en kapasitetsmodell.

På grunn av manglende datagrunnlag er det derfor foreslått å bruke verdiene fra den gamle norske håndbok 127.

Tabell 5.1 Verdier kritisk tidsluke og følgetid grunnmodell

Svingebevegelse	Kritisk tidsluke [sek]	Følgetid [sek]
Høyresving fra sidevei, BH	5,0	3,0
Venstresving fra sidevei, BV	5,5	3,3
Venstresving fra forkjørsvog, CV	5,0	3,0

I den gamle norske modellen ble basisverdiene justert for reguleringsform, fartsgrense og antall gjennomgående felt på forkjørsvogen. Justeringene er som følger:

Tabell 5.2 Korreksjon for reguleringsform

Svingebevegelse	Vikeplikt	Stopplikt
BH	0 sek	+1,5 sek
BV	0 sek	+1,5 sek
CV	Ingen korreksjon	

Tabell 5.3 Korreksjon for fartsgrense på forkjørsvog

Svingebevegelse	50 km/t	60 km/t	70 km/t	80 km/t	90 km/t
BH, BV, CV	0 sek	+ 0,4 sek	+ 0,8 sek	+ 1,2 sek	+1,6 sek

Tabell 5.4 Korreksjon for antall gjennomgående kjørefelt på forkjørsvogen

Svingebevegelse	2 kjørefelt	4 kjørefelt
BV	0 sek	+0,3 sek
BH, CV	Ingen korreksjon	

Eventuell korreksjon legges sammen med verdier fra Tabell 5.1.

T-kryss etableres ofte ikke ved høye fartsgrenser. Likevel er det tillatt med fartsgrense opptil 90km/t på H2 veger, som beskrevet i avsnitt 2.1.3. Korreksjon for fire gjennomgående kjørefelt på hovedveien vil ikke være aktuelt på nybygde veger. Likevel er korreksjonen inkludert her siden det kan være eksisterende kryss på firfeltsveger. I fremtidig oppdatering av kritisk tidsluke kan det vurderes om korreksjon for høye fartsgrenser og fire kjørefelt skal fjernes.

5.1.4 Beregning av potensiell kapasitet

Potensiell kapasitet til en trafikkstrøm er kapasiteten som beregnes med utgangspunkt i hvor stor trafikkmengde trafikkstrømmen må vike for. Dette beregnes på samme måte for alle svingebevegelser. Den foreslåtte beregningen av potensiell kapasitet er lik som beregning av utgangskapasitet i den gamle norske modellen, og er basert på Harder's formel som beskrevet i avsnitt 2.2.2. Formelen for beregning av potensiell kapasitet for hver trafikkstrøm er vist under.

Formel 5-4 Potensiell kapasitet for trafikkstrøm i

$$c_{p,i} = \frac{v_{c,i} * e^{-\frac{v_{c,i} * t_{c,i}}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_{c,i} * t_{f,i}}{3600}}}$$

c_p = Potensiell kapasitet [kjt/t]

v_c = Overordnet trafikkmengde [kjt/t]

t_c = Kritisk tidsluke [s]

t_f = Følgetid [s]

De to trafikkstrømmene som kjører rett frem på forkjørsvegen har ikke vikeplikt for noen, og har dermed ikke noe overordnet trafikkmengde. Likevel er i ikke kapasiteten uendelig. Når M_f går mot null kan det vises matematisk at brøken går mot $3600/t_f$ (Vejdirektoratet, 2019). Derfor kan kapasiteten for overordnede trafikkstrømmer uttrykkes med formelen under. Med en følgetid på 3 sekunder vil den potensielle kapasiteten være 1200 kjt/t.

Formel 5-5 Potensiell kapasitet for overordnede trafikkstrømmer

$$c_p = \frac{3600}{t_f}$$

Det er nødvendig å beregne kapasitet i disse trafikkstrømmene når det er delt kjørefelt. For å beregne kjørefeltets kapasitet må kapasiteten vektes mellom strømmene i kjørefeltet, og kapasiteten må derfor være kjent i alle trafikkstrømmene.

5.1.5 Korrigert kapasitet

Potensiell kapasitet beregnet i punktet over må korrigeres dersom det er kødannelse i overordnede strømmer. I et T-kryss er det bare kapasiteten for venstresvingene inn på forkjørsvegen som må korrigeres. Denne trafikkstrømmen må korrigeres for kødannelse i trafikkstrømmen venstresvingene fra forkjørsveg. Dette gjøres med å gange med sannsynligheten for at den overordnede trafikkstrømmen er i køfri tilstand. For de andre trafikkstrømmene er den korrigerede kapasiteten lik utgangskapasiteten. Denne metoden er lik som den gamle norske modellen.

Formel 5-6 Kapasitet for trafikkstrøm AH, AR, BH, CV, og CR

$$c_m = c_{p,i}$$

c_m = Kapasitet for svingebevegelsen (movement)[kjt/t]

Formel 5-7 Korrigert kapasitet for trafikkstrøm BV

$$c_{m,BV} = c_{p,BV} * \left(1 - \frac{v_{CV}}{c_{m,CV}}\right)$$

Dersom flere trafikkstrømmer deler kjørefelt, må det beregnes en samlet kapasitet for kjørefeltet. Dette gjøres ved å vekte kapasiteten til trafikkstrømmene med trafikkmengden (Transportation Research Board, 2022). Beregningen av kjørefeltkapasiteten gjøres på samme måte som i den gamle norske modellen.

Formel 5-8 Kapasitet delt kjørefelt

$$c_{SH} = \frac{\sum \text{trafikkmengder}}{\sum \text{belastningsgrader}}$$

$$c_m = \text{Kapasitet for kjørefelt (shared line) [kjt/t]}$$

I videre beregning av dimensjonerende kølengde og forsinkelse er det kjørefeltets samlede kapasitet og trafikkmengde som skal benyttes. I de tilfellene der trafikkstrømmen har sitt eget kjørefelt er kjørefeltets kapasitet lik trafikkstrømmens kapasitet.

5.1.6 Dimensjonerende kølengde

Dimensjonerende kølengde er valgt som parameter siden det er nyttig å kjenne til ved valg av kryssutforming og vurdering av krysstype. 95% persentil kølengde vil si at kølengden er mindre enn denne verdien i 95% av beregningsperioden. Det optimale hadde vært å beregne 99% eller 100%, men det kan ofte føre til kostbare løsninger. Derfor må man akseptere at kølengden i en liten periode kan være stor. Dersom beregningsperiodens lengde er 60 minutter, og man bruker 95% persentil vil det si at køen er lengre enn den dimensjonerende kølengden i tre minutter i makstimen.

I denne modellen er det valgt å benytte samme formel som i HCM og den danske modellen for å beregne dimensjonerende kølengde. 95% persentil for kølengde blir dermed:

Formel 5-9 Dimensjonerende kølengden 95% persentil

$$Q_{95} = 900 * T * \left(x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)(x)}{150 * T}} \right) * \left(\frac{c_{m,x}}{3600}\right)$$

$$Q_{95} = 95\% \text{ persentil kølengde (queue length) [kjt]}$$

$$x = \text{Belastningsgrad []}$$

$$T = \text{Beregningsperiodens lengde [t]}$$

Metoden for å beregne dimensjonerende kølengde er annerledes enn i den tidligere norske modellen. Siden den dimensjonerende kølengden var basert på M/M/1 køteori vil dette gi urealistiske resultater ved høye belastningsgrader, og er derfor nødvendig å endre på i en oppdatert modell.

5.1.7 Forsinkelse

I denne modellen er det valgt å kun ta hensyn til interaksjonsforsinkelsen, altså den forsinkelsen som oppstår på grunn av konflikt med andre trafikkstrømmer. For å bedre ta

hensyn til høyere belastningsgrader er forsinkelsesformelen hentet fra tidsavhengig køteori og koordinattransformasjonsmetoden. Metoden som er valgt i denne modellen er lik den danske, som igjen nesten er lik som den svenske modellen og HCM. Den gjennomsnittlige forsinkelsen til et kjøretøy kan derfor definert som:

Formel 5-10 Gjennomsnittlig forsinkelse

$$d = \frac{T}{c_m} + \frac{T}{4} * \left((x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8 * x}{c_m}} \right)$$

$d =$ Gjennomsnittlig forsinkelse (control delay) [s]

Dette fraviker også beregning av gjennomsnittlig forsinkelse i den gamle norske modellen. Dette er fordi den gamle norske modellen er basert på M/M/1 køteori og kapasitetsreserve som gir urealistiske resultater når trafikkmengden nærmer seg kapasiteten.

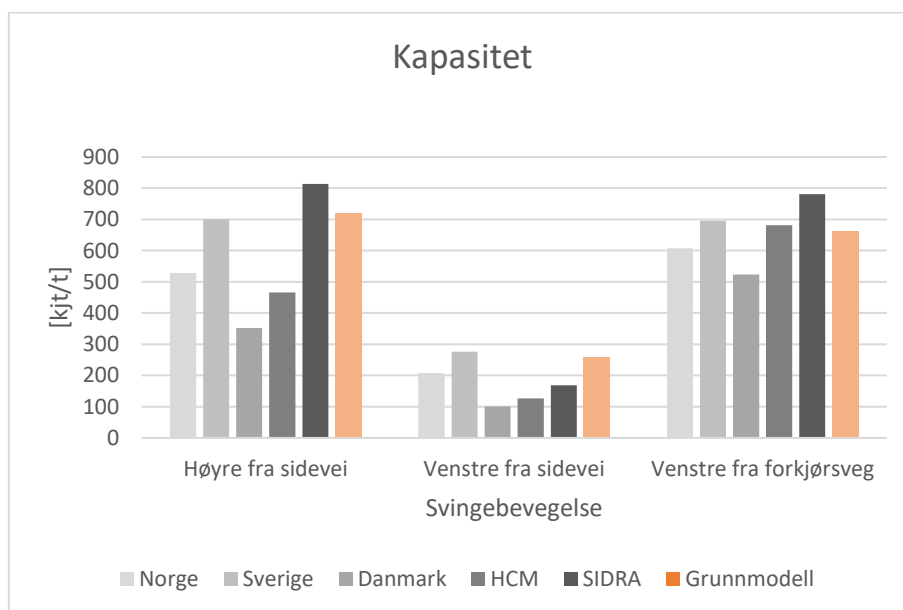
5.1.8 Beregning av eksempelkryss

I kapittel 0 ble det gjort beregninger i to ulike eksempelkryss for forkjørsregulerte T-kryss. Den foreslåtte grunnmodellen skal beregnes med de samme eksemplene for å se om resultatet er i nærheten av de andre kapasitetsmodellene.

Eksempel 1: T- kryss 1

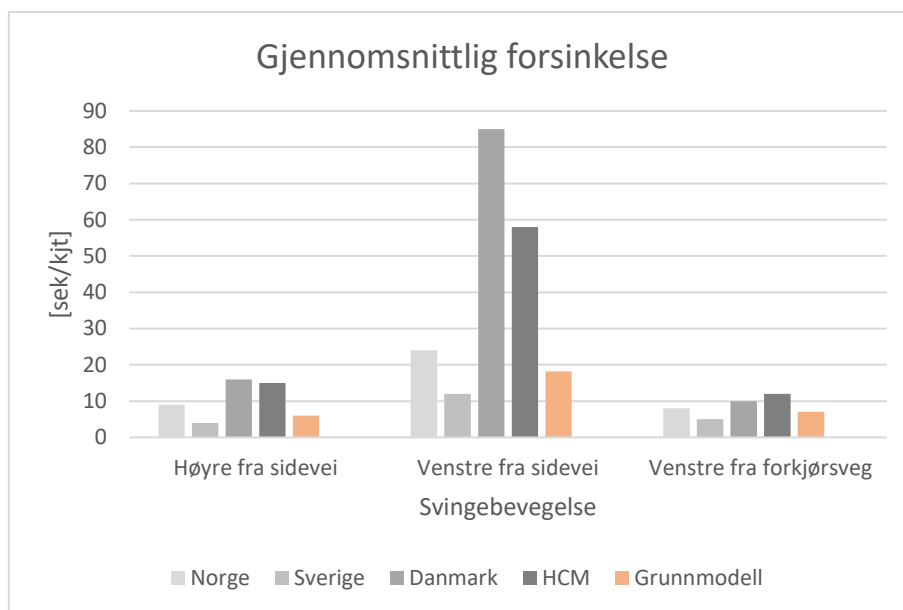
Beskrivelsen av det første T-krysset og relevante opplysninger om det finnes under kapittel 3.2.2.

Figuren under viser resultatet av kapasitet med grunnmodellen mot de andre modellene. Som figuren viser, gir grunnmodellen litt høyere enn gjennomsnittlig kapasitet med de andre modellene. En forklaring på dette er at grunnmodellen ikke tar hensyn til kjøretøyskategorier. I dette eksempelet er det 15% tunge kjøretøy, som vil redusere kapasiteten.



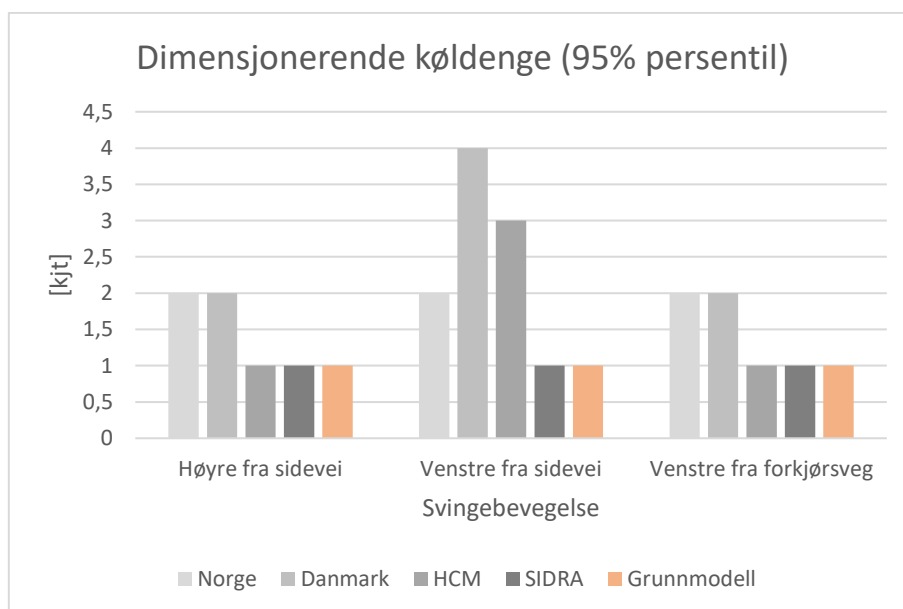
Figur 5.6 Sammenligning av kapasitet i eksempel 1

Også for gjennomsnittlig forsinkelse gir grunnmodellen resultater som er i nærheten av de andre modellene. Dette er fordi alle modellene beregnet gjennomsnittlig forsinkelse basert på kapasitet.



Figur 5.7 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 1

Figuren under viser resultat fra beregningen av dimensjonerende kølengde for grunnmodellen. Også her gir grunnmodellen resultater som ligger rundt resultatene fra de andre beregningsmodellene.

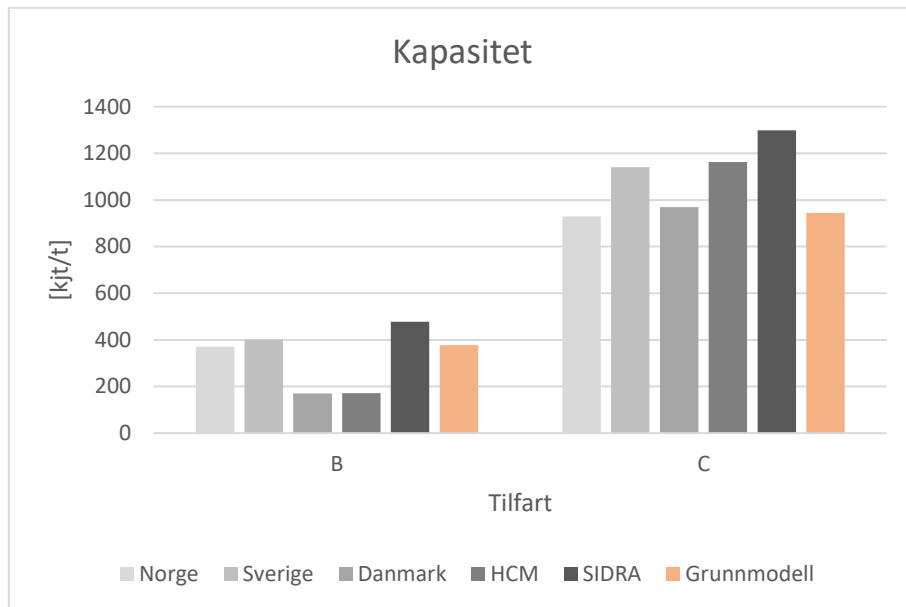


Figur 5.8 Sammenligning av dimensjonerende kølengde eksempel 1

Eksempel 3: T- kryss 2

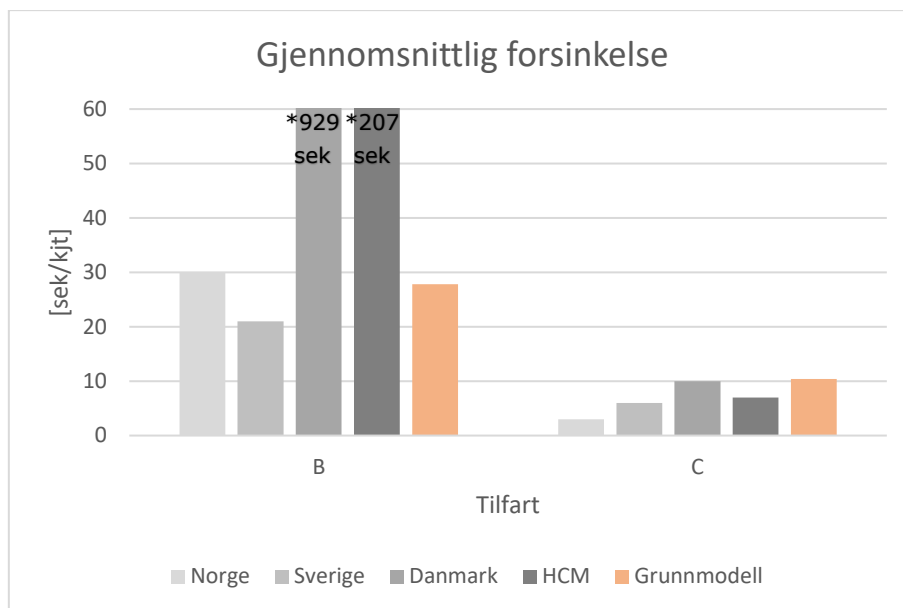
Det andre T-krysset er et kryss med kun et kjørefelt i alle tilfartene. Andre relevante opplysninger om krysset er gitt i kapittel 3.2.2.

