

Rapport

Harald Høyem
Eli-Trine Svorstøl

111/2018

Automatisk trafikkleder

Forstudie og parameteranalyse for bussveien



Forord

Urbanet Analyse har gjennomført en forstudie og parameteranalyse for en prototyp av automatisk trafikkleder for bussveien på Nord-Jæren. Oppdraget vurderer ulike referanseprosjekter, KPI-parametere, modellering av dynamikken på bussveien, samt strategier som kan benyttes for å regulere trafikken bedre.

Resultatene fra oppdraget skal inngå som grunnlag i en prototyp for testing av en automatisk trafikkleder hvor ulike strategier for trafikkavvikling skal vurderes.

Bård Norheim har vært prosjektleder for oppdraget. Eli-Trine Svørstøl har hatt ansvar for vurdering av referanseprosjekter og har skrevet kapittel 5. Kapittel 3 er skrevet av Eli-Trine Svørstøl og Harald Høyem. Resten av rapporten er skrevet av Harald Høyem med innspill fra prosjektgruppa. Katrine Kjørstad har kvalitetssikret arbeidet.

Kontaktperson hos Kolumbus har vært Sverre Wendt Slettebø.

Vurderinger og anbefalinger i rapporten er gjort av Urbanet Analyse. Vi står ansvarlig for eventuelle feil og mangler ved dokumentet.

Oslo, april 2018

Urbanet Analyse

Bård Norheim

Innhold

Sammendrag	I
1.1 Hvordan måles trafikantkostnadene/ytelsen på best mulig måte	II
<i>Generelt om trafikantperspektivet</i>	IV
1.2 Hvordan forbedre trafikantkostnadene/ytelsen gjennom strategier for trafikkregulering	V
<i>Intervallregulering er den mest lovende strategien</i>	VI
<i>Stasjonshopping kan fungere, men er mindre treffsikkert enn intervallregulering</i>	VII
<i>Første buss bestemmer er den klart dårligste strategien</i>	VIII
<i>Forbikjøring av holdeplasser blir først effektiv i kombinasjon med andre virkemidler</i>	VIII
<i>Anbefalt strategi</i>	IX
1.3 Implementering av strategier	X
<i>Anbefalt modell for tidsbruk i bussveien</i>	X
2 Innledning	12
2.1 Bakgrunn for oppdraget	12
2.2 Avgrensning	13
2.3 Rapportens struktur	15
3 Måling av trafikantkostnader og ytelse (KPI)	18
3.1 Overordnede målsetninger	18
<i>Nasjonale retningslinjer</i>	18
<i>Mål for bussveien</i>	19
3.2 Måling av ytelsen til bussveien fra trafikantenes perspektiv	23
<i>Hva er en god ytelsesindikator (KPI)</i>	23
<i>Avgrensning av berørte grupper</i>	24
<i>Generelt om trafikantperspektivet</i>	24
<i>Tilbudsfaktorer som ytelsesindikatorer</i>	27
3.3 Operasjonalisering av valgte KPI-parametere	29
<i>Vekting av faktorer</i>	40
3.4 Oppsummering.....	43
4 Strategisk trafikkregulering	45
4.1 «Klumping» («bus bunching»).....	45
4.2 Hovedkategorier av kontrollstrategier	47
4.3 Strategigruppe 1: Tiltak på holdeplass	48
<i>Strategi 1: Intervallreguleringstid («vehicle holding strategy»)</i>	48
<i>Strategi 2: Forbikjøring av holdeplass / stasjonshopping</i>	51
4.4 Test av strategier	56
<i>Optimal intervallreguleringstid</i>	56
<i>Test av intervallregulerende strategier</i>	56
<i>Optimal forbikjøringsstrategi</i>	61
<i>Test av forbikjøringsstrategi</i>	63
4.5 Effekt på KPI-parametere	68
<i>Rutetider eller faste intervall?</i>	69

	<i>Rushtidsavganger</i>	69
4.6	Oppsummering og anbefaling	71
	<i>Første buss bestemmer</i>	71
	<i>Intervallregulering</i>	72
	<i>Forbikjøring av holdeplass</i>	73
	<i>Oppsummering</i>	73
5	Validering av valgte ytelsesindikatorer	75
5.1	Valg av referanseprosjekter (om litteraturkartleggingen)	75
	<i>Stort utvalg BRT-løsninger med kontrollrom</i>	75
	<i>Utfordringer ved valg av referanseprosjekter</i>	76
	<i>Valg av referanseprosjekter</i>	77
5.2	BRT-løsning: Maxx Almere i Almere, Nederland	77
	<i>Reisevaner i Almere, Nederland</i>	78
	<i>Kort om BRT-løsningen</i>	78
	<i>KPI-parametere</i>	79
	<i>Utfordringer referanseprosjektet har stått ovenfor</i>	80
5.3	T-baneløsning: København Metro	80
	<i>Vesensforskjell på buss og bane</i>	80
	<i>Om København Metro</i>	82
	<i>Strategier og regler for trafikkregulering som benyttes</i>	85
5.4	Pålitelighet og tilgjengelighet er viktige ytelsesindikatorer	86
	<i>Mobilitet og pålitelighet er viktig ytelsesindikator for trafikkstyring og ITS</i>	86
	<i>Reisetid og kapasitetsutnyttelse sentralt i kartlegging av veg-ITS i EU</i>	87
	<i>Pålitelighet og tilgjengelighet som mål på politiske målsetninger</i>	88
5.5	Viktige aspekter for bussveien i Stavanger	89
6	Metodedel A: Modellering av bussvegssystemet	92
6.1	Tid ved holdeplass	92
	<i>Tid for av- og påstigning</i>	93
	<i>Tid for åpning og lukking av dører</i>	96
	<i>Tid for å finne ledig busslomme</i>	96
6.2	Lyskryss og rundkjøringer	103
	<i>Tid tapt ved rødt lys</i>	103
	<i>Samlet modell</i>	105
	<i>Formelverk ved simulering av kryss</i>	106
6.3	Reell hastighet	106
	<i>Modellering av sjåfør som minimerer reisetiden</i>	106
	<i>Illustrasjon av modellen</i>	107
6.4	Kapasitet	110
	<i>Kapasitet langs bussruten</i>	110
	<i>Tilbakeslagseffekter</i>	111
6.5	Eksempel på bruk: Dimensjonering av holdeplasser	112
	<i>Kriterier for optimal størrelse på et busstopp</i>	112
	<i>Eksempel på bruk av modellen</i>	113
	<i>Beregning av samfunnsøkonomisk nytte</i>	114
6.6	Test av reisetidsmodellen	116
	<i>Validering av modellen</i>	116
6.7	Anbefalt modell	118