Figuren under viser en sammenligning av resultatet fra grunnmodellen mot de andre kapasitetsmodellene. Også for dette eksempelet ligger resultatet fra grunnmodellen rundt snittet av de andre modellene. Relativt til de andre modellene ligger kapasiteten litt lavere i dette eksempelet enn i eksempel 1. Dette kan forklares med at det er en lavere tungtrafikkandel i dette eksempelet, som gjør at forskjellen mellom grunnmodellen og de andre modellene blir mindre.



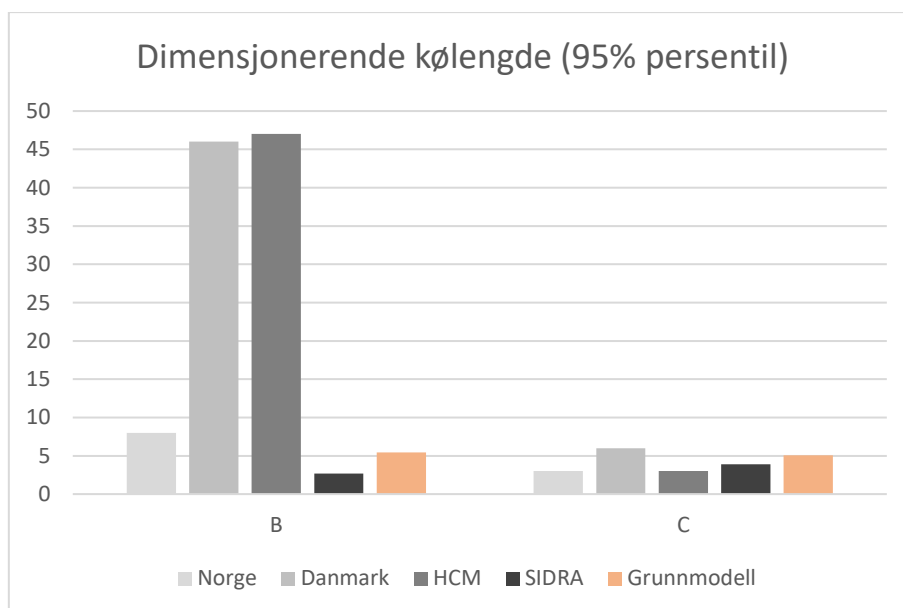
Figur 5.9 Sammenligning av kapasitet i eksempel 3

Figuren under viser at den gjennomsnittlige forsinkelsen i tilfart B for grunnmodellen ligger rundt resultatene fra de kapasitetsmodellene som ikke gir overbelastning i dette kjørefeltet. I tilfart C er den beregnede gjennomsnittlige forsinkelsen også rundt snittet av de andre kapasitetsmodellene.



Figur 5.10 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 3 *Y-aksen på figuren er justert siden gjennomsnittlig forsinkelse for dansk modell og HCM er veldig stor

Også for den dimensjonerende kølengden i tilfart B gir grunnmodellen resultater som ligger i nærheten av den norske modellen og SIDRA. I tilfart C gir grunnmodellen relativt likt resultat som de andre modellene.



Figur 5.11 Sammenligning av dimensjonerende kølengde i eksempel 3

5.1.9 Utfordringer med grunnmodellen

Som nevnt i metodekapittelet kan det være en utfordring å sette sammen en ny kapasitetsmodell basert på «klipp og lim» fra andre metoder. Det har derfor vært ekstra fokus på å ikke inkludere noe to ganger, eller ikke inkludere en viktig parameter. I arbeidet med grunnmodellen har dette gått fint, siden metodene har mange fellestrekk. De fleste endringer som har blitt gjort er basert på hvordan det gjøres i flere av modellene.

Testing av modellen mot eksempelkryssene viser at grunnmodellen gir resultater som er i nærheten av de andre kapasitetsmodellene. Dette er et bra utgangspunkt for videre arbeid med modellen. De to eksemplene har 10% og 15% andel tunge kjøretøy, som er en forklaring på at kapasiteten kan være noe overestimert i grunnmodellen. Hvordan man på best mulig måte tar hensyn til ulike kjøretøyskategorier må undersøkes i videre arbeid.

En svakhet med grunnmodellen er at fotgjengere og syklister ikke er inkludert. Dette er ikke inkludert i grunnmodellen siden det gjøres forskjellig i de ulike kapasitetsmodellene. Det er derfor nødvendig å gjøre videre undersøkelser før det inkluderes i modellen. Dette hadde ikke utslag på eksemplene som ble beregnet, siden de ikke inneholder fotgjengere.

Beregning av eksempel 3 viser at den danske modellen og HCM gir store forsinkelser og kølengder når en tilfart er overbelastet. Metoden for å beregne kølengder i grunnmodellen er basert på hvordan det gjøres i den danske modellen og HCM. Selv om ikke forsinkelsen går mot uendelig når tilfarten er overbelastet, viser eksempelet at forsinkelsen blir veldig stor. I det videre arbeidet skal det derfor undersøkes om det finnes metoder som er bedre på å estimere kø og forsinkelse når belastningen er stor.

En annen forenkling som er gjort i grunnmodellen er å bruke gamle verdier for kritisk tidsluke og følgetid. Som tidligere forklart, er dette gjort fordi det ikke finnes nyere nasjonale observasjoner. Siden den norske kapasitetshåndboken er fra 1985 er disse observasjonene rundt 40 år gamle eller eldre. Mye kan ha skjedd med både kjøretøyparken og sjåføroppførsel, som kan gjøre at verdiene er annerledes i dag. For eksempel kan nye biler akselerere raskere, som gjør at man kan akseptere en kortere tidsluke. I videre arbeid bør det derfor gjøres nye nasjonale undersøker av kritisk tidsluke. Det ble ikke prioritert å bruke tid på feltobservasjoner i denne oppgaven, siden det krever observasjoner i mange kryss for å fastslå verdier. Kritisk tidsluke og følgetid kun er parametere i kapasitetsmodellen, som gjør det enkelt å bytte ut til nye verdier på et senere tidspunkt.

Siden verdiene av kritisk tidsluke kan være usikre er det gjennomført en sensitivitetsanalyse for å se på hvordan endring av kritisk tidsluke påvirker kapasiteten. Dette er gjort fordi verdiene som er valgt for kritisk tidsluke er fra den gamle norske modellen, og dermed er det usikkerhet knyttet til verdiene. Tabellen nedenfor viser resultatet av hvordan kapasiteten endrer seg når kritisk tidsluke endres med 10% fra standard-verdiene. Positiv endring i kritisk tidsluke vil si at kritisk tidsluke blir lengre, og negativ endring vil si at kritisk tidsluke blir kortere.

Tabell 5.5 Sensitivitet endring av kritisk tidsluke

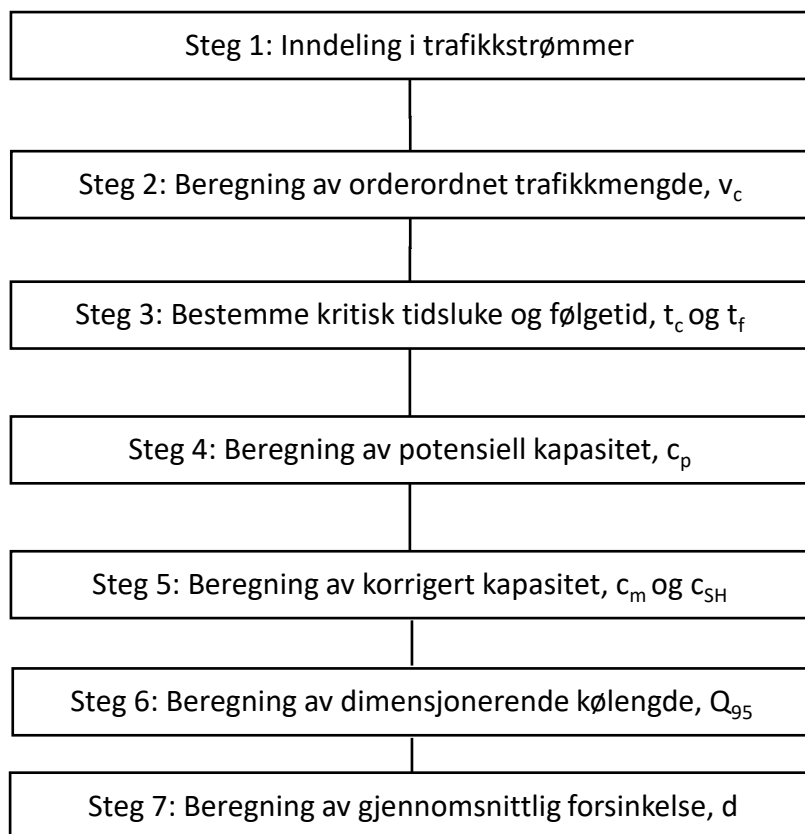
Ending i kritisk tidsluke	Kapasitet BV [kjt/t]	Kapasitet BH [kjt/t]	Kapasitet CV [kjt/t]
0	258 ()	718 ()	663
-10%	318 (+23%)	841 (+17%)	782 (+22%)
+10 %	209 (-19%)	620 (-14%)	567 (-17%)

Beregningen viser at endring i kritisk tidsluke har større innvirkning når kapasiteten er lavere. I de fleste tilfellene over er endring av kapasitet prosentvis større enn endring i kritisk tidsluke. Med en kritisk tidsluke på 5 sekunder vil en 10% endring tilsvare 0,5 sekunder. Eksempelet over viser at denne lille endringen i kritisk tidsluke har en del innvirkning på kapasiteten. Det er derfor viktig at verdiene som brukes er så riktige som mulig.

Alt i alt, har grunnmodellen tatt tak i flere av utfordringene fra den gamle norske modellen. Selv om det er gjort en del forenklinger, viser testing mot andre kapasitetsmodeller at grunnmodellen gir akseptable resultater som ligger i nærheten av resultatene fra de andre kapasitetsmodellene. For å gjøre modellen mer fullstendig er det likevel nødvendig å videreutvikle modellen.

5.2 Grunnmodell for rundkjøring

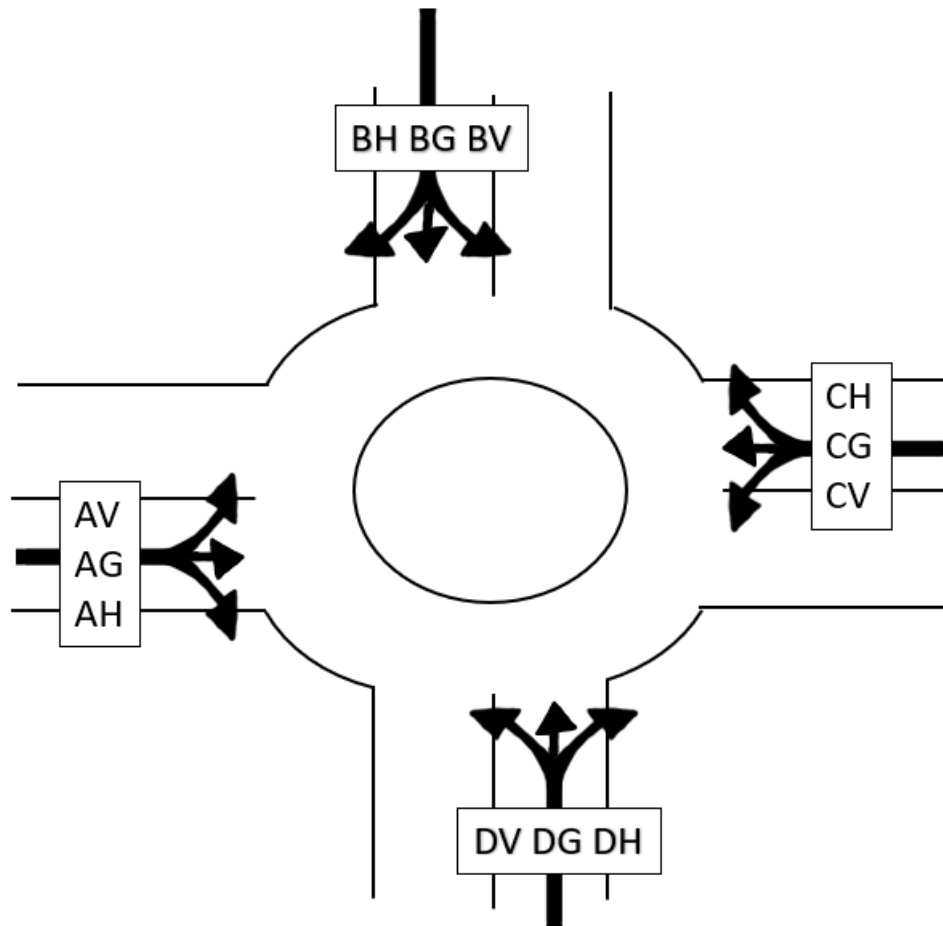
Som tidligere beskrevet er den gamle norske metode R for rundkjøringer ikke brukbar i dag siden den bygger hvordan rundkjøringer ble utformet før i tiden. Det er derfor nødvendig å bygge opp en helt ny grunnmodell. De internasjonale modellene som er undersøkt er alle basert på kritisk tidsluke-teori. Den foreslåtte grunnmodellen for rundkjøringer vil derfor ha relativt lik oppbygning som modellen for forkjørsregulerte kryss. I gjennomgangen av modellen vil det ikke bli spesifisert hva forskjellene fra den gamle norske modellen er, siden modellen er bygd opp på en annen måte. Et flytskjema som viser den foreslåtte beregningsgangen er vist i figuren under.



Figur 5.12 Beregningsgang i grunnmodell rundkjøringer

5.2.1 Inndeling i trafikkstrømmer

En rundkjøring består vanligvis av tre eller fire armer. Figuren under viser en rundkjøring med fire armer, men beregninger vil også kunne gjøres i en rundkjøring med tre armer. Modellen er tilpasset et eller to innkjørende, utkjørende og sirkulerende kjørefelt.



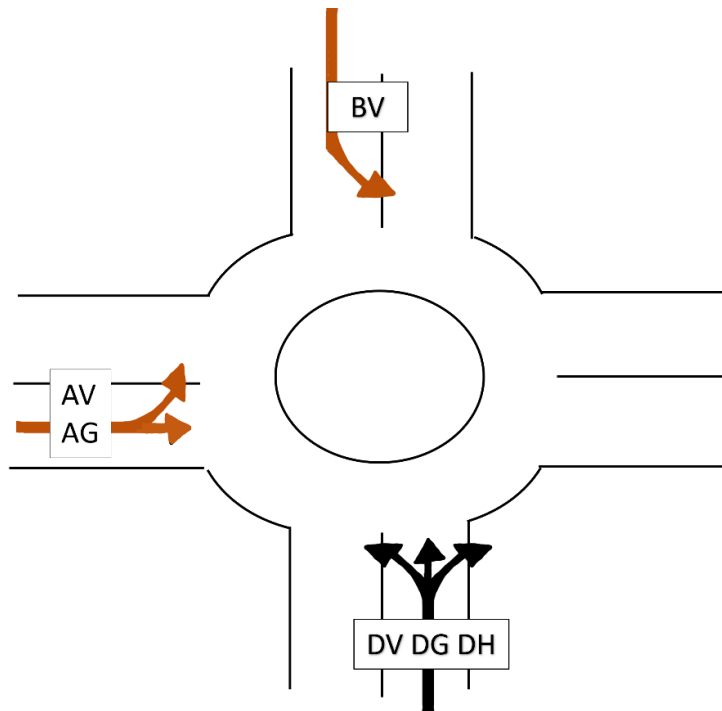
Figur 5.13 Trafikkstrømmer i en rundkjøring

De ulike trafikkstrømmene har tilhørende forkortelser som vist i figuren over. Første bokstav viser hvilken tilfart de kommer fra, og den andre bokstaven beskriver retningen trafikkstrømmen går i. G betyr gjennom rundkjøringen, H betyr til høyre og V betyr til venstre.