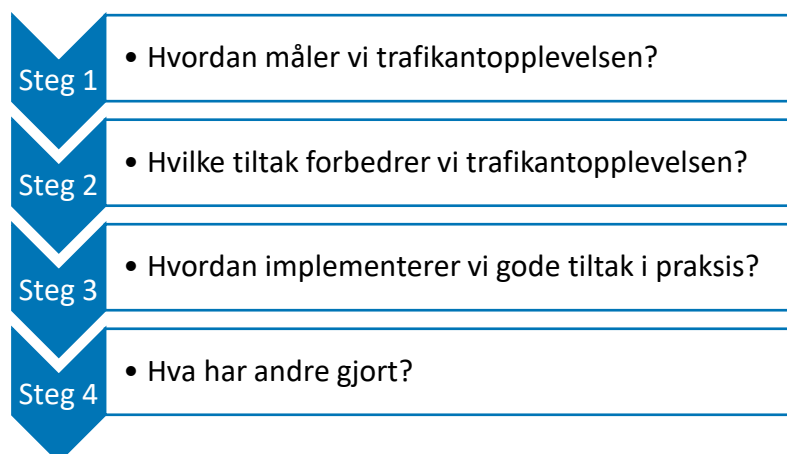
7	Metode del B: Implementering av strategier	120
7.1	Deterministisk reisetid: Ingen forstyrrelser eller variasjon	120
7.2	Stokastisk reisetid: Modellering av «klumping» i en simulering	121
	<i>Ulik oppholdstid.....</i>	<i>122</i>
	<i>Tid brukt i lyskryss/rundkjøring</i>	<i>122</i>
	<i>Implementasjon.....</i>	<i>123</i>
7.3	Implementasjon av strategier	125
	<i>Ingen tiltak.....</i>	<i>125</i>
	<i>Første buss bestemmer.....</i>	<i>125</i>
	<i>Intervallregulering</i>	<i>126</i>
	<i>Forbikjøring</i>	<i>131</i>
7.4	Oppsummering.....	134
8	Referanser	136
Vedlegg	140
	Definisjoner / ordbok.....	140
	<i>Intelligente transportsystemer (ITS)</i>	<i>140</i>
	<i>Automatisk trafikkleder eller automatisk trafikkstyring.....</i>	<i>140</i>
	Oversikt over BRT-løsninger med kontrollrom	141
	<i>BRT-løsninger med kontrollrom.....</i>	<i>141</i>
	<i>Eksempel på ytelsesindikatorer som benyttes av to utvalgte bussløsninger</i>	<i>143</i>
	Modelltillegg: Formler	146
	<i>Kalibrering av reisetidsmodellen</i>	<i>146</i>
	<i>Køtid ved variabel oppholdstid og faste ankomstintervaller</i>	<i>147</i>

Sammendrag

På oppdrag fra Kolumbus AS har Urbanet analyse gjennomført en parameteranalyse og forstudie for en automatisk trafikkleder for den nye bussveien på Nord-Jæren. Gjennom «Konseptvalgutredning for Transportsystemet på Jæren» er det besluttet at en kollektivbasert utvikling med buss og jernbane skal legges til grunn for planleggingen av transportsystemet i byområdet på Nord-Jæren. Dette konseptet er konkretisert til prosjektet «Bussveien» som består av til sammen 26 strekninger som utgjør et ca. 50 kilometer langt bussveisystem i kommunene Stavanger, Sandnes og Sola.

Urbanet Analyse har bistått med å utrede et rammeverk som skal inngå i planleggingen av bussveien gjennom oppbygning av en Automatisk TrafikkLeder (ATL). Trafikklederen skal bistå bussveiens operatører med å drifte systemet på en måte som gjør trafikantenes opplevelse best mulig. Målsettingen med prosjektet er å minimere trafikantkostnadene slik at bussveien utnytter sitt potensiale til det fulle på et operativt nivå. Ytelsen på systemet er dermed i første rekke representert gjennom trafikantkostnadene.

For å kunne svare ut problemstillingen fra Kolumbus har vi delt inn prosjektet i følgende deloppgaver vist i figuren under:



Figur S.1 Stegene i rapporten

Deloppgavene er forsøkt besvart på følgende måte:

1. Steg 1: Hvordan måles trafikantkostnadene/ytelsen på best mulig måte?

Vi utvikler og drøfter ulike mål for hvordan forsinkelse, ventetid, reisetid og trengsel om bord kan måles og benyttes til å si noe om i hvilken grad den operative driften av bussveien gir trafikantene en god reiseopplevelse.

2. Steg 2: Hvordan forbedre trafikantkostnadene/ytelsen gjennom strategier for trafikkregulering?

Vi kartlegger hvilke strategier for trafikkregulering som eksisterer, hvordan disse påvirker ulike trafikanters interesser og i hvilken grad de er tilpasningsdyktige for å gjennomføre tiltak med positiv effekt.

3. Steg 3: Implementering av strategier

Vi gjennomgår og utvikler et rammeverk for hvordan Kolumbus kan implementere de anbefalte strategiene i en automatisk trafikkleder. Herunder gjennomgår vi hvordan bussvegsystemet kan modelleres, og utvikler regler og metoder for optimale reguleringstiltak i de ulike strategiene.

4. Steg 4: Sammenlikning: I steg 1-3 er det viktig å gjennomføre en sammenlikning mot andre bussveisystemer. Vi har derfor gjennomført et litteratursøk med det formål å avdekke hvordan steg 1-3 er løst i ulike referanseprosjekter.

Det underliggende premisset i hele rapporten er å gjøre brukernes opplevelse best mulig gjennom å minimere trafikantkostnadene. Analysen er dermed strukturert slik at vi:

- Starter med å se på hvordan vi kan måle trafikantopplevelsen kvantitativt.
- Undersøker deretter hvilke tiltak og strategier man kan benytte på operativt nivå for å gjøre trafikantopplevelsen best mulig.
- Lager et rammeverk for hvordan man kan implementere de ulike tiltakene i praksis.

De fire deloppgavene i rapporten er strukturert i ulike kapitler som hver for seg omhandler et helt, eller en del av stegene vist ovenfor.

1.1 Hvordan måles trafikantkostnadene/ytelsen på best mulig måte

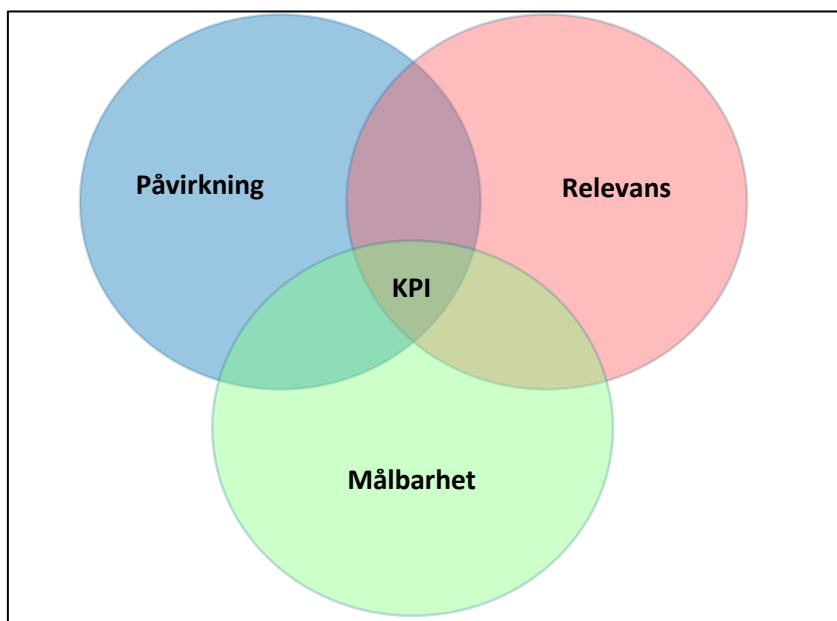
I dette prosjektet har vi utviklet og innhentet informasjon om relevante ytelsesindikatorer for bussvegen. Formålet med denne deloppgaven er å gi svar på hvordan man måler trafikantopplevelsen på en god måte. Presis måling er helt essensielt dersom man skal kunne undersøke hvordan ulike tiltak påvirker trafikantenes hverdag, og er derfor et naturlig sted å begynne.

Vi drøfter derfor hva trafikanten legger vekt på, hvordan vi måler dette, og hva som er viktigst. Vi kommer dermed frem til en rekke ytelsesindikatorer (KPI) som kan benyttes i den automatiske trafikklederen.

Vi har etablert noen kriterier for en god ytelsesindikator, slik at vår drøfting av fordeler og ulemper forhåpentligvis blir klarere. En god ytelsesindikatorer (KPI) kjennetegnes ved at den:

- har **relevans** for det eller de den skal si noe om
- er **målbar**
- kan **påvirkes** gjennom de styringsmekanismene man har til rådighet

Disse egenskapene ved en god KPI er illustrert på figuren under. En god ytelsesindikatorer for bussveien i Stavanger har relevans for trafikantene, er målbar og vil kunne påvirkes av den automatiske trafikklederen. Det er i bruk mer enn 400 ytelsesindikatorer i transportindustrien i dag, og de benyttes på ulike plannivåer (Dhingra, 2012). For superbussløsningen i Stavanger er det viktig å finne noen som kan benyttes på et operasjonelt nivå.



Figur S.2. Kriterier for et godt KPI som målbarhet, relevans og påvirkning

Det er viktig at ytelsesindikatorene ikke er vilkårlig, men springer ut ifra og imøtekommer de behovene som brukerne av bussløsningen har. Det er fordi i hvilken grad superbussløsningen oppfyller de skisserte målsetningene, kan måles ut i fra flere grupper/aktører sitt ståsted ettersom det er flere grupper/aktører i samfunnet som kan påvirkes av hvordan man utformer og drifter et kollektivsystem. Man må derfor starte med å definere hvilken gruppe som påvirkes av bussveien, og hvilke grupper man ønsker å fokusere på dvs. inkluderer i analysen. «A Guidebook for Developing a Transit Performance Measurement System» av Federal Highway Administration i USA, fremhever fire grupper som påvirkes av et kollektivtransportsystem:

1. **Brukerne:** De som faktisk benytter seg av systemet som passasjerer
2. **Samfunnet rundt:** De som påvirkes av kollektivsystemet selv om de ikke nødvendigvis benytter seg av det
3. **Operatøren:** De som drifter systemet
4. **Utførerne:** De som faktisk fører kjøretøyet langs ruten

I denne rapporten legges det størst vekt på brukerne av systemet ettersom oppdragets ramme tilsier at trafikantopplevelsen skal stå i sentrum for hvordan systemet driftes. Samtidig vil mulige konsekvenser for operatøren belyses der det måtte være relevant, mens effekter for førere og samfunnet for øvrig (slik som forurensning/støy, etc.) ligger utenfor oppdragets rammer.

Generelt om trafikantperspektivet

Tilbudsfaktorer

Fokusgruppen i denne rapporten er trafikantene. For å kartlegge hvilke egenskaper som er viktig for de og tallfeste hvordan kollektivtilbudet oppleves, deles derfor reisen opp i ulike bestanddeler¹, såkalte *tilbudsfaktorer*. En kollektivreise består således gjerne av ombordtid, tilbringertid (til og fra stasjon/holdeplass), antall bytter og eventuell byttetid, ventetid, eventuell forsinkelser, billettpris og i hvilken grad man får sitteplass eller ikke.

Verdsetting av tid

Bruken av slike tilbudsfaktorer bunner i at transport ikke er et mål i seg selv, men et middel for å komme seg fra A til B. Tiden man bruker på transport, kunne dermed potensielt vært brukt til noe annet. Hva denne tiden er verdt i alternativ anvendelse illustreres gjennom vektingen av tilbudsfaktorene. Vektingen av tilbudsfaktorene viser at de reisende opplever at reisens ulike bestanddeler har ulik grad av belastning, og i tillegg at ulike trafikanter ikke nødvendigvis verdsetter de samme tingene på samme måte. En person som skal hente barn i barnehagen innen stengtids, vil for eksempel være mest opptatt av pålitelighet og lite forsinkelse, mens personer med nedsatt bevegelsesevne er antageligvis sitter lenger på bussen fremfor å måtte gå langt til bussholdeplassen.

Generaliserte reisekostnader

Når tilbudsfaktorene sammenstilles og vektet slik at det måles i kroner, utgjør de sammen med billettprisen, summen tidskostnadene ved reisen. GK defineres derfor gjerne som «*summen av alle kostnader trafikanter står overfor når de tar beslutningen om å reise*». Det er altså den totale oppofrelse ved å foreta en reise målt i kroner, og sier noe om hvordan for eksempel kollektivreisen oppleves totalt sett (Statens vegvesen, 2014).

Under følger en beskrivelse av faktorene som påvirker kollektivtilbudet, som er av relevans for trafikklederen og som er målbare, og dermed vil være godt egnet som KPI-faktorer:

- **Ventetid**

Ventetid, den tiden man venter på bussen, er påvirker trafikantopplevelsen i høyeste grad. Selv om antall avganger per time skal være gitt for vårt formål, vil ulike reguleringsstrategier kunne påvirke faktisk ventetid gjennom såkalt «klumping», som igjen gir høyere ventetid enn rutetabellen tilsier.

- **Reisetid**
Reisetid påvirkes gjennom hastighet (sett bort fra forsinkelser). Normalhastighet påvirkes av avstanden mellom holdeplassene, trafikk (kø) og en rekke andre faktorer. Bussveien er planlagt å legges i separat trasé slik at kø trolig vil være et mindre problem. Samtidig er holdeplass-strukturen fastsatt, slik at hastigheten ikke påvirkes av dette. Det vil dermed først og fremst være avvik fra normaltid gjennom ulike forsinkelser som påvirker hastigheten.
- **Trengsel**
Trengsel er til en viss grad målbart gjennom å se på kapasitetsutnyttelsen om bord. Det er ikke sikkert om trafikklederen vil kunne påvirke trengsel direkte, men det virker rimelig at forsterkningsbusser vil kunne settes inn om problemer oppstår. En del av oppdraget er også drøfting av kapasitetshensyn, og dette anses derfor som en relevant KPI.
- **Forsinkelser**
Forsinkelser påvirker trafikantenes opplevelse av kollektivtilbudet i stor grad. I flere studier er det vist at de reisende opplever forsinkelse som spesielt belastende. Det er dermed en viktig faktor. Videre er det mulig for operatøren å påvirke forsinkelsene til en viss grad, gjennom god planlegging og avvikling av driften. Til sist er det målbart, og er dermed en høyst relevant KPI.

Gjennom å måle de nevnte faktorene mener vi at man fanger opp de viktigste delene av trafikantopplevelsen som kan påvirkes av trafikklederen, og hvor data er tilgjengelig på et hensiktsmessig nivå. Målingene blir viktige når man i neste steg skal drøfte hvilke verktøy som kan benyttes for å forbedre dem.

1.2 Hvordan forbedre trafikantkostnadene/ytelsen gjennom strategier for trafikkregulering

En viktig del av oppdraget har vært å vurdere ulike strategier for trafikkregulering. Ulike strategier vil være verktøy som kan benyttes for å gi trafikantene en bedre reiseopplevelse. Formålet med kapitlet er å drøfte styrker og svakheter ved ulike strategier/verktøy man kan benytte.