5.2.2 Beregning av overordnet trafikkmengde

Det første steget i beregningen vil være å finne den overordnede trafikkmengden. Det vil si hvor mange sirkulerende kjøretøy som må vikes for. I teorien må de innkjørende kjøretøyene i høyre kjørefelt kun vike for kjøretøy i det ytre sirkulerende kjørefeltet. I praksis er det mange sjåførere som også vil avvende dersom det er kjøretøy i det indre kjørefeltet, siden de kan være usikre på hvor kjøretøyene skal. Det er derfor flere av de internasjonale modellene som regner all sirkulerende trafikkmengde foran tilfarten som overordnet trafikkmengde. I grunnmodellen er også denne forenklingen gjort. Den overordnede trafikkmengden vil derfor være summen av rett frem og høyresvingene kjøretøy fra tilfarten til venstre, og venstresvingene kjøretøy i tilfarten rett ovenfor.

Figuren under viser eksempel for overordnet trafikkmengde for trafikkstrømmene i tilfart D.



Figur 5.14 Overordnet trafikkmengde tilfart D i rundkjøring

Strømmene i tilfart D markert i svart, må vike for strømmene markert i rødt. Med den antakelsen som er gjort, vil alle trafikkstrømmene i samme tilfart ha lik overordnet trafikkmengde.

5.2.3 Bestemme kritisk tidsluke og følgetid

I dette steget skal kritisk tidsluke og følgetid bestemmes. I grunnmodellen for forkjørsregulerte T-kryss ble det foreslått å bruke verdier fra den gamle norske modellen. Den gamle norske modellen for rundkjøringer er som tidligere beskrevet ikke bygget på kritisk tidsluke- teori, og har derfor ikke verdier for kritisk tidsluke og følgetid. Det er heller ikke funnet andre norske studier som har estimert disse verdiene for rundkjøringer.

Det er derfor foreslått å bruke verdier fra en av de internasjonale kapasitetsmodellene. Av disse velges den danske modellen siden det antas at trafikantatferden der er likere norske forhold enn i USA. Den danske velges ovenfor den svenske siden den danske håndboken er nyere. Tabellen under er hentet fra «Kapacitet og serviseniveau» (Tabell 5.2 i den danske håndboken). Det finnes ikke verdier for kritisk tidsluke ovenfor sykkel i tabellen når det er to kjørefelt, siden det antas at det ikke er sykler i kjørebanelen i rundkjøringen.

Tabell 5.6 Foreslåtte verdier for kritisk tidsluke i grunnmodellen for rundkjøringer

Tilfart	Beliggenhet	Kritisk tidsluke ovenfor kjøretøy [sek]	Kritisk tidsluke ovenfor sykler[sek]	Følgetid [sek]
Et kjørefelt	By	5,1	2,5	3,0
Et kjørefelt	Landlig	4,7	2,5	3,0

To kjørefelt	By	4,2		2,6
To kjørefelt	Landlig	4,0		2,6

5.2.4 Beregne kapasitet og kapasitetskorreksjon

Potensiell kapasitet i den enkelte trafikkstrømmen kan beregnes på samme måte som i forkjørsregulerte kryss, og er avhenge av overordnet trafikkmengde, kritisk tidsluke og følgetid.

Formel 5-11 Potensiell kapasitet for hver trafikkstrøm

$$c_{p,i} = \frac{v_{c,i} * e^{-\frac{v_{c,i} * t_{c,i}}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_{c,i} * t_{f,i}}{3600}}}$$

c_p = Potensiell kapasitet [kjt/t]

v_c = Overordnet trafikkmengde [kjt/t]

t_c = Kritisk tidsluke [s]

t_f = Følgetid [s]

5.2.5 Kapasitetskorreksjon

I modellene som er gjennomgått i tidligere kapitler blir den potensielle kapasiteten korrigeret med en korreksjonsfaktor. Hva som bestemmer korreksjonsfaktoren er forskjellig de de ulike modellene, men i hovedsak baseres den på antall myke trafikanter og geometrisk utforming. Effekten av dette skal undersøkes i arbeidet med videreutvikling av modellen. Det vil derfor ikke være kapasitetskorreksjon i grunnmodellen.

Formel 5-12 Kapasitet for hver trafikkstrøm i grunnmodellen

$$c_{m,i} = c_{p,i}$$

c_m = Kapasitet for svingebevegelsen (movement) [kjt/t]

Etter kapasiteten for hver trafikkstrøm er beregnet, kan kapasiteten til hele kjørefeltet beregnes. Kjørefeltkapasiteten beregnes med formelen under.

Formel 5-13 Kjørefeltkapasiteten for delt kjørefelt

$$c_{SH} = \frac{\sum \text{trafikkmengder}}{\sum \text{belastningsgrader}}$$

c_{SH} = Kapasitet for kjørefeltet (shared line) [kjt/t]

Kapasiteten for delt kjørefelt beregnes på samme måte som forkjørsregulerte kryss.

5.2.6 Dimensjonerende kølengde

Den dimensjonerende kølengden kan beregnes på samme måte som i forkjørregulerte kryss. Formelen for beregning er gitt under. Kølengden som beregnes er 95% persentil, som tilsier at statistisk sett er køen bare lengre i 5% av beregningsperioden.

Formel 5-14 95% persentil kølengde

$$Q_{95} = 900 * T * \left(x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,i}}\right)(x)}{150 * T}} \right) * \left(\frac{c_{m,i}}{3600}\right)$$

Q_{95} = 95% persentil kølengde (queue length) [kjt]

T = Beregningsperiodens lengde [t]

x = Belastningsgrad []

5.2.7 Forsinkelse

Den gjennomsnittlige forsinkelsen kan også beregnes på samme måte som i modellen for forkjørregulerte kryss. Formelen for beregning av gjennomsnittlig forsinkelse er gitt under.

Formel 5-15 Gjennomsnittlig forsinkelse

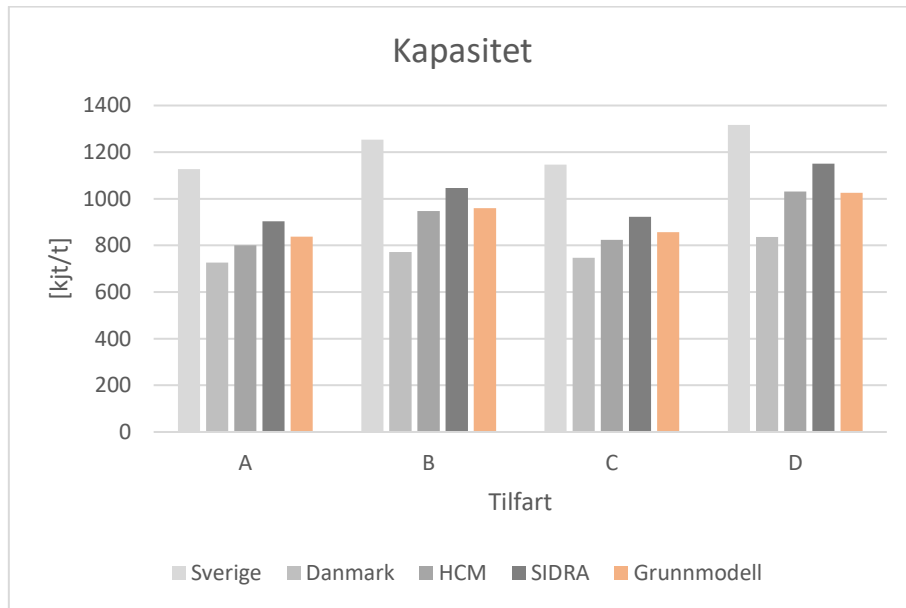
$$d = \frac{T}{c_m} + \frac{T}{4} * \left((x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8 * x}{c_m}} \right)$$

d = Gjennomsnittlig forsinkelse (control delay) [s]

5.2.8 Beregning av eksempelkryss

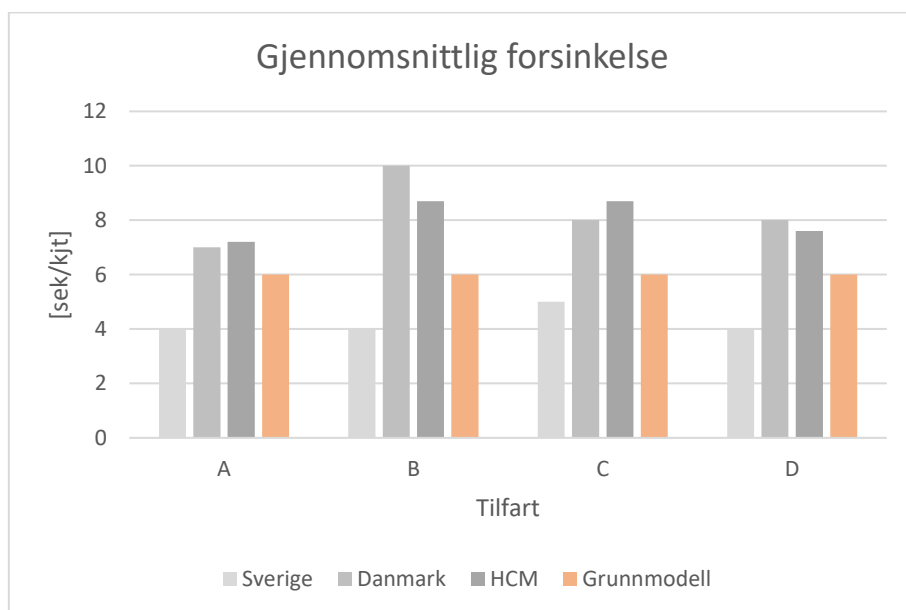
Et mål med grunnmodellen er at den skal være et godt utgangspunkt for videre arbeid. Det er derfor viktig at grunnmodellen gir resultater som er i nærheten av andre kapasitetsmodeller. Grunnmodellen for rundkjøringer er derfor også testet opp mot eksempelkryss som ble beregnet tidligere.

Eksempel 2 fra kapittel 0 er en rundkjøring med et sirkulerende kjørefelt. Mer detaljert informasjon om rundkjøringen er gitt i avsnitt 3.2.2. Som figuren under viser, ligger kapasiteten i alle tilfarter rundt middelerdien av andre modellene.

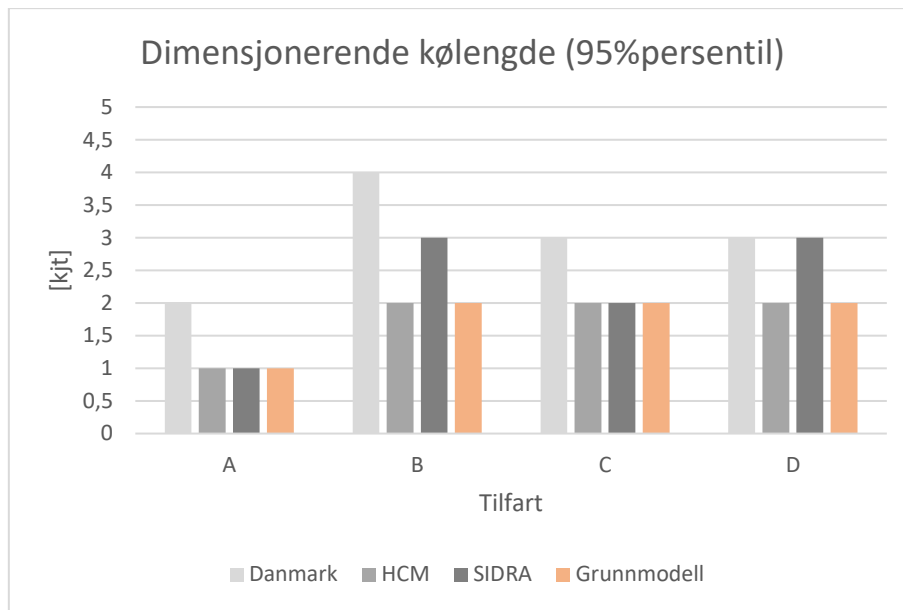


Figur 5.15 Sammenligning av kapasitet i eksempel 2

Figuren under viser den beregnede gjennomsnittlige forsinkelsen i de ulike modellene. Resultatene fra beregning av gjennomsnittlig forsinkelse ligger også rundt gjennomsnittresultatet av de andre modellene.



Figur 5.16 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 2



Figur 5.17 Sammenligning av dimensjonerende kølengde i eksempel 2

Også for den dimensjonerende kølengden er resultatene relativt lik som den andre modellene. I grunnmodellen er det valgt lik beregningsmetode for dimensjonerende kølengde som i HCM. Siden resultatet av kapasitetsberegningen er relativt lik, gir begge modellene den samme dimensjonerende kølengden.

5.2.9 Utfordringer med grunnmodellen

Grunnmodellen som er utviklet i denne oppgaven er som tidligere nevnt bygd opp annerledes enn den tidligere metode R i håndbok 127. Dette er fordi kapasitetsberegninger i denne metoden i stor grad er basert på geometrisk utforming av rundkjøringen. Rundkjøringer i dag har en tydeligere feltinndeling, som gjør at geometrien i rundkjøringen er ulik det som var i 1985. Dette er grunnen til at den gamle norske metoden ikke lengre fungerer like godt. Grunnmodellen som er valgt er bygd opp på kritisk-tidsluke teori og har mange fellestrekk med grunnmodellen for forkjørsregulerte kryss.

Testing av grunnmodellen mot andre kjente kapasitetsmodeller viser at modellen gir resultater som ligger rundt snittet av de andre kapasitetsmodellene. Dette gjelder for både kapasitet i tilfarten, forsinkelse og kølengde. Et av målene for grunnmodellen var at resultatene skulle være i nærheten av andre kapasitetsmodeller. Det er dermed et godt utgangspunkt for videre arbeid.

Selv om resultatene fra testing er tilfredsstillende, er det gjort flere forenklinger i grunnmodellen. En av forenklingene er at ikke grunnmodellen tar hensyn til ulike kjøretøytyper. Grunnen til at dette ikke er inkludert i grunnmodellen er det samme som for forkjørsregulerte kryss, at de ulike kapasitetsmodellene gjør det på forskjellige måter. Det skal derfor undersøkes i videre arbeid hvordan dette på best mulig måte kan inkluderes i modellen.

Heller ikke gående og syklende er inkludert i grunnmodellen. I en rundkjøring kan kryssende gående og syklende påvirke kapasiteten i både tilfart og utfart. Det kan oppstå tilbakeblokkering i rundkjøringen dersom det oppstår kø i utfarten. I forbindelse med rundkjøringer i urbane områder er det ofte overgangsfelt i alle tilfarter. Fotgjengere og

syklisters påvirkning på kapasiteten burde derfor være med for å ha en fullstendig kapasitetsmodell. Sammenligningen i kapittel 4.6.3 viser at de ulike modellene tar hensyn til kryssende fotgjengere og syklistene på ulik måte. I de manuelle kapasitetsmodellene blir ikke utgangskapasitet inkludert. Arbeidet videre skal undersøke hvordan fotgjengere og syklistene kan inkluderes i modellen.

Videre er grunnmodellen en forenkling ved at det antas at all sirkulerende trafikkmengde må vikes for. Denne antakelsen vil være med på å underestimere den faktiske kapasiteten i en rundkjøring med to sirkulerende kjørefelt. Det burde derfor videre vurderes om en skal dele opp de sirkulerende kjørefeltene i to ulike trafikkstrømmer som den svenske modellen, eller om en regresjonsmodell som det er i HCM er det beste alternativet. En utfordring med en regresjonsmodell er at det krever et stort datasett for å estimere faktorene i modellen. Det burde gjøres egne datainnsamlinger i Norge, siden det kan være forskjell i trafikantoppførsel og utforming av rundkjøringer i USA og Norge.

Siden den gamle norske modellen ikke er basert på kritisk tidsluke-teori fantes det ingen norske verdier for kritisk tidsluke som kunne brukes i modellen. Som nevnt tidligere ble verdier fra den danske håndboken valgt. Selv om det mest sannsynlig er mange likheter mellom rundkjøringer i Danmark og i Norge, burde det gjøres feltobservasjoner for å bekrefte eventuell likhet. Verdien av kritisk tidsluke i en rundkjøring kan være utfordrende å bestemme. I en tofeltsrundkjøring vil man ha fire sett av kritisk tidsluke-verdier siden det er to sirkulerende kjørefelt og to kjørefelt i tilfarten. Slik grunnmodellen er bygd opp nå skiller den ikke på kritisk tidsluke i de ulike kjørefeltene i tilfarten. Det vil si at kritisk tidsluke vil være et gjennomsnitt av de ulike kombinasjonene av kritisk tidsluke.

Sett bort ifra de forenklingene som har blitt gjort i grunnmodellen, viser testing mot andre kapasitetsmodeller at grunnmodellen er i nærheten av resultatene derifra. Målet med grunnmodellen var heller ikke at det skulle være en fullstendig modell, så det er derfor akseptabelt at det er flere punkter som må arbeides videre med. Flere av utfordringene med grunnmodellen for rundkjøringer er også felles med utfordringer knyttet til grunnmodellen for forkjørsregulerte kryss. Det kan derfor bli aktuelt å se på noen av problemstillingene samlet.