Vi har i samråd med oppdragsgiver valgt å fokusere på noen færre, men lovende strategier, istedenfor mange på et overordnet nivå. Dette gjør oss i stand til å utvikle de strategiene vi mener har størst potensialet mest mulig. Det er fire hovedstrategier som er vurder:

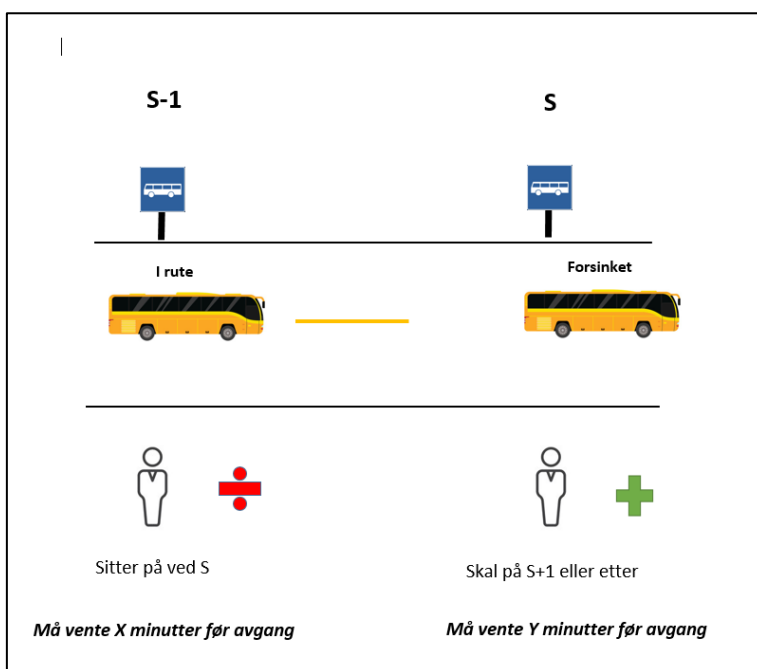
- Ingen tiltak
- Intervalltidsregulering
- Forbikjøring av holdeplass
- Første buss bestemmer

De ulike strategiene blir gjennomgått under. Vi starter med å definere dem, før resultatene fra en overordnet test viser hvordan fordeler og ulemper ved de ulike strategiene.

Intervallregulering er den mest lovende strategien

Figuren under viser prinsippet bak intervallregulering på holdeplass. Bussen på holdeplass S er forsinket, mens bussen klar til å forlate holdeplass S-1 er i rute. Dersom bussen ved S-1 kjører med én gang, vil den nærme seg buss S mer enn planlagt, som øker ventetidskostnadene for de som går på fra S og utover. Hvis man derimot utsetter avgangen fra S-1, vil man redusere «klumpingen», som forminsker ventetiden på de neste holdeplassene. Men samtidig vil dette være en belastning for passasjerene som allerede befinner seg på bussen ved S-1.

Intervallregulering påvirker altså trafikantene ulikt etter hvilken gruppe de tilhører.



Figur S.3. Illustrasjon av effektene ved intervallregulering. Passasjerer på S-1 får økt forsinkelse, mens passasjer fra S får redusert ekstra ventetid.

En optimal intervallreguleringstid vektet sammen kostnadene til trafikantene på regulerende og påfølgende holdeplass til et minimum. I hvilken grad man skal benytte intervallregulerende og eventuelt hvor mye, avhenger også av forholdet mellom dem som påvirkes negativt og positivt. En optimal intervallreguleringstid bør helst ta innover seg hvor mange som blir påvirket negativt eller positivt. Noen generelle trekk ved dette er at:

- Jo flere som sitter på bussene som blir forsinket/holdt igjen, jo kortere intervallreguleringstid
- Jo flere som går på etter intervallreguleringen, jo lengre intervallreguleringstid.

Det er imidlertid trolig at man ganske raskt når et punkt hvor det ikke er optimalt å forsinke ytterligere busser. Dette skyldes at:

- Gevinsten av jevnere intervaller er avtagende
- Kostnaden ved forsinkede busser er konstant

Med avtagende gevinst og konstant kostnad vil man nå et punkt hvor det ikke lenger er gunstig å forsinke bussene. Dette indikerer at man ikke behøver å ta hensyn til effektene bakover i traseen, over veldig mange avganger.

Stasjonshopping kan fungere, men er mindre treffsikkert enn intervallregulering

I motsetning til intervallregulering, er forbikjøring en mindre smidig strategi. Man kan enten velge å kjøre forbi, eller ikke. Man kan imidlertid velge hvilken holdeplass man skal kjøre forbi på en måte som gir lavest belastning for trafikantene. Følgende momenter påvirker sannsynligheten for at forbikjøring er gunstig:

- Jo færre som går på ved holdeplassen som forbikjøres, jo mindre belastende oppleves forbikjøringen (de må vente på neste buss)
- Jo flere som skal av holdeplassen som kjøres forbi, jo mer belastende oppleves forbikjøringen (de må vente på neste buss)
- Jo større forsinkelsen er, jo mer bidrar forbikjøring til å redusere forsinkelsene inntil et visst punkt.
- Jo flere som får redusert ventetid (jo flere som går på etter holdeplassen som kjøres forbi), jo mer gunstig er forbikjøring

Et veldig viktig element i beregningen er **hvor mye forsinkelse man klarer å kjøre inn** ved å hoppe over en holdeplass. Denne størrelsen avgjør hvor store fordelene ved å kjøre forbi en holdeplass blir versus kostnadene. Det går nemlig ikke an å redusere forsinkelsene mer enn det man klarer å «kjøre inn». Det finnes dermed en naturlig grense på hvor effektiv strategien vil være.

Oppsummert viser diskusjonen ovenfor at forbikjøringsstrategien uten kombinasjon av andre strategier er et mindre treffsikkert virkemiddel for å minimere trafikantkostnadene. Dette skyldes at forbikjøring er en «enten-eller»-avgjørelse hvor effektiviteten i stor grad styres av hvor mye forsinkelse man kan kjøre inn. Man kan enten kjøre inn mer eller mindre, eller akkurat tilstrekkelig mye for at å minimere trafikantenes tidskostnader. Generelt sett er det slik at:

- Dersom man kan kjøre inn mindre enn optimalt vil man ikke kunne realisere trafikantenes minimale kostnadsbelastning uten endringer i hastighetsprofil eller kjøremønster. Man må da kjøre raskere for at strategien skal bli mer effektiv.
- Dersom man kan kjøre inn mer enn optimalt vil man ikke kunne realisere trafikantenes minimale kostnadsbelastning uten endringer i hastighetsprofil eller kjøremønster. Man må da kjøre saktere for at strategien skal bli mer effektiv.

Diskusjonen viser at forbikjøring først blir effektiv i kombinasjon med andre strategier. Dette indikerer at forbikjøring blir en mer kompleks strategi før den kan gi fullt potensial. Man må i praksis først beregne en hva den optimal innkjørte forsinkelsen er, og deretter sjekke om denne er mulig å kjøre inn. Dette vil ikke være nødvendig ved intervallregulering, siden man her regulerer ankomsttidspunktet ved neste holdeplass fritt etter hvor lenge man venter på en gitt holdeplass.

Første buss bestemmer er den klart dårligste strategien

Et mål med oppdraget er å vurdere ulike strategier Kolumbus har satt frem. I dette avsnittet ser vi på intervallregulerende strategier og tester dem mot hverandre. Det er tre strategier som undersøkes samtidig, mens forbikjøring testes separat.

Gitt at en buss blir forsinket fra en holdeplass, undersøker vi effekten av:

- **Første buss bestemmer (FBB):** Alle busser bak holder igjen for å opprettholde konstante intervaller.
- **Ingen tiltak (IT):** Bussene fortsetter uten noen form for regulering
- **Intervallregulering (DH):** Vi benytter den optimale reguleringstiden

De tre strategiene representerer forskjellige avveiiinger mellom passasjerene og er egentlig spesialtilfeller av hverandre:

- Første buss bestemmer gir full prioritet til de som venter på bussen (**ventetidskostnadene**).
- Ingen tiltak legger full vekt på **forsinkelseskostnadene** til de som blir holdt igjen (ingen regulering gir ingen forsinkelse for de om bord).
- Intervallregulering forsøker å finne et **kompromiss** mellom ytterpunktene.