6 Videreutvikling av modell

Videreutviklingen av grunnmodellen er nødvendig fordi modellen inneholder flere forenklinger. I dette kapittelet skal det gjøres rede for og diskuteres hvilke oppdateringer som er foreslått. Kapittelet er inndelt slik at en og en del i den videreutviklede modellen blir gjennomgått. Til slutt skal den videreutviklede modellen testet opp mot de andre internasjonale kapasitetsmodellene og grunnmodellen. Dette vil svare på det siste forskningsspørsmålet, som er å sammenligne resultatene fra modellen som er utviklet med de andre kapasitetsmodellene.

Det er utviklet to Excel-ark med videreutviklet modell for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer. I regnearkene kan en gjennomføre eksempelberegninger med standard kryssutforming. Begge filene er lagt ved som elektroniske vedlegg.

6.1 Forkjørsregulerte T-kryss

Videreutviklingen av modellen for forkjørsregulerte T- kryss er i hovedsak basert på det som ble vurdert som mangler og svakheter i grunnmodellen. Tre av utfordringene er inkludering av tyngre kjøretøy, fotgjengere og syklistene og beregning ved kø og forsinkelse ved større belastningsgrader. Det er disse tre problemstillingene som har blitt arbeidet videre med i den videreutviklede modellen.

6.1.1 Kjøretøyskategorier

Som beskrevet tidligere skiller ikke grunnmodellen på ulike kjøretøyskategorier. For å være en fullstendig kapasitetsmodell er det derfor nødvendig å inkludere kjøretøyskategorier i modellen. De gjennomgåtte kapasitetsmodellene inkluderer kjøretøyskategorier på forskjellige måter, som beskrevet i avsnitt 4.6.1.

I litteraturstudiet i avsnitt 2.2.6 ble det gjort rede for ulike måter man kan ta hensyn til kjøretøyskategorier. Etter gjennomgangen er det i hovedsak tre mulige måter som peker seg ut som aktuelle å gå videre med. Den første er justering av kritisk tidsluke, den andre er justering kapasiteten, og den siste er justering av trafikkmengden ved bruk av personbilkvivalent. I den gamle norske modellen ble den potensielle kapasiteten justert for tungtrafikkandel og stigning inn mot krysset. En svakhet ved å bruke denne metoden er at det kun tas hensyn til forholdene i tilfarten, og dermed ikke tar hensyn til dersom det er en annen tungtrafikkandel i de overordne strømmene. En annen svakhet er at det kun skiller mellom lette og tunge kjøretøy. Det finnes mange nyanser av tunge kjøretøy, og de vil dermed ha ulik påvirkning på kapasiteten.

Med bakgrunn i det siste argumentet er det derfor ønskelig å dele opp i flere ulike kjøretøyskategorier. Det kan også være nyttig siden det kan gi rom for endring i fremtiden hvis kjøretøyskarakteristikken endrer seg. Oppdeling i flere kategorier kan også være hensiktsmessig hvis modellen en gang i fremtiden skal si noe om utslipp fra krysset.

Den danske modellen deler opp i fire kjøretøyskategorier. Samtidig er metoden bygd opp slik at det er enkelt å legge til eller fjerne kategorier uten å endre beregningsgangen. Det vil si at modellen er fleksibel for endring i både kjøretøyskategorier og kjøretøyskarakteristikk. I modellen blir trafikkmengden i hver kjøretøyskategori ganget

opp med en personbilekvivalent som bestemmes av kjøretøytype og helning i tilfarten. Dette blir så summert opp. Slik modellen er satt opp vil det å gange trafikkmengden med en personbilekvivalent, gi det samme resultatet som å gange opp og vekte kritisk tidsluke.

Et av målene med den nye kapasitetsmodellen er at det skal være mulig å videreutvikle den, og tilpasse den til endringer som skjer blant annet i kjøretøyparken. Med et oppsett som i den danske modellen vil dette være enklere å gjøre. Den danske metoden vurderes derfor som best egnet. Det er ikke funnet verdier for personbilekvivalenter til ulike kjøretøyskategorier i Norge. På grunn av dette foreslås det å benytte tabell for personbilekvivalenter fra den danske modellen frem til det blir gjort feltobservasjoner i Norge.

Tabell 6.1 Forslag til personbilekvivalenter i modell for T-kryss (Vejdirektoratet, 2019)

Stigning i tilfarten	Kjøretøyskategori			
	Mopeder/motorsykler	Personbil og varebil	Lastebil og busser	Vogntog
+4%	0,7	1,4	3,0	6,0
+2%	0,6	1,2	2,0	3,5
0%	0,5	1,0	1,6	2,6
-2%	0,4	0,9	1,2	2,0
-4%	0,3	0,8	1,0	1,2

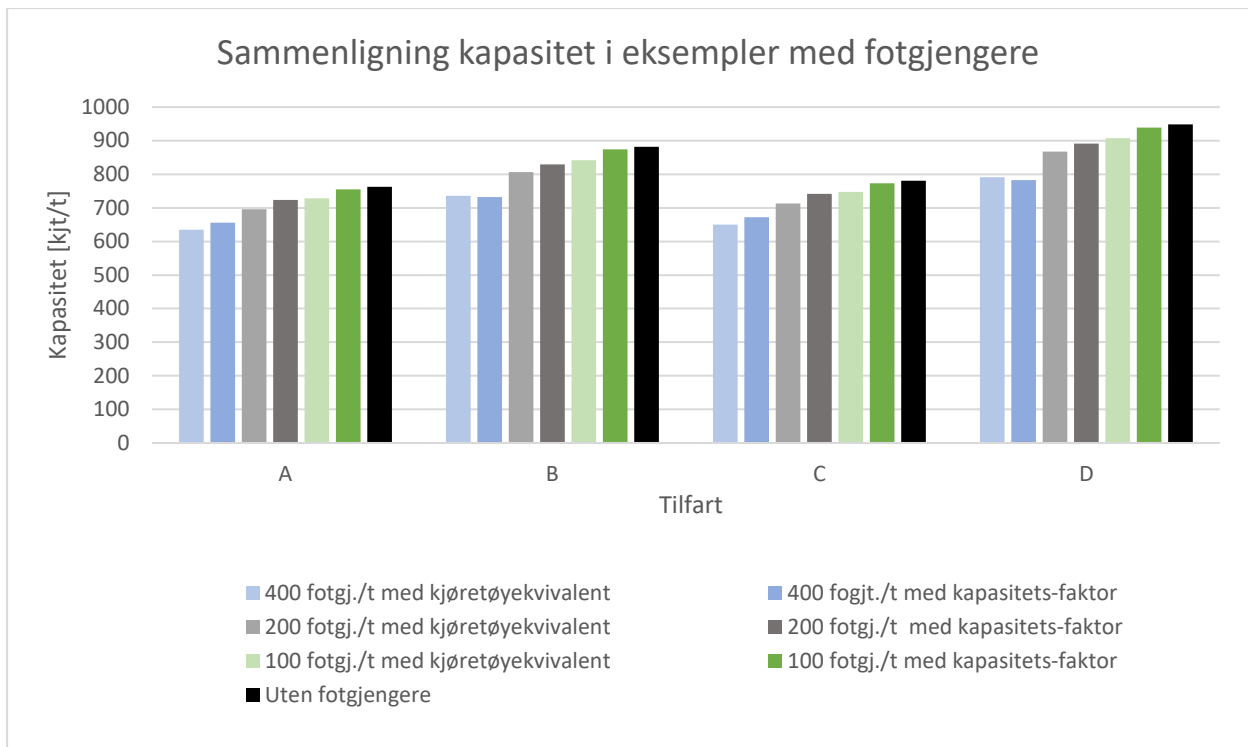
I modellen ganges trafikkmengden i hver kjøretøyskategori i hver tilfart med personbilekvivalenten hentet fra tabell 6.1. Deretter summeres trafikkmengden i hver tilfart med enheten [personbilekvivalenter/time]. Videre beregnes en omgjøringsfaktor som er trafikkmengden i kjøretøy per time delt på trafikkmengden i personbilekvivalenter per time. Denne faktoren brukes senere for å omgjøre kapasiteten som blir beregnet i personbilekvivalenter per time, til en kapasitet med enheten kjøretøyer per time.

6.1.2 Myke trafikanter

En annen utfordring med den gamle norske modellen for forkjørsregulerte kryss, er at den ikke tar hensyn til myke trafikanters påvirkning på kjøretøyers kapasitet. Med myke trafikanter i denne sammenhengen menes fotgjengere og syklistere. Dette ble ikke inkludert i grunnmodellen, og er derfor noe som ble jobbet videre med i denne fasen.

Resultatet av sammenligningen gjort i avsnitt 4.6.2 viser at fotgjengere og syklistere i ulik grad og på ulik måte inkluderes i kapasitetsmodellene. Felles for de modellene som tar hensyn til myke trafikanter som krysser vegen er at de legges til den overordnede trafikkmengden, ikke med kapasitetskorreksjon som det blir gjort i noen av modellene for rundkjøringer.

Som forklart i metodekapittelet ble ulike metoder beregnet med eksempler for å se på hvordan innvirkning ulike løsninger kunne ha på resultatet. Dette ble gjort for myke trafikanter ved å sammenligne hvordan resultatet ble ulikt ved bruk av kjøretøyskvivalent for fotgjengere og korreksjonsfaktor for kapasitet. Dette ble testet på eksempel rundkjøringen med ulikt antall fotgjengere. Resultatet er vist i figuren under.



Figur 6.1 Kapasitet med ulike metoder for å ta hensyn til innvirkning av fotgjengere

Metodene ble sammenlignet ved 400, 200 og 100 kryssende fotgjengere per time per tilfart. For å ha et referansepunkt ble også kapasiteten uten kryssende fotgjengere plottet. Fotgjengere ble lagt til med en kjøretøysekvivalent på 0,5, slik som den svenske modellen. Som figuren viser, gir bruk av kapasitets-faktor størst kapasitet i de fleste tilfellene. Unntaket er for 400 fotgjengere per time i to av tilfartene.

Bruken av kjøretøysekvivalent for kryssende fotgjengere vil være en forenkling av virkeligheten (Silvano et al., 2019). Likevel er det dette som blir gjort i HCM og den svenske modellen. To av metodene for kapasitetskorreksjon som ble gjennomgått i 2.2.7 er basert på datainnsamling fra rundkjøringer. Det vil si at ikke disse formlene kan brukes direkte i en modell for forkjørsregulerte kryss. Studien fra Yang et. al som også ble gjennomgått i teorikapittelet er gjort på toveis-stop kontrollerte kryss. Et problem med å eventuelt bruke resultater fra denne studien i kapasitetsmodellen er at det er forskjeller i sjåføroppførselen i USA og Norge. En annen utfordring med denne modellen er at den ikke er tilstrekkelig prøvd ut på forskjellige typer kryss. Med bakgrunn i dette velges derfor ikke denne metoden i den nye kapasitetsmodellen.

Selv om det ikke er en metode som peker seg ut som best for å beregne effekt av fotgjengere i forkjørsregulerte kryss, er det fortsatt ønskelig å inkludere problemstillingen i modellen. Siden metodene for kapasitetskorreksjon i T-kryss enten er lite utprøvd eller tilpasset til rundkjøringer, blir det derfor foreslått å inkludere fotgjengere i den overordnede strømmen. Dette gjøres i steget der den totale overordnede trafikkstrømmen bestemmes. Inntil videre observasjoner blir gjort foreslås det å legge til fotgjengere med en faktor på 0,5 slik som i den svenske modellen.

6.1.3 Utvikling av kø og forsinkelse

I noen sammenhenger kan det være interessant å se på hvordan kø og forsinkelse varierer i løpet av en tidsperiode, og ikke kun beregne dimensjonerende kølengde og gjennomsnittlig forsinkelse. Dette er noe som ikke er inkludert i de kapasitetsmodellene som er vurdert i denne oppgaven. Eksempelberegningen gjort i kapittel 4.7.3 viste at kølengden og forsinkelsen ble veldig stor i noen av kapasitetsmodellene ved overbelastning. Å kunne si noe om hvordan køen og forsinkelse utvikler seg i et slikt tilfelle kan være nyttig.

Det er i denne oppgaven laget en forenklet modell i Excel som estimerer utviklingen av kø og forsinkelse. Tidsperioden på en time er delt inn i 6 intervaller med varighet på ti minutter. Modellen ser på forskjellen mellom ankommende kjøretøy og antall kjøretøy som kan kjøre ut i krysset i tidsperioden. Denne forskjellen legges sammen med resterende kølengde fra perioden før.

Antall ankommende kjøretøy bestemmes av trafikkmengden. Det er gitt en fordeling som sier noe om hvor stor trafikkmengden er sammenlignet med gjennomsnittet i tidsperioden. 100% vil si at trafikken er som gjennomsnittet i løpet av timen, og 110% vil si at trafikken er 10% større i tidsintervallet sammenlignet med snittet i hele beregningsperioden. Denne fordelingen kan variere mellom de ulike trafikkstrømmene. Tabellen under viser et skjermbilde fra Excel-modellen, som viser hvordan fordelingen legges inn.

Tabell 6.2 Fordeling av trafikkmengder i Excel-modell

Deltilfart	Trafikkmengde i beregningsperioden	0-10 min	10-20 min	20-30 min	30-40 min	40-50 min	50-60 min	Snitt
	[kjt/t]							
AG	500	70 %	135 %	135 %	130 %	70 %	60 %	100 %
AH	100	70 %	135 %	135 %	130 %	70 %	60 %	100 %
BH	120	70 %	135 %	135 %	130 %	70 %	60 %	100 %
BV	60	70 %	135 %	135 %	130 %	70 %	60 %	100 %
CG	400	70 %	135 %	135 %	130 %	70 %	60 %	100 %
CV	150	70 %	135 %	135 %	130 %	70 %	60 %	100 %

Fordelingen av trafikkmengden brukes videre til å beregne kapasiteten i hver tidsperiode, som er hvor mange kjøretøy som kjører ut i krysset. Kapasiteten blir beregnet med modellen som er utviklet i denne oppgaven.

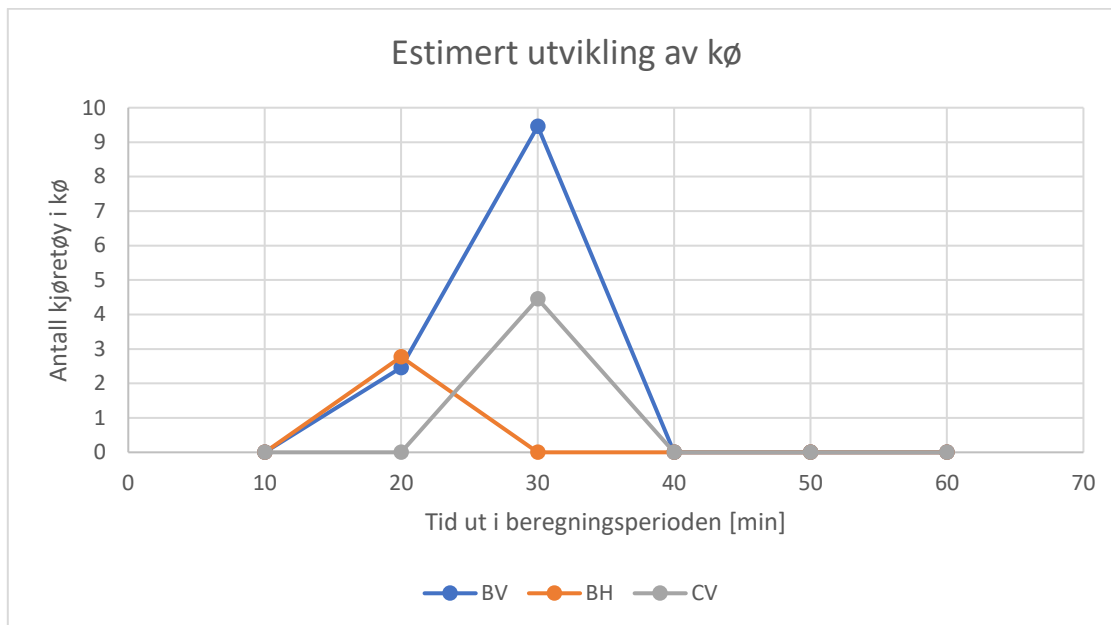
Etter at antall ankommende og utgående kjøretøy i hver periode er beregnet, kan kølengden estimeres. Dersom kapasiteten er høyere enn ankommende kjøretøy i perioden, vil kølengden på slutten av perioden være null. Dette er fordi det ikke er mulig

å «spare» kapasitet eller ha negativ kølengde. Kølengden i slutten av tidsperioden blir beregnet med likningen:

Formel 6-1 Kølengde i slutten av hver tidsperiode

$$Kølengde_{slutten\ av\ perioden} = Kølengde_{starten\ av\ perioden} + (ankommende\ kjøretøy - utkjørende\ kjøretøy)$$