Våre illustrerende beregninger har antydnet at:

- «Først buss bestemmer» er den minst fordelaktige strategien siden denne gir veldig store forsinkelser som ikke lar seg forsvare av reduksjon i ventetid
- «Ingen tiltak» gir langt bedre resultat enn første buss bestemmer, men gir fortsatt 270 % høyere kostnader enn den beste strategien i vårt eksempel.
- «Intervallregulering» gir den laveste kostnaden for trafikantene, fordi man tar hensyn til at både forsinkelser og ventetidskostnader er viktig for trafikantene når man bestemmer hvor mye hver buss skal holdes igjen på holdeplassen.

Forbikjøring av holdeplasser blir først effektiv i kombinasjon med andre virkemidler

I oppdraget har vi også gjennomført en vurdering av forbikjøringsstrategien. Modellen som er brukt består igjen av to typer kostnader: Forsinkelse- og ventetidstap. Forsinkelsestap er større jo flere som skal av eller på holdeplassen man kjører forbi, mens ventetidstapet er større jo større forsinkelsene er og jo flere som skal på holdeplassene etter den man kjører forbi.

Grunnlaget for modellen er at man minimerer totalt tidstap for trafikantene. Tidstapet gjelder følgende grupper:

- De som egentlig skulle av på holdeplassen som man kjører forbi må gå av holdeplassen før. De opplever en forsinkelse, siden de er nødt til å vente på neste buss for å komme videre.
- De som skal på holdeplassen man kjører forbi vil oppleve å måtte vente på neste buss
- De som skal på holdeplassene etter den som kjøres forbi opplever redusert ventetid siden avgangene blir mer jevne.

Hvor mye man «tjener» på å hoppe over en holdeplass, avhenger av hvor mye tid man kan spare inn. Man behøver ikke å bremse opp og ned for stoppet man hopper over, samtidig som man ikke bruker tid på å plukke opp passasjerer. Man må imidlertid bruke tid på å slippe av passasjerene som skal av på stoppet man hopper over, men dette skjer ett stopp før. Nettobesparelsen er altså tid brukt på start og stopp, samt av- og påstigning.

I motsetning til intervallregulering, er forbikjøring en mindre smidig strategi. Man kan enten velge å kjøre forbi, eller ikke. Man kan imidlertid velge hvilken holdeplass man skal kjøre forbi på en måte som gir lavest belastning for trafikantene.

Analysene i rapporten har gitt oss følgende konklusjoner vedrørende effektivitet og hvilke parametere som påvirker ytelsen til forbikjøringsstrategien:

- De to aller viktigste faktorene som påvirker om kostnadene blir høyere eller lavere med forbikjøring er av- og påstigende ved forbikjørt holdeplass
- Størrelsen på forsinkelsene som har oppstått er den nest viktigste faktoren som påvirker hvor gunstig forbikjøring er.
- På linjen vi har undersøkt (Linje 2 i Stavanger) er antallet av- og påstigende er såpass høyt ved de fleste holdeplassene at det forsinkelsene ikke er store nok til å forsvare forbikjøringsstrategien.
- Reduksjonen i forsinkelsene ved forbikjøring øker ikke proporsjonalt med selve forsinkelsen. Det er den **mulige** innkjørte forsinkelsen som avgjør hvor fordelaktig forbikjøring er, og denne kan være begrenset.

I neste avsnitt presenterer vi vår anbefaling til prioritert rekkefølge for uttesting av strategier.

Anbefalt strategi

De ulike strategiene skiller seg på flere måter fra hverandre. I hvilken grad man inkluderer forsinkelser i regnestykket er trolig den viktigste. Der holding og forbikjøringsstrategien tar hensyn til forsinkelser, velger første buss bestemmer å ignorere denne delen av trafikantenes kostnader. En slik utelatelse gjør at strategien vil legge for stor vekt på redusert ventetid, uten å ta hensyn til de negative konsekvensene dette påfører trafikantene gjennom økte forsinkelser.

Både intervallregulering og forbikjøring tar hensyn til en større andel av trafikantenes kostnader gjennom forsinkelser og ventetid enn ingen tiltak og første buss bestemmer. Strategiene skiller seg imidlertid på hvilket type virkemiddel de benytter for å redusere forsinkelsene. Der intervallregulering står fritt til å velge nærmest hvilket som helst nivå på utsatt avgangstid, kan forbikjøringsstrategien benytte seg av et mindre sett av valgmuligheter for hvor nærme bussen foran man skal komme. Dette gjør at intervallregulering er en mer tilpasningsdyktig strategi, som i større grad gjør det mulig å «skreddersy» en regulering av trafikken som er samstemt med trafikantenes preferanser.

På bakgrunn av vår gjennomgang, anbefaler vi derfor følgende prioriterte rekkefølge for uttesting av de ulike strategiene i simulatormodulen:

1. Forenklet intervallregulering (se kap. 6)
2. Optimal intervallregulering
3. Forbikjøring

I tillegg fraråder vi å teste ut «første buss bestemmer», da denne strategien etter vårt syn har svært lite potensial for bidra til en bedre trafikantopplevelse. Vi anbefaler å teste ut forenklet intervallregulering først. Denne implementasjonen av intervallreguleringstrategien er noe mindre treffsikker en den optimale vi har sett til nå, men er vesentlig enklere å implementere.

1.3 Implementering av strategier

Anbefalt modell for tidsbruk i bussveien

En del av oppdraget var å etablere funksjoner som kan benyttes til å modellere tidsbruk i bussveien. Delkapitlet gjennomgår forskning og praksis for modellering av tidsbruk for offentlig transport på veg. En rekke metoder blir dokumentert og diskutert, før vi legger frem en anbefalt modell. Den anbefalte modellen er testet mot faktiske data, for å sikre at dens parametrisering er fleksibel nok til å gjenskape reisetidene på en tilfredsstillende måte. Parametriseringen er dokumentert i eget vedlegg.

På bakgrunn av validering og kalibrering av modellen legger vi frem en anbefalt modell. Vi har forsøkt å finne uten å inneholde for mange elementer gir en god beskrivelse av reisetiden mellom to holdeplasser.

Vi anbefaler og bruk den kalibrerte modellen for å beregne reisetid. Etter vår vurdering, gir denne modellen en tilstrekkelig god beskrivelse av reisetiden gitt dens kompleksitet. Den kalibrerte modellen består av følgende deler:

1. Reisetidsmodellen (sjåførmodellen)
2. Den enkleste modellen for simultan oppholdstid
3. Tid for åpning og lukking av dører på seks sekunder
4. Tid i rundkjøring som angitt av relevant formel

Denne modellen gir en god beskrivelse av tidsbruken uten å benytte de mest avanserte formlene, som trolig gjør den enklere å benytte. Vår tanke har vært at det fordelaktig å bruke en relativt enkel modell som beskriver mye av det fenomenet man er interessert i på en tilstrekkelig måte gitt kompleksiteten, og at den er fleksibel nok i parametriseringen for å tilpasses enkeltlinjer.