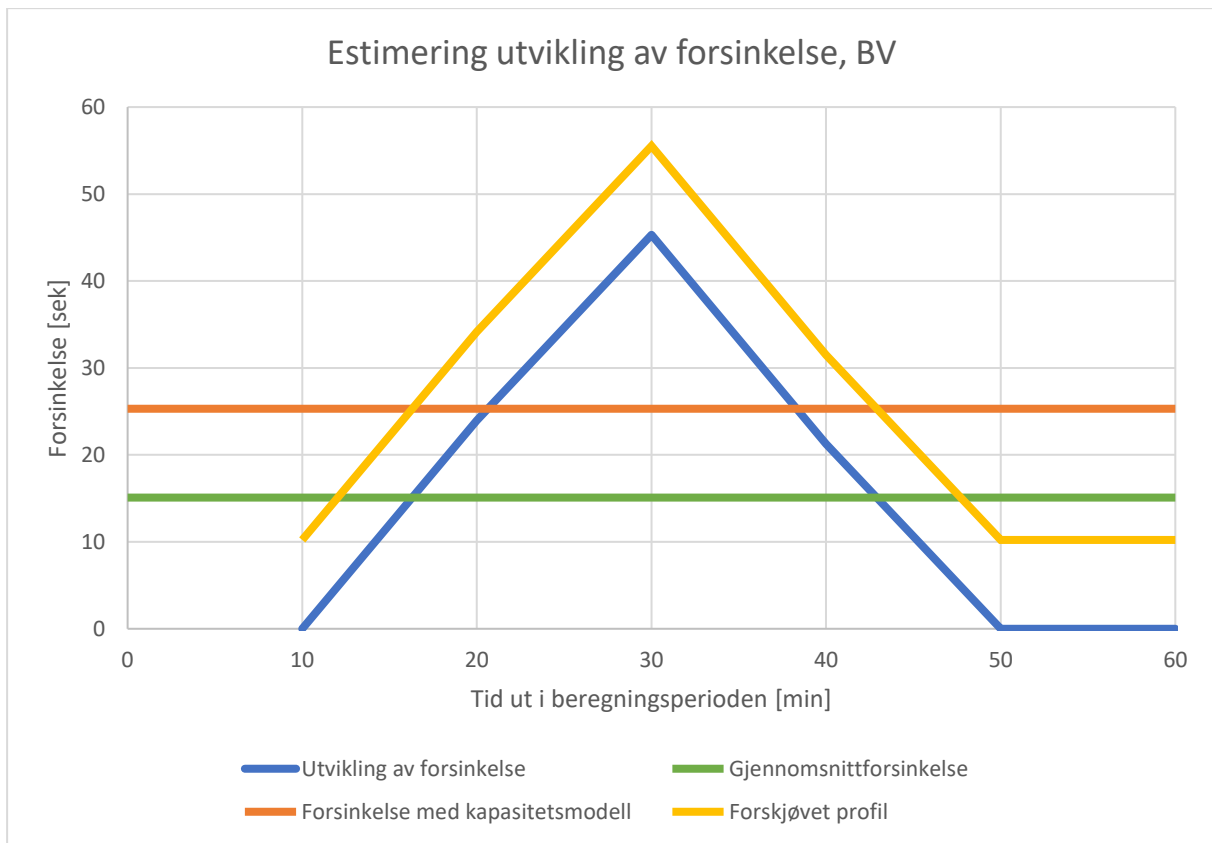
Kølengden i slutten av hver tidsperiode i hvert kjørefelt blir så plottet i et felles diagram. Eksempel på hvordan resultatet kan se ut er vist i figuren under.



Figur 6.2 Eksempel på resultat estimat av køutvikling

Videre kan gjennomsnittlig forsinkelse beregnes for hvert kjørefelt. Det gjøres på en forenklet måte ved å bruke Little's formel, som beskrevet i avsnitt 2.2.4. Little's formel viser en sammenheng mellom gjennomsnittlig ventetid, gjennomsnittlig antall i systemet og ankomstraten. Forenklingen som blir gjort er å regne ut gjennomsnittlig ventetid på slutten av hver tidsperiode ved å bruke antall kjøretøy i kø og antall kjøretøy inn i systemet i tidsperioden.

For å verifisere resultatet sammenlignes gjennomsnittlig forsinkelse beregnet på denne måten mot gjennomsnittlig forsinkelse beregnet med kapasitetsmodellen. Dersom det er forskjell i gjennomsnittet mellom disse to modellene, kan kurven justeres. Kurven justeres ved å endre verdien for forsinkelse i hvert punkt, med differansen mellom de to modellene. Dette er vist i figuren under.



Figur 6.3 Eksempel på resultat estimat av forsinkelse

I eksempelet over er den gjennomsnittlige forsinkelsen beregnet med Little's lov 10 sekunder lavere enn gjennomsnittlig forsinkelse beregnet med kapasitetsmodellen. Som beskrevet i avsnittet over, kan forsinkelsesprofilen korrigeres for denne forskjellen. Det gjøres ved at det legges til 10 sekunder på alle punktene det er beregnet forsinkelse. Det nye forsinkelses-profilen blir da forskjøvet oppover. Nytt forsinkelses-profil er vist med gult i figuren over.

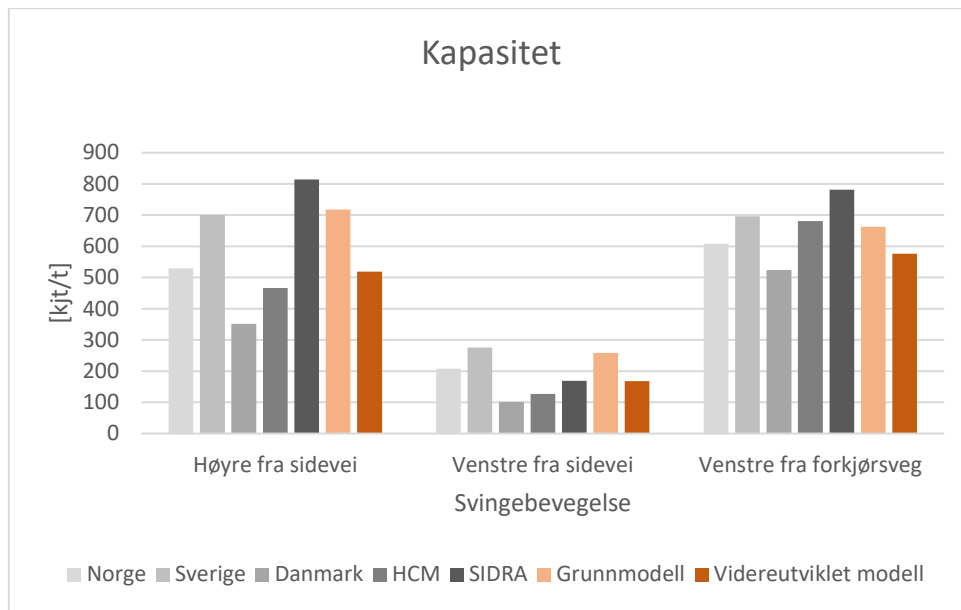
Estimering av køutvikling og forsinkelse finnes som et eget ark på de vedlagte Excel-filene med de samlede modellene. I modellen er det delt opp i 6 perioder på 10 minutter, men prinsippet vil være det samme dersom det er flere eller færre perioder. Grunner til å velge en annen lengde på intervallene kan være at man har trafikkmengde inndelt i kortere eller lengre intervaller, eller at det er spesielle forhold som tilsier at en annen lengde på intervaller burde velges.

6.1.4 Beregning av eksempelkryss

Grunnmodellen ble i kapittel 5.1.9 testet mot to eksempelkryss som også hadde blitt beregnet med de andre kapasitetsmodellene. For å se utviklingen skal også den videreutviklede modellen testes mot de samme eksemplene. En beskrivelse av de tre kryssene med relevante opplysninger og trafikkmengder finnes i kapittel 3.2.2.

Eksempel 1: T- kryss 1

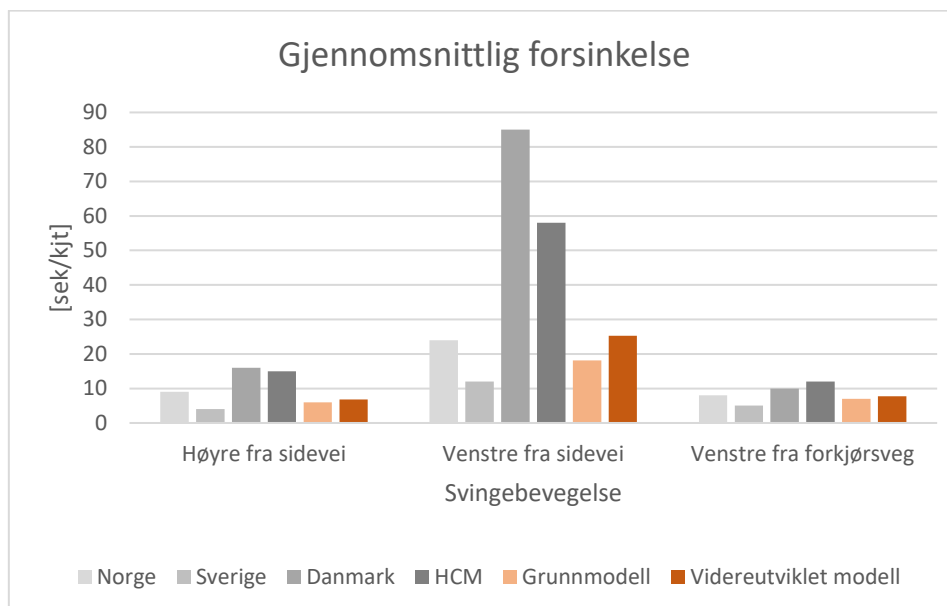
Det første eksempelet er et T-kryss der det er separate kjørefelt for de fleste trafikkmengdene. Figuren under viser resultatet av den videreutviklede modellen mot de andre kapasitetsmodellene.



Figur 6.4 Sammenligning av kapasitet i eksempel 1

Som figuren viser, ligger resultatet til den videreutviklede modellen rundt gjennomsnittet av resultatene fra de andre kapasitetsmodellene. For sveingebewegelsen venstresveing fra forkjørsvveg er kapasitet beregnet med den videreutviklede modellen litt lavere enn gjennomsnittet av de andre modellene. Likevel er ikke kapasiteten lavest av alle modellene som er sammenlignet. At den videreutviklede modellen gir lavere kapasitet enn grunnmodellen kan forklares med at den videreutviklede modellen tar hensyn til tunge kjøretøy.

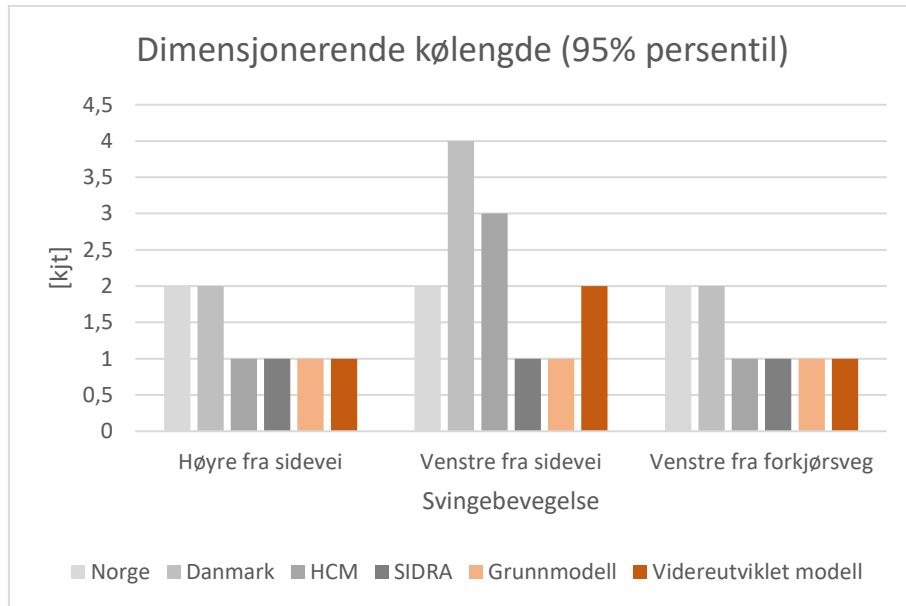
Videre har den gjennomsnittlige forsinkelsen blitt beregnet. Med gjennomsnittlig forsinkelse menes her den forsinkelsen som oppstår på grunn av andre trafikkstrømmer, som ikke inkluderer geometrisk forsinkelse. Figuren under viser resultatet av beregningene.



Figur 6.5 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 1

Som figuren over viser er den gjennomsnittlige kølengden for den videreutviklede modellen i nærheten av middelverdien for de andre kapasitetsmodellene for alle svingebevegelsene.

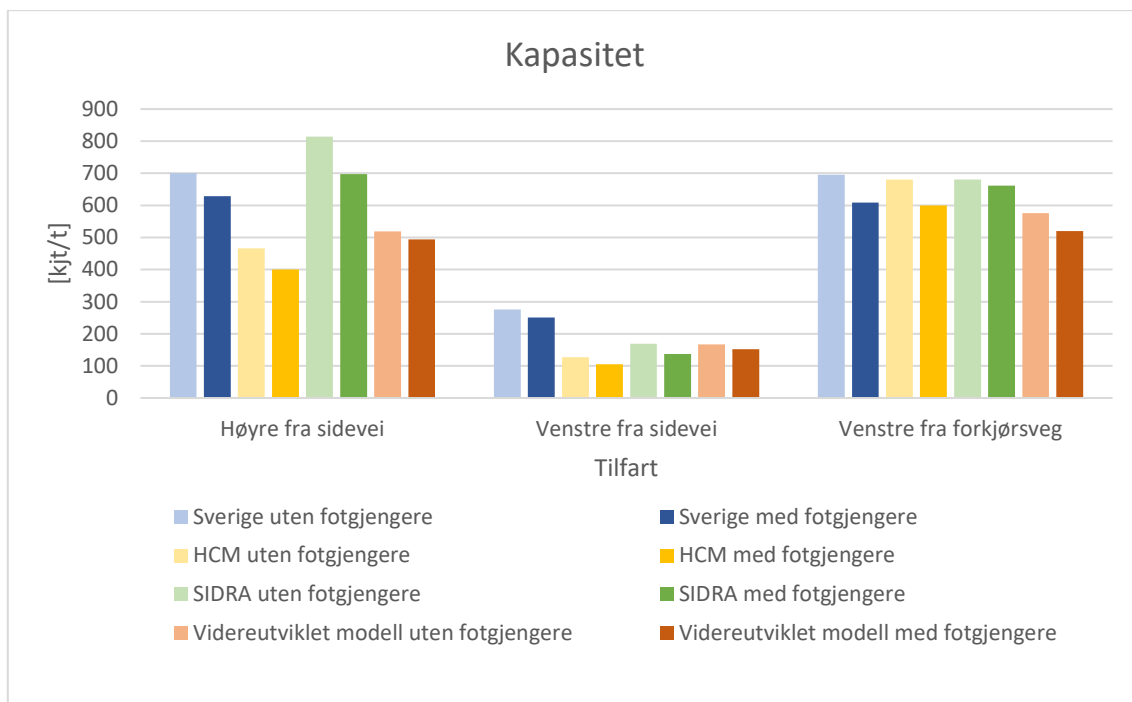
Til slutt skal den dimensjonerende kølengden sammenlignes. Figuren under viser resultatet av denne beregningen for alle modellene. Som tidligere nevnt inkluderes ikke den svenske modellen i denne sammenligningen siden denne modellen kun beregner gjennomsnittlig kølengde.



Figur 6.6 Sammenligning av resultat dimensjonerende kølengde i eksempel 1

Resultatet fra den videreutviklede modellen gir her resultater som ligner de andre modellene, og også resultater som er relativt likt som for grunnmodellen. I figuren over er den dimensjonerende kølengden avrundet til nærmeste heltall.

I det første eksempelet er det ikke fotgjengerfelt. For å se hvordan kapasiteten endres av fotgjengere er det lagt til et fotgjengerfelt som krysser sidevegen. I makstimen er det 100 fotgjengere per time som krysser sidevegen i dette eksempelet. Den videreutviklede modellen er testet opp mot de kapasitetsmodellene som tar hensyn til fotgjengere. Resultatet av kapasitetsberegning med og uten fotgjengerfelt er vist i figuren under.

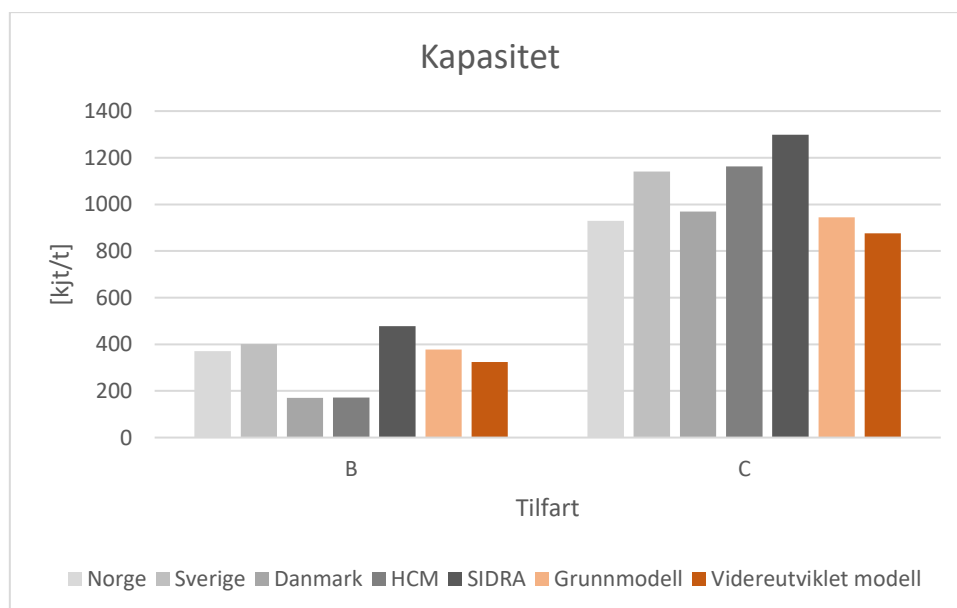


Figur 6.7 Kapasitet i eksempel 1 med og uten fotgjengerfelt

Som figuren over viser, er det en forskjell i kapasiteten for alle kapasitetsmodellene med og uten fotgjengerfelt. Det ser ikke ut til at fotgjengerfelt påvirker kapasiteten mer i den videreutviklede modellen enn det gjør i de andre kapasitetsmodellene. I dette eksempelet blir kapasiteten redusert med rundt 10%.