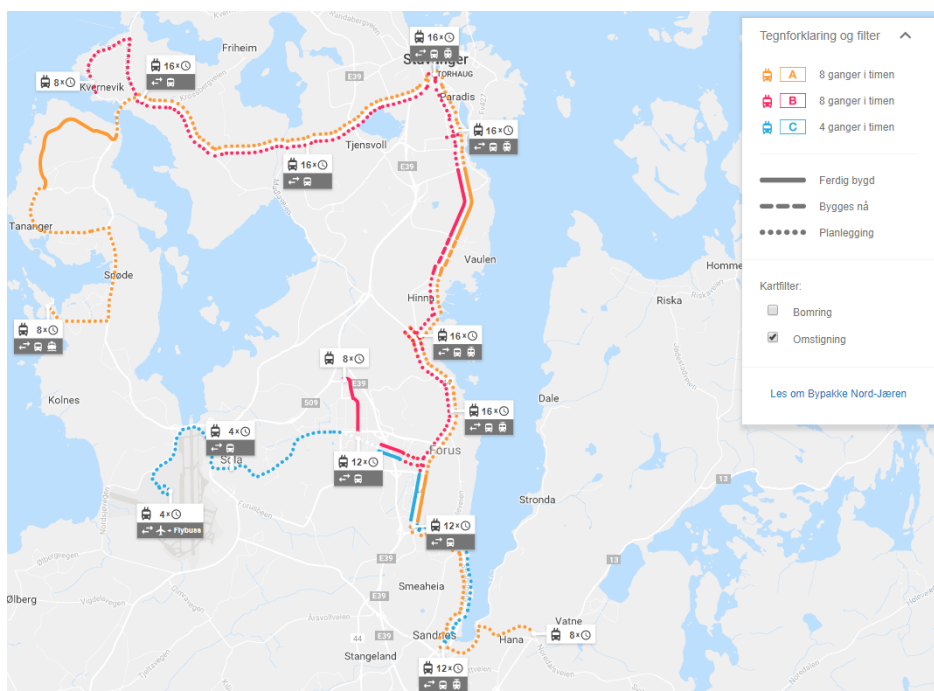
Videre har vi ikke inkludert tid for å finne ledig oppstillingsplass i modellen. Dette skyldes at regneeksemplene i kapitlet som omhandler modellen viser at dersom man har plass til to busser samtidig, er forsinkelsen veldig liten, selv med et relativt høyt tilbud. For eksempel klarer man minst å ta unna 80 busser i timen med 30 sekunder oppholdstid med to holdeplasser. Denne modellen kan vurderes brukt av Kolumbus dersom superbussen kommer til å dele trase med flere andre busslinjer. I tillegg kan den være aktuell i områder hvor flere av superbusslinjene møtes. Trolig vil denne modellen være mer aktuell på noen enkelte

2 Innledning

2.1 Bakgrunn for oppdraget

Gjennom «Konseptvalgutredning for Transportsystemet på Jæren» er det besluttet at en kollektivbasert utvikling med buss og jernbane skal legges til grunn for planleggingen av transportsystemet i byområdet på Nord-Jæren. Dette konseptet er konkretisert til prosjektet «Bussveien», som består av til sammen 26 strekninger som utgjør et ca. 50 kilometer langt bussveisystem i kommunene Stavanger, Sandnes og Sola. Det gjør løsningen til den lengste bussveien i Europa.

Bussveien planlegges som et helhetlig «Bus Rapid Transit» (BRT)-konsept der grunntanken er «*tenk bane, kjør buss*». Det vil gi et velstrukturert buss-system med høy kapasitet og gode kvaliteter når det står ferdig sommeren 2021². Tilbudet skal ha høy frekvens, og gå i egne traseer på 90 % av strekningen og ha trafikal prioritet i blandet trafikk for å unngå kø. Det gir forutsigbar reisetid. Det er ikke bestemt hvilken busstype som skal kjøre bussveien, men det er ønskelig at miljøvennlig og energieffektiv teknologi med lavt støynivå slik de først påtenkte trolleybussene (elektrisk buss som får strøm fra en kjøreledning på samme måte som en bybane).



Figur 2.1 Illustrasjon av den planlagte bussveien (Kilde: <http://www.rogfk.no/bussvei/Kart2>)

² Bussveien.no 2017. <http://www.rogfk.no/bussvei> Rogaland Fylkeskommune. Oppsøkt 28.11.17.

For aksene Stavanger-Forus-Sandnes-Sandnes øst var det i utgangspunktet besluttet at Bussveien skulle bygges på en måte som gjorde at den kunne konverteres til bybanedrift i fremtiden, dersom det skulle bli aktuelt. Etter prosjektinngåelse av denne rapporten har kravet om at bussveien i fremtiden skal kunne konverteres til bybane frafalt på grunn av store kostnadsoverskridelser knyttet til Busseveien-prosjektet. Konverteringen til bybane gjorde likevel bussveien enda mer aktuell for en automatisk trafikkleder.

En automatisk trafikkleder eller automatisk trafikkstyring betegner automatisk styring av trafikkstrømmer (personer, kjøretøy og gods) gjennom trafikkinformasjon, etterspørselsstyring, trafikkregulering og andre tiltak. En trafikkleder muliggjør for eksempel bruk av signalprioritering, mer miljøvennlig kjøring («eco-driving»), påvirkning av rutetabellen (vente- og byttetid), «smoother bus docking at stations» og ikke minst «headway regularity» som gjerne fremheves som hovedgevinsten i trafikkreguleringssammenheng. På denne måten kan en trafikkleder gjøre transportsystemet enda mer tilgjengelig, fremkommelig, sikkert og miljømessig holdbart³.

Kolumbus AS skal derfor gå til anskaffelse av en prototype på automatisk trafikkleder (opsjon A), og den er det Computas som skal utvikle. Den skal gi ut instruksjoner til alle systemene i bussveien, og alle systemene skal rapporterer tilbake status og tilstand slik at trafikklederen igjen kan tilpasse instruksjonene for å gi best mulig ytelse. Modellen består dermed av en simulatormodul, en trafikkledermodul og en rapportering- og visualiseringsmodul. Hensikten med den automatisk trafikkleder er å optimalisere ressursutnyttelsen og måloppnåelsen til bussveien, og generere sanntidsinstruksjoner til alle systemene på bussveien.

Instruksjonene som gis til systemet vil avhenge av hva slags trafikkreguleringsstrategi som velges. For å kartlegge effekten av de ulike metodene på det nye kollektivsystemet, ønsker Kolumbus å lage en realistisk simulatormodell av bussveisystemet i Stavanger. En modellering av bussveien krever en rekke antakelser og forenklinger, og Urbanet Analyse har derfor bistått Kolumbus AS med å definere parametere og mål for ytelsen til bussveisystemet gjennom en forstudie og en parameteranalyse (opsjon B). Dette redegjøres det for i denne rapporten som også vil være et viktig grunnlagsmateriale når Computas utvikler en prototypen på en automatisk trafikkleder (opsjon A) ettersom det sikrer at simulering og utvikling av automatisk trafikkleder gir realistiske og virkelighetsnære resultater.

2.2 Avgrensning

Denne rapporten tar utgangspunkt i trafikantperspektivet for best mulig tilbud til trafikantene til bruk på et operativt nivå, men man kan også se for seg at den automatiske trafikklederen kan benyttes til å nå for eksempel en miljøstrategi gjennom blant annet at bussene kjøres på en måte som gir minst mulig CO₂-utslipp («eco-driving»). Flere studier peker for eksempel på

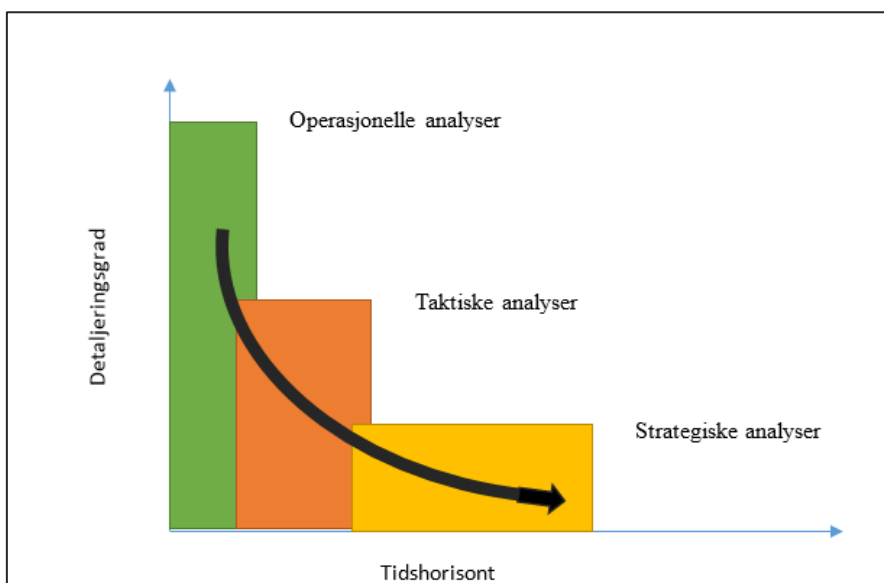
³ Statens vegvesen (2010). «Trafikkstyring». <https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/Forskning+og+utvikling/Avsluttede+FoU-program/ITS+pa+veg+mot+2020/Kunnskapsinnhenting/Trafikkstyring/trafikkstyring--100577>. Oppsøkt 04.01.18.

utslippsreduksjon som en viktig ytelsesindikator (Kaparias og Bell, 2011; Breithaupt *et al.*, 2014; Payne, 2015), men dette er ikke tatt med i denne rapporten.

Nyere analyser viser dessuten at det er en rekke tiltak som må iverksettes om kollektivtransporten skal bidra til å nå de nasjonale målene som er satt for transportsektoren (Norheim m.fl., 2015). Virkemidlene for å nå de fastsatte målene kan sorteres på flere ulike nivå avhengig av detaljeringsgrad og tidshorisont. Norheim m.fl. (2017) trekker for eksempel frem økonomiske rammebetingelser, bystruktur, tilgang til bil og organiseringen av kollektivtransporten som viktige faktorer for å øke kollektivtransportens reiseandeler. Dette er et typisk eksempel på strategiske virkemidler som analyseres på et mer overordnet nivå i strategiske modeller. Slike modeller har lavest detaljeringsgrad og lengst tidshorisont og viser effektene av å endre på de tunge, underliggende driverne bak trafikktviklingen. Urbanet Analyse har gjennom STRATMOD-prosjektet (Norheim & Betanzo, 2017) belyst en rekke problemstillinger på det strategiske nivået.

Det taktiske nivået er mellomstjiktet hva gjelder detaljeringsgrad og tidshorisont. Slike analyser tar for seg endringer med en tidshorisont på noen år frem i tid, og forutsetter gjerne noe tid fra analysen gjøres til tiltakene gjennomføres. Eksempel på slike analyser er endringer i linjenett og avgangstider for kollektivtransporten som for eksempel Urbanet sin utredning av kollektivbetjening i Buskerud (Berg. m.fl., 2017) og elektrifisering og anløpssted for Vassøyferga (Betanzo & Haraldsen, 2017a).

Det operasjonelle nivået har kortest tidshorisont og den høyeste detaljeringsgraden. Dette er snakk om analyser som tar for seg kortsiktige effekter av tiltak som implementeres raskt etter at analysen er gjennomført. Analyse i denne rapporten hører hjemme i den operasjonelle kategorien dvs. at den fokuserer på hva som kan gjøres på selve bussvegen i den daglige driften for å gi trafikantene et best mulig tilbud.



Figur 2.2. Illustrasjon av ulike analysenivåer med hensyn til detaljeringsgrad og tidshorisont.

Selv om rapporten fokuserer på det operative nivået, er det klart at de andre nivåene også påvirker hvor godt bussveien vil lykkes. For eksempel vil linjenett og holdeplassavstand (Betanzo & Haraldsen, 2017b) gi ulike rammebetingelser som igjen vil påvirke hvor mye man kan forbedre trafikantenes opplevelse på det operasjonelle nivået. Et eksempel er tilgang til parkering i sentrum. Dersom det er enkelt å kjøre bil til sentrum, vil ikke like mange benytte seg av bussveien. Dette innebærer at tiltak gjort på det operasjonelle nivået vil påvirke færre reisende, og igjen bidra mindre for å nå de nasjonale målsettingene for kollektivtransporten. Et mer langsiktig eksempel er bystruktur. Dersom man bygger en spredt by, svekkes konkurransekraften til kollektivtransporten (Norheim m.fl., 2017), og samme effekt som for parkering fremkommer.

Det er derfor viktig å understreke at gode virkemidler på alle de tre nivåene gjør tiltak på de andre mer effektive. Slik sett er det viktig å se denne rapporten inn i en større sammenheng, og legge til rette for at man benytter seg av gode tiltak på alle nivåer.

2.3 Rapportens struktur

Forstudien og parameteranalysen med tanke på å optimalisere bussvegen i Stavanger. Optimaliseringen skal minimere trafikantenes belastning ved å foreta reiser på bussveien. Rapporten er delt i to deler: En prinsipp-del og en metodedel.

- Prinsipp-delen er ment å abstrahere vekk fra implementasjonsdetaljene så langt som mulig, og heller fokusere på den innsikten vi kan hente ut fra analysene og beregningene vi gjennomfører.
- I metodedelen viser vi hvordan de ulike strategiene vi har diskutert kan implementeres. Metodedelen er dermed først og fremst ment for de som ønsker å gå dypere inn i de tekniske detaljene rundt beregningene. For de som bare er interessert i konklusjoner og erfaringer, anbefaler vi å lese prinsipp-delen, men ikke metodedelen.

I prinsipp-delen diskuterer vi mer overordnet tre hovedspørsmål som følger:

- **(Kap. 3) Hvordan måler man trafikantopplevelsen?** I det første steget diskuterer vi hvordan man kan måle trafikantenes opplevelse av bussveien ut fra data på et nivå som trafikklederen kan benytte. Dette blir viktig for å kunne sammenligne ulike tiltak og strategier gjennom KPI-er.
- **(Kap. 4) Hvordan forbedrer man trafikantopplevelsen?** I det andre steget spør vi hvilke verktøy vi kan benytte for å gjøre trafikantopplevelsen best mulig ut fra de virkemidlene man har tilgjengelig i den automatiske trafikklederen. Formålet er å diskutere ulike strategier som kan benyttes for å sørge for at systemet i praksis fungerer på en god måte for trafikantene.
- **(Kap. 5) Hva har andre gjort?** I dette steget undersøker vi hva som er gjennomført av tiltak i prosjekter som ligner på bussveien i Stavanger. Formålet er å vurdere de tiltakene vi foreslår med praksis i andre prosjekter.

I metodedelen utvikler vi et praktisk rammeverk som kan benyttes til å implementere de ulike strategiene i trafikklederen.

- **(Kap. 6) Hvordan modellerer man tidsbruk på bussveien?** I det første steget viser vi hvordan man kan modellere ulike reisetidskomponenter langs bussveien som kjøretid, oppholdstid, tid brukt i lyskryss osv.
- **(Kap. 7) Hvordan implementere strategiene?** I denne delen viser vi tre ting. Først gjennomgår vi et generelt rammeverk for hvordan man skal integrere reisetidsmodellen og strategier. Deretter viser vi hvordan man kan modellere «klumping» av bussavganger, før vi til sist viser hvordan man kan implementere strategiene i rammeverket vi har satt opp.