Eksempel 3: T- kryss 2

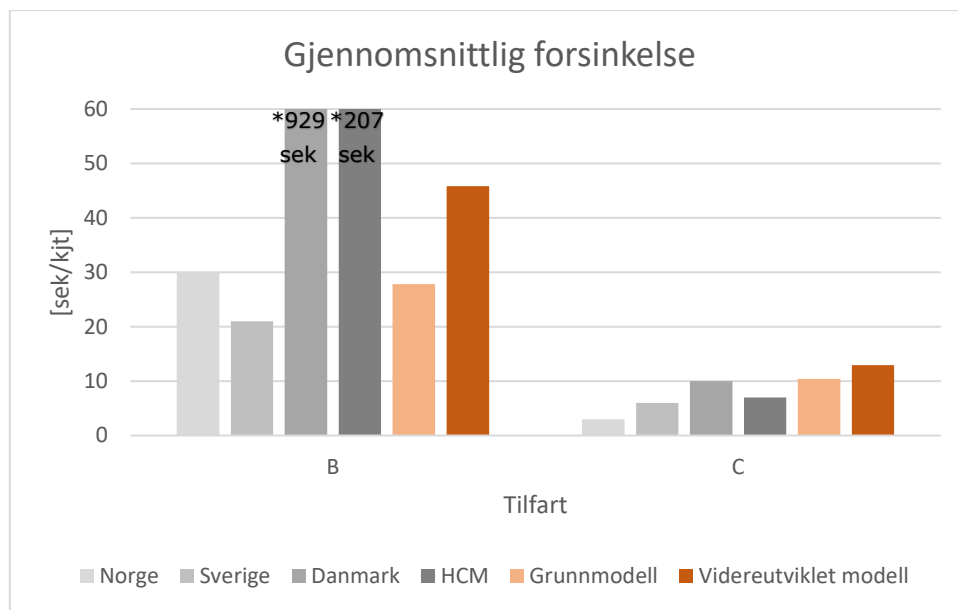
Det neste eksempelet ligner på det første, men er endret for å teste hvordan resultatet blir når belastningsgraden øker. Figuren under viser resultat fra kapasitetsberegningen i eksempel 3.



Figur 6.8 Sammenligning av kapasitet eksempel 3

Resultatet av kapasitetsberegningene viser at den videreutviklede modellen ligger rundt snittet for sidevegen, men for tilfart C gir den den laveste kapasiteten av alle modellene. Likevel er ikke resultatet langt unna de andre kapasitetsmodellene. I dette eksempelet gir også den videreutviklede modellen lavere kapasitet enn grunnmodellen. Dette forklares med at grunnmodellen tar hensyn til at det er 10% tunge kjøretøy i alle tilfarter.

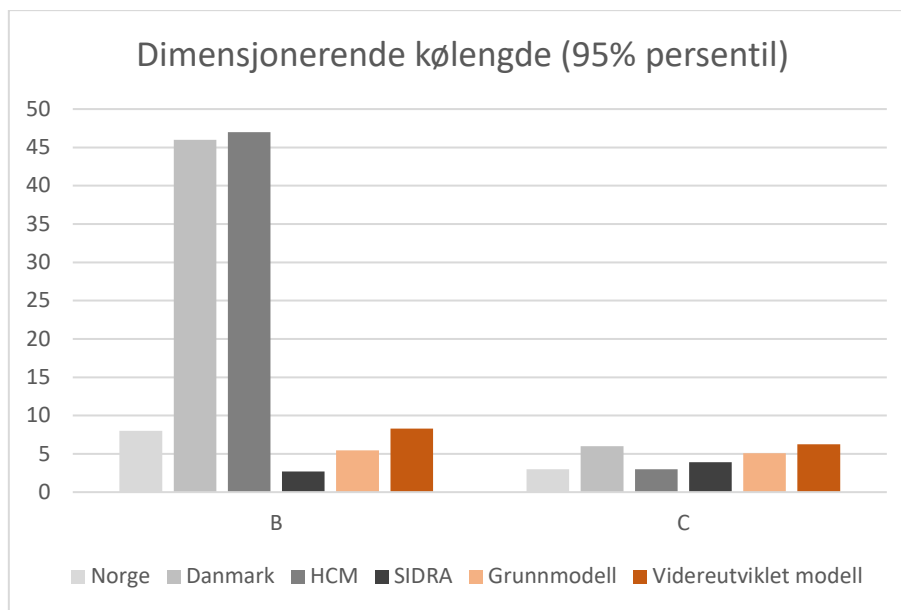
Videre har den gjennomsnittlige forsinkelsen blitt beregnet, og resultatet er vist i figuren under.



Figur 6.9 Sammenligning av gjennomsnittlig forsinkelse i eksempel 3 *Y-aksen på figuren er justert siden gjennomsnittlig forsinkelse for dansk modell og HCM er veldig stor

Den videreutviklede modellen gir ikke overbelastning i tilfart B som den danske modellen og HCM. Men sett bort ifra disse modellene gir den videreutviklede modellen klart høyest gjennomsnittlig forsinkelse for tilfarten fra sidevegen. Dette er et direkte resultat av at kapasiteten beregnet med den videreutviklede modellen er lavest av de modellene som ikke har en kapasitet som er mindre enn trafikkmengden. For tilfart C gir også den videreutviklede modellen høyest gjennomsnittlig forsinkelse. Dette er også et resultat av at kapasiteten med den videreutviklede modellen er lavest av alle modellene.

Til slutt har den dimensjonerende kølengden blitt beregnet, og resultatet er vist i figuren under.



Figur 6.10 Sammenligning av dimensjonerende kølengde eksempel 3

Som for gjennomsnittlig forsinkelse stemmer den resultatet av den dimensjonerende kølengden bra overens med resultatene fra kapasitetsberegningen.

6.1.5 Diskusjon

Diskusjonskapittelet består først av en diskusjon av de ulike delene som har blitt videreutviklet fra grunnmodellen. Til slutt skal resultatene fra beregningene vurderes.

Kjøretøyskategorier

Inkludering av kjøretøykategorier i modellen ble vurdert som en nødvendig oppdatering i grunnmodellen. Valget med å bruke personbilekvivalenter kan begrunnes med at det er en metode som kan ta hensyn til mange ulike kategorier, og samtidig er en metode som er fleksibel for endring. I likhet med kritisk tidsluke er også kjøretøysekvivalenter en parameter i kapasitetsmodellen. Det er derfor enkelt å endre på verdien uten å gjøre store endringer i modellen.

Det ble valgt å bruke verdier fra den danske håndboken, siden det ikke finnes slike verdier i Norge. Det bør gjøres nye observasjoner i norske kryss for å bestemme de ulike personbilekvivalentene. Dette er både for å se på om det er spesielle forhold i Norge sammenlignet med Danmark, men også for å se om det har skjedd endringer siden de danske feltobservasjonene ble gjort. På grunn av manglende tid, har det i dette prosjektet ikke vært mulig å gjennomføre slike feltobservasjoner.

En fordel med å bruke personbilekvivalenter, er at det også inkluderer stigningen i krysset. Dette er fordi det er forskjellig hvordan ulike kjøretøy blir påvirket av om det er stigning eller helning inn mot krysset. Ved å inkludere dette i denne delen av modellen trengs det ikke korreksjon et annet sted i modellen.

Valg av metode vurderes samlet sett som passende til modellen. Likevel bør det gjennomføres tester mot norske forhold for å vurdere om verdiene må oppdateres.

Myke trafikanter

Siden den gamle norske modellen og grunnmodellen ikke tok hensyn til myke trafikanter, har det i denne delen av oppgaven blitt vurdert hvordan dette kan inkluderes i modellen. Valget med å bruke kjøretøysekvivalenter og legge til fotgjengere som en del av den overordnede trafikkmengden ble valgt siden det vurderes som det beste alternativet som er tilgjengelig.

Om personbilekvivalenter er den beste metoden til å ta hensyn til myke trafikanter i et forkjørsregulert kryss, kan diskuteres. For det første kan det diskuteres om myke trafikanter i det hele tatt kan sammenlignes med en personbil. Fotgjengere kan ofte komme i puljer, og det kan gå flere fotgjengere over parallelt med hverandre. Siden oppførselen kan variere i så stor grad, kan det være vanskelig å estimere et gjennomsnitt. Det kan også diskuteres om syklistene burde inkluderes sammen med fotgjengere, eller om de burde behandlet som en egen trafikkstrøm. Svaret på dette spørsmålet kan være avhenge hvordan løsninger som finnes for gående og syklende i krysset. Det kan være en forskjell om det er sykkelfelt eller om det er felles gang og sykkelveg.

Dersom fotgjengerfeltet er plassert sånn at det er plass til en eller flere biler mellom selve krysset og krysningspunktet, kan det ha noe å si for kapasiteten. Dersom det er kødannelse i tilfarten, kan fotgjengere krysse mellom biler som står i kø. I dette tilfellet vil fotgjengere ha liten eller ingen påvirkning på kapasiteten til kjøretøyene. Det er ikke mulig å ta hensyn til dette ved bruk av personbilekvivalent. Likevel vil den prosentvise endringen ved å legge til fotgjengere i den overordnede trafikkmengden være liten dersom den overordnede trafikkmengden er stor. Kø i tilfarten har ofte en sammenheng med stor trafikkmengde. På den måten kan en si at dette indirekte er inkludert i metoden som er valgt.

Selv om bruken av kjøretøysekvivalenter har noen svakheter, er det også en metode som har flere fordeler. Den er enkel å bruke, og det er også mulighet for å gjøre endringer. At den anerkjente modellen HCM bruker denne metoden ses også som en styrke.

Utvikling av kø og forsinkelse

En mulig svakhet ved metoden er at brukeren selv må angi trafikkfordelingen til hver trafikkstrøm i beregningsperioden. Dette kan være tall som ikke er kjent. Dersom det antas en fordeling som er langt unna virkeligheten kan derfor modellen gi et uriktig bilde av virkeligheten. På den andre siden skal dette være et tillegg til beregningen av dimensjonerende kølengde, som allerede er inkludert i grunnmodellen. Det vil si at dersom man ikke har riktig trafikkdata, kan en velge å ikke gjøre estimering av utviklingen av kø og forsinkelse.

Det antas at antall fotgjengere følger samme utviklingen som kjøretøy. Det vil si at i de periodene det er flest kjøretøy, er det også flest fotgjengere. Grunnen til at ikke det ikke er lagt inn en egen fordeling er at det antas at det ikke finnes egne trafikkdata på hvordan antall fotgjengere varierer i makstimen. I mange tilfeller vil ikke antall fotgjengere ha veldig stor innvirkning på resultatene. Derfor vil denne forenklingen mest sannsynlig ikke ha så store innvirkninger på resultatet. Ved senere utvikling av modellen kan egen fordeling av fotgjengere eventuelt inkluderes.

Tidsintervaller på ti minutter er valgt for å ha en balanse mellom nøyaktighet i resultatene og nøyaktighet i trafikkmengder. Dersom tidsperiodene er for korte, kan det være vanskelig å bestemme en trafikkfordeling. Det er fordi små variasjoner i observasjoner vil utgjøre en større forskjell når tidsperioden er mindre, siden det er færre kjøretøy per tidsperiode. Det vil si at det kan være store forskjeller dersom man gjør observasjoner på to forskjellige dager. På den andre siden, burde tidsperioden være så liten at små tidsperioder med mye trafikk skal gi utslag. I eksempelet fra Figur 6.2, hadde en inndeling i to tidsperioder på 30 minutter resultert i at det ikke var kø i slutten av den første beregningsperioden. Det vil si at valg av lengde på beregningsperiode kan ha en innvirkning på resultatet av beregningene.

Estimatet av utvikling av forsinkelse vil mest sannsynlig underestimere den gjennomsnittlige forsinkelsen. Mange av kjøretøyene som kjører gjennom krysset må vente litt, uten at det nødvendigvis bygger seg opp en stor kø bak. Forsinkelses-estimatet er bare basert på antall kjøretøy som er i kø i slutten av hvert beregningsintervall. Det vil mest sannsynlig ha vært venting og noe kødannelse i løpet av intervallet, selv om det ikke er kødannelse på slutten av intervallet. Forsinkelsen til disse kjøretøyene vil ikke telles med når utvikling av forsinkelse estimeres. Derfor burde gjennomsnittlig forsinkelse funnet med denne metoden sammenlignes med gjennomsnittlig forsinkelse beregnet med kapasitetsmodellen.

På bakgrunn av at forsinkelsen ofte kan bli underestimert er det lagt inn korreksjon som beskrevet tidligere. Bruken av korreksjonen øker troverdigheten til resultatet av estimeringen. Likevel burde det kontrolleres at forskjellen mellom gjennomsnittet beregnet med de to metodene ikke er for høyt. Dersom det er veldig store forskjeller i resultatene kan det være at forsinkelses-estimeringen gir unøyaktige resultater.

Korreksjonen fungerer ikke dersom køestimeringen ikke gir kø. Det er fordi forsinkelsen er beregnet med Little's lov, som vil si at forsinkelsen beregnes fra kølengden. Når det ikke er kø, vil det heller ikke være mulig å plote en forsinkelses-utvikling. I disse tilfellene vil det ikke være mulig å korrigere mot gjennomsnittet beregnet med kapasitetsmodellen. På den andre siden vil dette mest sannsynlig være eksempler med lite kødannelse og lav gjennomsnittlig forsinkelse. Det er ikke i disse tilfellene det er mest interessant å se på hvordan utviklingen er i løpet av makstimen. For disse scenarioene kan det være nok å se på gjennomsnittlig forsinkelse og dimensjonerende kølengde som er beregnet med kapasitetsmodellen.

Selv om estimatet av forsinkelse og kø er en forenkling, kan det være nyttig å bruke i noen tilfeller. Estimatet kan spesielt være nyttig dersom trafikkmengden mellom makstimen har et spesielt toppunkt, og ikke er jevnt fordelt gjennom hele perioden. Testing av metoden i slike tilfeller har gitt bedre resultat enn når trafikkmengden i makstimen er jevnere. Likevel burde alltid resultatet fra disse estimatene sammenlignes med dimensjonerende kølengde og gjennomsnittlig forsinkelse.

Vurdering av resultater

Testing av den videreutviklede modellen mot de andre kapasitetsmodellene ga gode resultater. En ser også en forskjell i resultatene mellom grunnmodellen og den videreutviklede modellen. Dette kommer av at den videreutviklede modellen tar hensyn til ulike kjøretøyskategorier. I eksemplene er det 10% og 15% tunge kjøretøy, så det er riktig at det skal ha et utslag på kapasitet, forsinkelse og kølengde.

Gode resultater kan tyde på en greit fungerende modell, men det er viktig å poengtere at modellen kun er testet på to eksempler. En vet derfor ikke om modellen fungerer godt i andre eksempler med annen geometrisk utforming eller trafikkmengde. Dersom det hadde blitt valgt et eksempel med enda høyere belastningsgrad kunne forskjellene ha blitt større. Selv om den videreutviklede modellen også inneholder et eget estimat for utvikling av kø og forsinkelse, er fortsatt dimensjonerende kølengde og gjennomsnittlig forsinkelse basert på hvordan det gjøres i den danske modellen og HCM. Som eksempel 2 viste, ga disse modellene stor dimensjonerende kølengde og forsinkelse ved overbelastning. Det vil si at den videreutviklede modellen også vil oppføre seg likt i samme situasjon.

Selv om den videreutviklede modellen kan fungere dårlig ved overbelastning, er det i denne fasen utviklet et annet alternativt verktøy. Dette kan være aktuelt å bruke dersom det er kortere perioder med overbelastning. Ved overbelastning kan også overgang til simuleringsprogram være aktuelt.

6.2 Rundkjøringer

I grunnmodellen for rundkjøringer er det pekt ut flere mangler og svakheter. En del av disse var felles med forkjørsregulerte kryss. For å kunne gå enda dypere inn i temaene, er det valgt å se på det samme i både forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer. Selv om de samme utfordringene er vurdert, vil ikke nødvendigvis løsningene for de to krysstypene være like.

6.2.1 Kjøretøyskategorier

Grunnmodellen for rundkjøringer tok heller ikke hensyn til ulike kjøretøyskategorier. Siden modellen for rundkjøringer er bygd opp på de samme prinsippene som modellen for forkjørsregulerte kryss, vurderes det at inkludering av kjøretøyskategorier også kan gjøres på samme måte. Det er også slik det blir gjort i den danske modellen for rundkjøringer. Begrunnelsen for valg av metode er gjort rede for i kapittel 6.1.1.

I den danske modellen er det noe forskjell mellom personbilkvivalentene i modellen for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer. Det er kun forskjell i personbilkvivalentene for kategoriene lastebil og busser og vogntog. Siden det ikke er gjort feltobservasjoner i Norge, foreslås det å bruke verdier fra Danmark inntil videre. Tabellen som viser personbilkvivalent gitt av stigning i tilfarten og kjøretøyskategori er vist under.

Tabell 6.3 Forslag til personbilkvivalenter i modell for rundkjøringer (Vejdirektoratet, 2019)

Stigning i tilfarten	Kjøretøyskategori			
	Mopeder/motorsykler	Personbil og varebil	Lastebil og busser	Vogntog
+4%	0,7	1,4	3,0	6,0
+2%	0,6	1,2	2,0	3,0
0%	0,5	1,0	1,7	2,1
-2%	0,4	0,9	1,2	1,5
-4%	0,3	0,8	1,0	1,2

Den totale trafikkmengden i hver trafikkstrøm summeres med enheten personbilkvivalenter per time. Det gjøres ved at antall av hver kjøretøyskategori ganges med tilhørende personbilkvivalent, før det alle kjøretøyskategorier summeres. Videre regnes det ut en omgjøringsfaktor, som sier noe om forholdet mellom trafikkmengde i personbilkvivalenter/time og kjøretøy/time. Denne faktoren brukes senere til å omgjøre beregnet kapasitet til enheten kjøretøy/time.

6.2.2 Myke trafikanter

Myke trafikanter er ikke tatt hensyn til i grunnmodellen for rundkjøringer, og er derfor arbeidet videre med i denne fasen. Sammenligningen av de internasjonale kapasitetsmodellene viste at den samme kapasitetskorreksjonen blir brukt i den danske modellen og HCM. Siden rundkjøringer kan være mer komplisert enn forkjørsregulerte kryss, kan kapasitetskorreksjon være et godt alternativ. De to modellene bruker som tidligere forklart en korreksjonsfaktor som kommer fra feltobservasjoner i Tyskland på 90-tallet. Det er ikke funnet studier der gyldighetene av disse resultatene er testet mot dagens forhold.

Likevel foreslås det å bruke korreksjonsfaktoren til Brillon, Stuwe og Drews frem til det eventuelt gjøres videre studier og feltobservasjoner. Formlene under er hentet direkte fra HCM (Transportation Research Board, 2022).

Formel 6-2 Korreksjonsfaktor for rundkjøringer med et sirkulerende kjørefelt

$$\text{Hvis } v_c > 881, \quad f_{fot} = 1$$

$$\text{Eller hvis } n_{fot} \leq 101, \quad f_{fot} = 1 - 0,000137 * n_{fot}$$

$$\text{Elles,} \quad f_{fot} = \frac{1119,5 - 0,715 * v_c - 0,644 * n_{fot} + 0,00073 * v_c * n_{fot}}{1068,6 - 0,654 * v_c}$$

f_{fot} = Korreksjonsfaktor for fotgjengere []

n_{fot} = Antall kryssende fotgjengere [fotgjengere/t]

v_c = Overordnet trafikkmengde [kjøretøy/t]

Formel 6-3 Korreksjonsfaktor for rundkjøringer med to sirkulerende kjørefelt

$$\text{Hvis } n_{fot} < 100, \quad f_{fot} = \min \left[1 - \frac{n_{fot}}{100} \left(1 - \frac{1260,6 - 0,329 * v_c - 0,381 * 100}{1380 - 0,5 * v_c} \right), 1 \right]$$

$$\text{Ellers,} \quad f_{fot} = \min \left[\frac{1260,6 - 0,329 * v_c - 0,381 * n_{fot}}{1380 - 0,5 * v_c}, 1 \right]$$

Korreksjon for fotgjengere gjøres som det femte steget i modellen. Det er avsatt plass i grunnmodellen for rundkjøringer til å gjøre korreksjonen. Den grunnleggende kapasiteten i hvert kjørefelt ganges med korreksjonsfaktoren som bestemmes av formlene over.

6.2.3 Utvikling av kø og forsinkelse

Utviklingen av kø er også relevant å se på for rundkjøringer. Det er derfor også laget en Excel-modell for å se på utviklingen av kø i rundkjøringer. Metoden for beregning av utvikling av kø i rundkjøring er laget på samme måte som for forkjøringsregulerte kryss. Oppbyggingen er diskutert og forklart i avsnitt 6.1.3 og 6.1.5.

I modellen for utvikling av kø i rundkjøringer er det gjort en forenkling når det kommer til å ta hensyn til fotgjengere. I kapasitetsmodellen for rundkjøringer blir kapasiteten justert med en faktor som er avhenge av antall fotgjengere og antall kjøretøy i den overordnede trafikkstrømmen. I formelen for beregning av korreksjonsfaktor er enheten på både kapasitet og trafikkmengde i kjt/t. I kømodellen blir kapasitet og trafikkmengde regnet ut i kjøretøy/10 minutter. Disse verdiene kan derfor ikke brukes direkte i formelen for korreksjonsfaktor. For å unngå konvertering frem og tilbake, er det gjort en forenkling. Forenklingen er at korreksjonsfaktoren er lik i alle tidsintervallene. Korreksjonsfaktoren regnes ut for hele dimensjoneringsperioden, og blir dermed et slags gjennomsnitt av alle tidsintervallene.

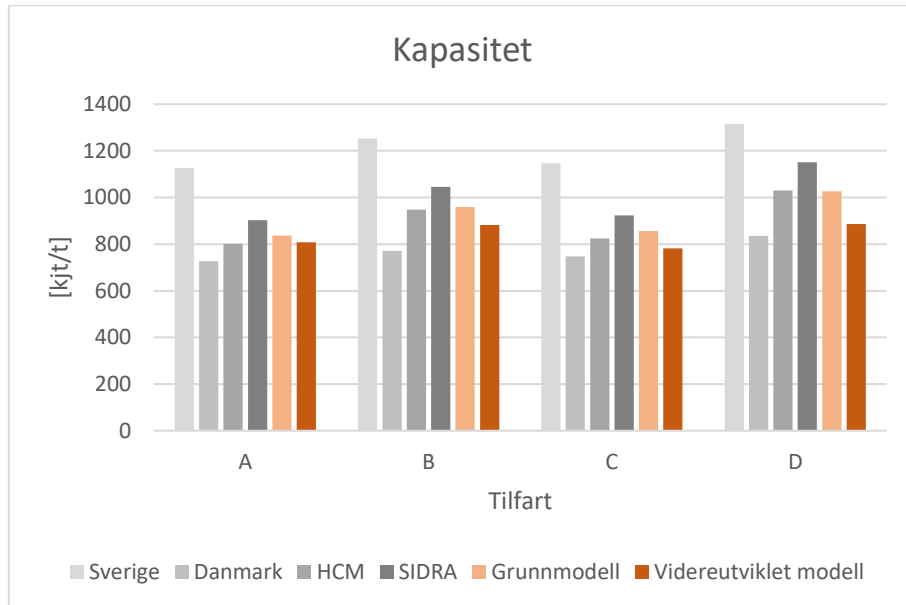
6.2.4 Beregning av eksempelkryss

Grunnmodellen for rundkjøringer ble i kapittel 5.2.8 testet mot de andre kapasitetsmodellene ved å beregne et eksempel. For å se på forskjellen mellom grunnmodellen og den videreutviklede modellen skal den nye modellen testes med det samme eksempelet.

Eksempel 2: Rundkjøring

Dette eksempelet er en rundkjøring med et sirkulerende kjørefelt og et kjørefelt i alle tilfartene. Flere opplysninger om rundkjøringen er gitt i kapittel 3.2.2.

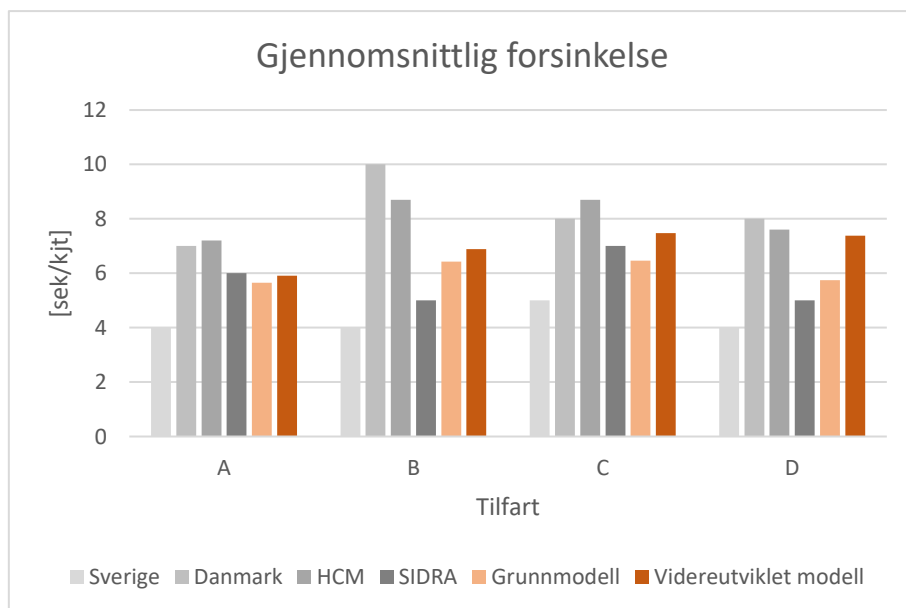
Først ble kapasiteten beregnet. Resultatet av denne beregningen er vist i figuren under.



Figur 6.11 Sammenligning av resultat kapasitet eksempel 3

Som figuren over viser ligger resultatet fra den videreutviklede modellen rundt snittet av de andre modellene. Kapasiteten med den videreutviklede modellen ligger i de fleste tilfartene litt under kapasiteten beregnet med grunnmodellen.

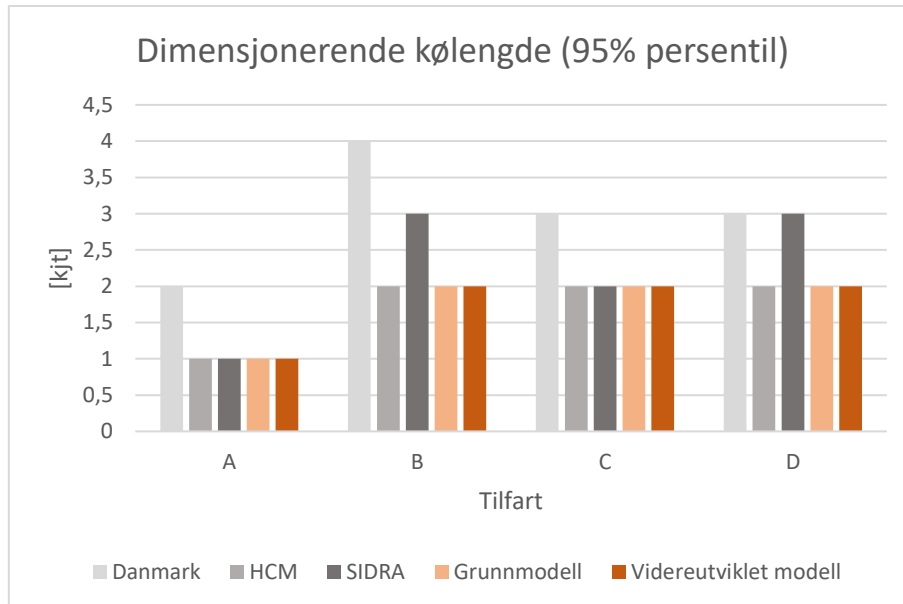
Videre er den gjennomsnittlige forsinkelsen beregnet. Figuren under viser resultatet av denne beregningen.



Figur 6.12 Sammenligning av resultat gjennomsnittlig forsinkelse eksempel 3

I de fleste tilfartene ligger den gjennomsnittlige forsinkelsen rundt snittet av de andre modellene.

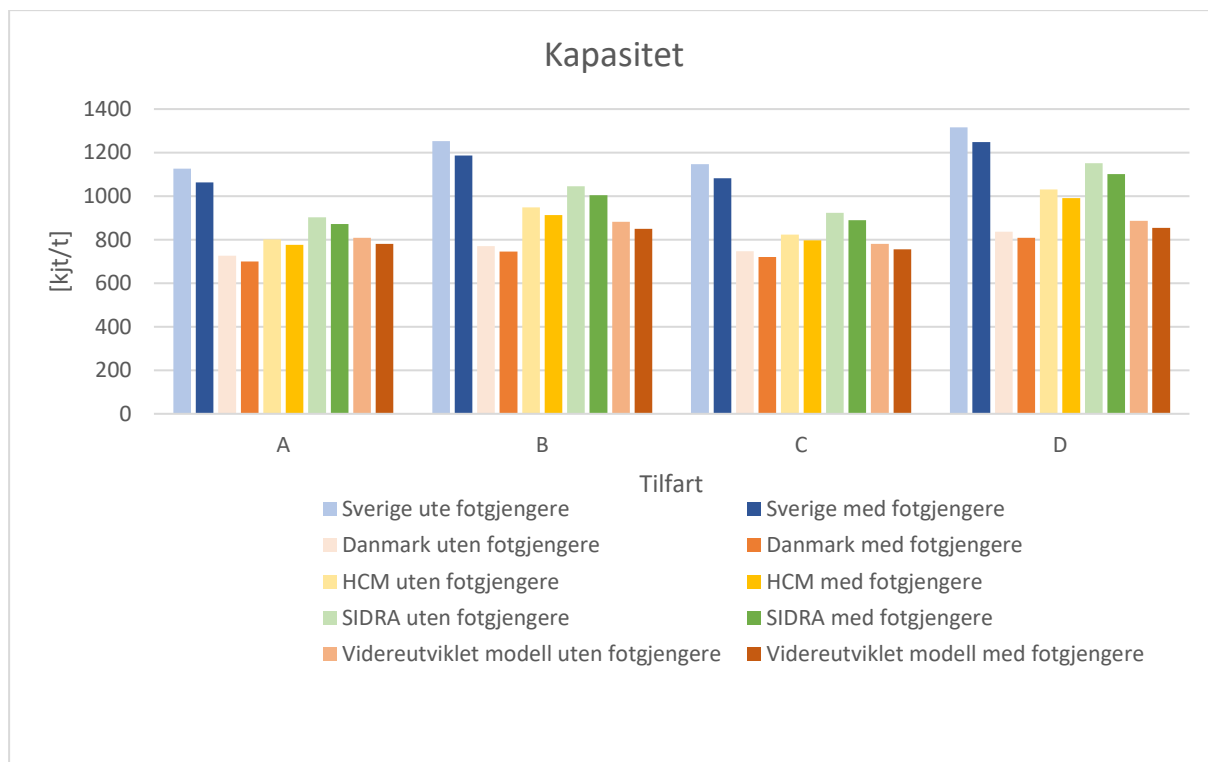
Til slutt ble den dimensjonerende kølengden beregnet. Figuren under viser sammenligningen av resultatet, der kølengden er avrundet til nærmeste heltall.



Figur 6.13 Sammenligning av resultat dimensjonerende kølengde eksempel 3

Den dimensjonerende kølengden for den videreutviklede modellen er lik som den grunnleggende modellen. Begge modellene ligger rundt snittet av resultatet fra de andre modellene.

I motsetning til grunnmodellen tar den videreutviklede modellen hensyn til fotgjengere. For å teste hvordan fotgjengere påvirker kapasiteten er eksempel 2 endret ved å legge til fotgjengerfelt i alle armene på rundkjøringen. Det er lagt til 150 fotgjengere per time i makstimen. Resultatet av kapasitetsberegning med og uten fotgjengere er vist i figuren under.



Figur 6.14 Kapasitet i eksempel 2 med og uten fotgjengerfelt

Den Danske modellen, HCM og modellen som er utviklet i denne oppgaven tar hensyn til fotgjengere i rundkjøring på samme måte. I alle disse modellene gikk kapasiteten ned med litt over 3%. Forskjellen i kapasitet med den svenske modellen som bruker personbilkvivalenter for å justere for fotgjengere er omtrent 5%. Forskjellen med SIDRA som også bruker en faktor til å justere kapasiteten er på rundt 4%.

6.2.5 Diskusjon

Diskusjonskapittelet består først av en diskusjon av de ulike delene som har blitt videreutviklet fra grunnmodellen. Det skal også gjøres en vurdering av resultatene fra beregningen av eksempelkruss.

Kjøretøyskategorier

Som diskutert i arbeidet med grunnmodellen, var det nødvendig at den videreutviklede modellen tok hensyn til ulike typer kjøretøy. Det ble valgt å bruke samme metode som forkjørsregulerte kryss i inkludering av ulike kjøretøyskategorier.

Vurderingen av denne metoden er derfor lik som for forkjørsregulerte kryss, og er diskutert i kapittel 6.1.5.

Myke trafikanter

Til forskjell fra modellen for forkjørsregulerte kryss ble det for rundkjøringer valgt å bruke kapasitetskorreksjon for å ta hensyn til myke trafikanter. Dette er fordi rundkjøringer kan være mer komplekse å beskrive, og det er metoden som er valgt i flere av de andre kapasitetsmodellene.

Metoden som er valgt er som tidligere beskrevet basert på datainnsamling av tyske rundkjøringer på 1990-tallet. En usikkerhet med denne metoden er at det kan være andre forhold i Norge i dag, som gjør at korreksjonen ikke passer. Det kan både være

siden det har skjedd en utvikling de siste 30 årene, og at det kan være forskjell i trafikantatferden siden observasjonene er gjort i Tyskland. På bakgrunn av dette burde det som minimum gjøres observasjoner i norske rundkjøringer som kan verifisere at korreksjonen gir fornuftige resultater.

Som tidligere nevnt kan utgangskapasitet i rundkjøringer være en viktig parameter. Fotgjengerfelt i utfarten kan føre til tilbakeblokkering inn i sirkulasjonsarealet. Metoden som er valgt i modellen tar ikke hensyn til fotgjengere i utfarten. I urbane området med mye fotgjengere kan dette være et problem. I senere arbeid bør det derfor vurderes om det også er mulig å ta hensyn til fotgjengere i utfarten. Siden modellen ikke tar hensyn til utgangskapasitet slik som den er i dag, burde det brukes alternative analysemetoder dersom det er et stort antall kryssende fotgjengere.

Metoden som er valgt i den videreutviklede modellen er basert på en eldre studie, og er en forenkling siden den ikke tar hensyn til utgangskapasitet. Likevel er det en forbedring fra den gamle norske modellen som ikke tok hensyn til myke trafikanter i det hele tatt. Frem til det blir gjort videre endringer i modellen kan dette være en fungerende metode.

Utvikling av kø og forsinkelse

Selve metoden er bygd opp på samme måte som forkjørsregulerte kryss. Vurdering av metoden er derfor stort sett lik. Metoden er tidligere diskutert i avsnitt 6.1.5. Likevel er det noen forskjeller mellom køestimering for forkjørsregulerte kryss og rundkjøringer som skal diskuteres her.

Som tidligere diskutert antas det at antall fotgjengere fordeles likt gjennom hele tidsperioden. Dette kan ha noe å si dersom det er store forskjeller innad i beregningsmetoden. På den andre siden er det ikke gitt at fotgjengere følger samme fordeling som kjøretøyene. Det vil si at antakelsen som gjøres for fotgjengere i rundkjøringer ikke nødvendigvis gir resultater som er lengre unna virkeligheten enn metoden for forkjørsregulerte kryss.

I likhet med forkjørsregulerte kryss, vil metoden fungere dårligere når det ikke er høy belastningsgrad eller stor variasjon i trafikkmengden i løpet av tidsperioden. Noe som skiller rundkjøringer fra forkjørsregulerte kryss er at forsinkelsen er jevnere fordelt mellom alle tilfartene. Det vil si at det ofte oppstår noe kø i alle tilfarter. Dersom det ikke er overbelastning i intervallet, vil ikke metoden fange opp mindre kødannelse. Dette vil igjen føre til at det ikke estimeres forsinkelse. Kø og forsinkelses-estimering i kan derfor til en viss grad fungere dårligere for rundkjøringer enn for forkjørsregulerte kryss. Likevel vil denne forskjellen også være avhenge av eksempelet, og hvordan trafikkmengden fordeler seg mellom de ulike tilfartene.

Vurdering av resultater

Den videreutviklede modellen for rundkjøringer gir også resultater som ligger rundt snittet av de andre kapasitetsmodellene. I eksempelet er det 10% tunge kjøretøy i alle tilfarter. Forskjellen mellom resultatene fra grunnmodellen og den videreutviklede modellen kan forklares med at den videreutviklede modellen inkluderer kjøretøyskategorier. Testing av eksemplet med fotgjengere viser også at den delen av modellen fungerer som den skal. Likevel er det viktig å igjen poengtere at modellen kun er testet mot et eksempel. Det vil si at selv om den videreutviklede modellen gir tilfredsstillende resultater i dette tilfellet, er det ikke gitt at modellen fungerer like godt i andre tilfeller.

7 Konklusjon

Sammenligning har vist at det er mange likheter mellom kapasitetsmodellene som har blitt studert i denne oppgaven. For forkjørsregulerte kryss har den gamle norske metoden mange likhetstrekk med kapasitetsmodellene fra Sverige, Danmark og USA. Den største ulikheten mellom den gamle norske modellen og de andre kapasitetsmodellene, er hvordan forsinkelse og kølengde beregnes. I den gamle norske metoden går både forsinkelse og kølengde mot uendelig ved overbelastning. Dette er to sentrale årsaker til at denne modellen må oppdateres.

Metodene for kapasitetsberegning i rundkjøringer har flere ulikheter enn metodene for forkjørsregulerte kryss. HCM er en blanding av en analytisk kritisk tidsluke modell og regresjonsmodell. Svensk og dansk metode er begge bygd opp på analytisk kritisk tidsluketeori. Likevel er det noe forskjell i beregningsgangen i de to modellene, og hvilke forenklinger som blir gjort. Den gamle norske metoden er basert på en gammel engelsk metode, der utformingen av rundkjøringen hadde stor betydning på kapasiteten. Siden rundkjøringer i dag bygges på litt andre prinsipper, er det vanskelig å bruke metoden til kapasitetsberegninger i dag.

I oppgaven er det utviklet to versjoner av en kapasitetsmodell for forkjørsregulerte T-kryss og rundkjøringer. De er i stor grad basert på de kapasitetsmodellene som er sammenlignet i oppgaven. En utfordring ved å basere en ny modell på andre modeller, er at en må passe på at ikke alle deler av en modell ikke direkte kan settes inn i en annen modell. Dette er på grunn av at begreper kan ha ulik betydning i modellene. En må også passe på at ikke noen faktorer enten blir tatt med to ganger eller utelatt. Med grundig sammenligning og vurdering av de ulike metodene er denne feilen forsøkt unngått. Videre var det grunnet begrenset tid, ikke mulig å gjennomføre feltobservasjoner. Det vil si at modellen som er utviklet baserer seg på tidligere observasjoner gjort i Norge eller utlandet.

Resultatene fra testing av de videreutviklede modellene ga gode resultater, som er i nærheten av resultatene fra de andre kapasitetsmodellene. En kan se en klar forskjell i resultatene fra grunnmodellen til den videreutviklede modellen. Den videreutviklede modellen hadde resultater som var litt nærmere snittet av de andre modellene som ble testet. Likevel gir ikke gode testresultater fra tre eksempelkryss anledning til å konkludere med at modellene gir gode resultater i alle tilfeller. Men det er et godt utgangspunkt for videre arbeid.

7.1 Videre arbeid

Det må igjen understrekes at de to modellene som er utviklet i denne oppgaven ikke er ferdige modeller. Selv om de fungerte bra i de tre eksemplene de er testet mot, er det fortsatt mye arbeid som gjenstår før modellene kan kalles komplette. Det er et par av punktene som ble pekt ut som svakheter i grunnmodellen som ikke ble arbeidet videre med i videreutviklingsfasen. For begge modellene er kritisk tidsluke noe som bør ses videre på. I modellen for T-kryss er det brukt verdier fra den gamle norske håndboken, som mest sannsynlig er utdatert. Det burde derfor gjennomføres feltobservasjoner for å bestemme nye verdier for kritisk tidsluke.

Når det gjelder kritisk tidsluke for rundkjøringsmodellen, ble verdier fra den danske håndboken valgt. Som tidligere diskutert, kan bestemmelse av kritisk tidsluke for rundkjøringer være mer komplisert enn for forkjørsregulerte T-kryss. Dette er fordi det finnes flere kombinasjoner av kritisk tidsluke. I grunnmodellen ble det gjort en forenkling i rundkjøringer med to felt, der det ble antatt at all sirkulerende trafikkmengde var overordnet. Denne antakelsen ble ikke videre vurdert i videreutviklingen av modellen. Før nye verdier av kritisk tidsluke estimeres, må det først vurderes om metoden skal være slik den er foreslått nå, eller om metoden for kapasitetsberegning skal endres. Alternative metoder kan være å angi en fordeling slik som i den svenske metoden, eller gå over til en blanding av analytisk modell og regresjonsmodell som i HCM.

På grunn av tidsbegrensning er det også gjort flere forenklinger i modellen. En av forenklingene som er gjort er at modellens beregningshjelpemiddel i Excel er lite fleksibelt. Videre kan dette utvides til å kunne gjelde flere utforminger enn de standard kryssene som er mulig i dagens versjon. Metoden for køestimering kan også utvides til å gjelde et vilkårlig antall tidsperioder med valgfri lengde.

Videre er det også mulig å utvide modellene slik at det er mulig å ta hensyn til mer utradisjonelle utforminger av kryss. Dette kan for eksempel være løsninger for prioritering av kollektivtrafikk, prioritere en hovedvei gjennom rundkjøring eller bruk av fletting og akselerasjonsfelt i kryss. Med økt fokus på utslipp fra kjøretøy, kan det vurderes om det i fremtiden skal være en del av modellen. Et estimat av utslipp fra et kryss kan brukes i sammenligningen av ulike kryssutforminger.

Referanser

- Akcelik & Associates PTY LTD. (2020). *SIDRA INTERSECTION 9.0 User Guide*.
- Akcelik, R. (1994). Gap-acceptance modelling by traffic signal analogy. *Traffic Engineering+ Control*, 35(9), 498–501.
- Brilon, W., Stuwe, B., & Drews, O. (1993). Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen. *Institute for Traffic Engineering, Ruhr Universität, Bochum, Deutschland*.
- Brilon, W., & Wu, N. (2001). Capacity at Unsignalized Intersections Derived by Conflict Technique. *Transportation Research Record*, 1776(1), 82–90.
<https://doi.org/10.3141/1776-11>
- Brilon, W., Wu, N., & Bondzio, L. (1997). *Unsignalized Intersections in Germany—A State of the Art 1997*. 18. https://www.ruhr-uni-bochum.de/verkehrswesen/download/literatur/Briwubo_2004_09_28.pdf
- Fisk, C. S. (1990). Effects of heavy traffic on network congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(5), 391–404. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(90\)90011-M](https://doi.org/10.1016/0191-2615(90)90011-M)
- Hagring, O. (2001a). *Beräkning av framkomlighetsmått i korsningar utan trafiksignaler: En litteraturöversikt*.
<https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4883643/1266917.pdf>
- Hagring, O. (2001b). *Korsningar med stopp- eller väjningsplikt*. 42.
<https://lucris.lub.lu.se/ws/files/4759048/1266915.pdf>
- Hurdle, V. F. (1984). Signalized intersection delay models—a primer for the uninitiated. *Transportation Research Record*, 971(112), 89.
<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1984/971/971-013.pdf>
- Høyberg, L. S. (2015, januar 26). Hovedveier skal fra nå av bygges uten rundkjøringer. *NRK*. <https://www.nrk.no/mr/hovedveier-skal-fra-na-av-bygges-uten-rundkjoringer-1.12171496>
- Kerro, D. (2019). *Modellering av vikepliktsregulerte Tkryst i SIDRA INTERSECTION og justering av kritisk tidsluke og følgetid for en bedret tilpasning til norske forhold* [Masteroppgave]. NTNU.
- Kimber, R. M. (1980). The traffic capacity of roundabouts, trrl laboratory report 942. *Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, United Kingdom*, 63.
- Kimber, R. M., & Hollis, E. M. (1979). *Traffic queues and delays at road junctions*.
<https://trid.trb.org/view/148210>
- Kyte, M., Tian, Z., Mir, Z., Hameedmansoor, Z., Kittelson, W., Vandehey, M., Robinson, B., Brilon, W., Bondzio, L., & Wu, N. (1996). *CAPACITY AND LEVEL OF SERVICE*

AT UNSIGNALIZED INTERSECTIONS. FINAL REPORT. VOLUME 1-TWO-WAY STOP-CONTROLLED INTERSECTIONS.

- Little, J. D. C. (1961). A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *Operations Research*, 9(3), 383–387.
- Marlow, M., & Maycock, G. (1982). *The effect of zebra crossings on junction entry capacities*.
- Mauro, R. (2010). Capacity Evaluation. I R. Mauro (Red.), *Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability* (s. 15–57). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-04551-6_2
- Persvold, A. Z. (2021). Modell. I *Store norske leksikon*. <http://snl.no/modell>
- Shalini, K., & Kumar, B. (2014). Estimation of the passenger car equivalent: A review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(6), 97–102.
- Sidra Solutions. (2021a). *SIDRA INTERSECTION | Micro-analytical software used as an aid for the design and evaluation of single intersections and networks of intersections | SIDRA SOLUTIONS*.
<https://www.sidrasolutions.com/software/sidra-intersection>
- Sidra Solutions. (2021b, november 27). *Highway Capacity Manual (HCM) for SIDRA INTERSECTION | SIDRA SOLUTIONS*. Sidra Solutions.
<https://www.sidrasolutions.com/software/sidra-intersection/highway-capacity-manual-hcm-sidra-intersection>
- Silvano, A. P., Olstam, J., Singh, A., & Bolbat, M. (2019). *Frånfartskapacitet i cirkulationsplatser: Effekter av korsande gång- og cykelflöden*. <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1307305/FULLTEXT02.pdf>
- Statens Vegvesen. (2013). *V121 Geometrisk utforming av veg- og gatekryss*.
<https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-v121.pdf>
- Statens Vegvesen. (2021). *N100 Veg- og gateutforming*. <https://svv-cm-sv-apppublic-prod.azurewebsites.net/product/859922/nb>
- Tian, Z. Z., Troutbeck, R., Kyte, M., Brilon, W., Vandehey, M., Kittelson, W., & Robinson, B. (2000). *A Further Investigation on Critical Gap and Follow-Up Time*. 13.
https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/circulars/EC018/34_45.pdf
- Trafikverket. (2014). *TRVMB Kapacitet och framkomlighetseffekter*.
https://www.trafikverket.se/globalassets/dokument/trvmb_kapacitet_och_framkomlighetseffekter.pdf
- Transportation Research Board. (2022). *Highway Capacity Manual* (7th edition).
- Tranøy, K. E. (2019). Metode. I *Store norske leksikon*. <http://snl.no/metode>
- TRL Software. (2018). *Junctions 9 User Guide*.

- TRL Software. (2022). *PICADY*. TRL Software. <https://trlsoftware.com/products/junction-signal-design/junctions/picady/>
- Troutbeck, R., & Blogg, M. (1998). Queueing at Congested Intersections. *Transportation Research Record*, 1646(1), 124–131. <https://doi.org/10.3141/1646-15>
- Troutbeck, R. J., & Brilon, W. (u.å.). *UN SIGNALIZED INTERSECTION THEORY*. 49.
- TØI. (2014). *Trafikksikkerhetshåndboken* (A. Høye, Red.). Transportøkonomisk institutt. <https://www.tshandbok.no/del-2/1-vegutforming-og-vegutstyr/doc624/>
- Vegdirektoratet. (1985). Kapasitet i kryss: Beregningsmetoder for ikke signalregulerte kryss : veiledning [Håndbok 127]. I 54. Statens vegvesen. <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/189819>
- Vejdirektoratet. (2019). *Kapasitet og Serviceniveau*. <http://vejregler.lovportaler.dk/showdoc.aspx?q=h%c3%a5ndbog+for+kapasitet+og+serviceniveau&docId=vd20190071-full>
- Wu, N. (1994). An approximation for the distribution of queue lengths at unsignalized intersections. *Proceedings of the second international symposium on highway capacity*, 2, 717–736.
- Wu, N. (2001). A universal procedure for capacity determination at unsignalized (priority-controlled) intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(6), 593–623. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(00\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(00)00012-6)
- Yang, Z., Zhang, Y., Zhu, R., Ye, X., & Jiang, X. (2015). Impacts of Pedestrians on Capacity and Delay of Major Street Through Traffic at Two-Way Stop-Controlled Intersections. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/383121>
- Yap, Y. H., Gibson, H. M., & Waterson, B. J. (2013). An International Review of Roundabout Capacity Modelling. *Transport Reviews*, 33(5), 593–616. <https://doi.org/10.1080/01441647.2013.830160>
- Aakre, A. (2020a, januar). *Queueing theory*.
- Aakre, A. (2020b, januar). *Traffic Flow Theory—Part 1. Macroscopic models*.
- Aakre, A. (2020c, februar). *Priority intersections (including roundabouts)*.

Vedlegg

Alle vedleggene i denne oppgaven er lagt ved elektronisk. Vedleggene er delt inn i to grupper etter viktighet. Hovedvedleggene er det viktigste resultatet fra arbeidet, mens de øvrige vedleggene er arbeidsdokumenter som beregninger, grunnmodeller og prosjektoppgaven.

Hovedvedlegg:

- Videreutviklet modell for forkjøringsregulerte kryss.xlsx
- Videreutviklet modell for rundkjøringer.xlsx

Øvrige vedlegg

- Eksempel 1 med fotgjengere.xlsx
- Eksempel 1- T-kryss.xlsx
- Eksempel 2 med fotgjengere.xlsx
- Eksempel 2- Rundkjøringer.xlsx
- Eksempel 3 med fotgjengere.xlsx
- Eksempel 3- T- kryss 2 .xlsx
- Grunnmodell rundkjøringer.xlsx
- Grunnmodell T-kryss.xlsx
- Prosjektoppgave.pdf