DEL 1: PRINSIPPER



Foto: Elisabeth Tønnessen

3 Måling av trafikantkostander og ytelse (KPI)

Formålet med dette kapitlet er å etablere et rammeverk for hvordan man kan måle trafikantenes reisebelastning ved bruk av bussveien. Dette er første steg i analysen, som vil gjøre den automatiske trafikklederen i stand til å vurdere konsekvensen av ulike tiltak som iverksettes. Vi gjennomgår nå hva trafikantbelastningen består av, hvilke elementer som passer inn i trafikklederen og hvordan vi kan måle disse i praksis som såkalte KPI-indikatorer.

3.1 Overordnede målsetninger

Ytelsesindikatorer gjør det mulig å se i hvilken grad systemet har oppfylt forhåndsdefinerte målsetninger. Det gjør det viktig å kartlegge målsetningene for superbussløsningen i Stavanger. Dette delkapittelet gir derfor først en redegjørelse for de nasjonale retningslinjene og deretter for de overordnede målene for busseveien.

Nasjonale retningslinjer

De overordnede nasjonale retningslinjene som skal ligge til grunn for bussveien i Stavanger, er:

- **Nullvisjonen**
Nullvisjonen, det vil si at vegnettet skal planlegges ut fra en visjon om at det ikke skal forekomme trafikkuulykker med drepte eller varig skadde, ligger som et premiss for planleggingen av Bussveien. Videre ligger det som et premiss at løsningene i Bussveien skal være universelt utformede.
- **Nullvekstmålet**
I Klimameldingen fra 2012 forpliktet Norge seg til å redusere de globale utslippene, noe man blant annet skulle oppnå gjennom nullvekstmålet som var et av hovedmålene i avtalen. Med nullvekstmålet menes at «*all trafikkvekst skal tas av kollektivtransport, gange eller sykling*», og det ligger til grunn for Nasjonal transportplan 2014-2023 og 2018-2029. Nullvekstmålet er utgangspunktet for en rekke av incentivordningene som er utformet for å nå de nasjonale klimamålsetningene, og legges blant annet til grunn i Bypakke Nord-Jæren. Det innebærer at transportplanleggingen i byområdet, som omfatter Stavanger, Sandnes, Sola og Randaberg kommuner, omfattes av nullvekstmålet, også bussveien. Bussveien skal dermed bidra til at det ikke skal være flere personbiler på veien i fremtiden enn det er i dag, og at fremtidig vekst i persontransporten skal tas gjennom gåing, sykling og kollektivtrafikk.

Mål for bussveien

Det er viktig å designe en tjeneste som tilfredsstill kollektivselskapet og kundens behov når man bygger en BRT-løsning, og det gjøres gjerne gjennom de definerte prinsippene, retningslinjene og standardene til systemet (APTA Bus Rapid Transit Working Group, 2010). I noen av plandokumentene for superbussløsningen er det skissert en rekke målsetninger for busseveien på et overordnet nivå. Disse er vist på figuren under.



Figur 3.1. Målsetninger for bussvegen på et overordnet nivå

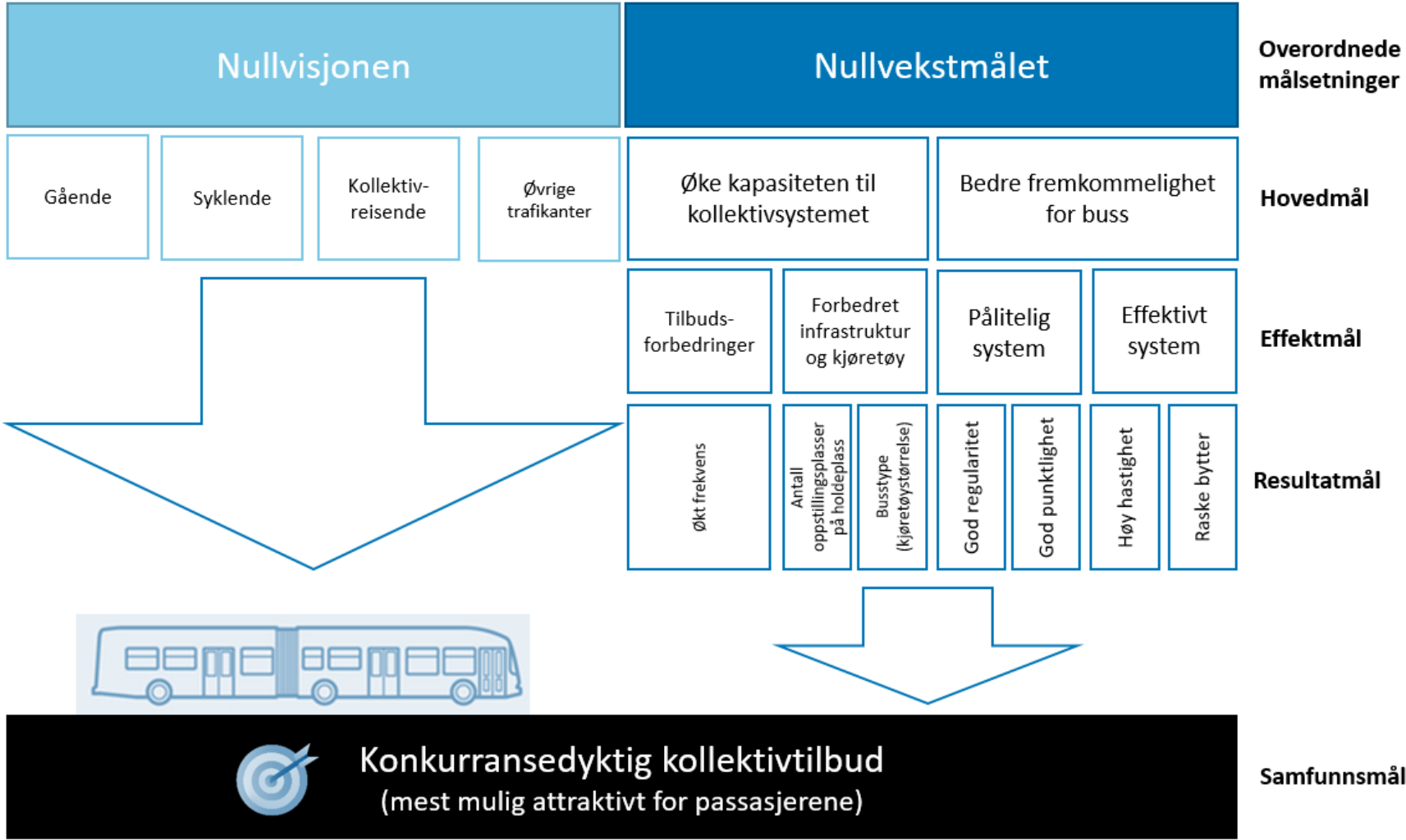
Både de nasjonale retningslinjene og målene for bussveien etterstreber et konkurransedyktig kollektivtilbud som er mest mulig attraktivt for passasjerene, og hvordan de henger sammen er vist på Figur 3.1.

Prinsipper fra BRT Standard

For å få et mest mulig attraktivt kollektivtilbud, skal bussvegen i Stavanger planlegges etter BRT-prinsippene der grunntanken er «*tenk bane, kjør buss*». Ettersom det ikke foreligger norske planleggingsstandarder for slike systemer, skal Bussveien i størst mulig grad planlegges og bygges i tråd med anbefalingene i «*The BRT Standard, 2014 Edition*⁴». «*The BRT Standard*» omtaler de ulike elementene som inngår i en slik løsning, og en kort omtale av det er gitt i Tekstboks 3.1. I tillegg nevner plandokumentene for bussveien en rekke ulike målsetninger, hvorav noen er vist på Figur 3.1. Det skisseres også en rekke kvalitetskrav til Bussveien basert på det som står i BRT-standard. Eksempler på kvalitetskrav er:

- Forsinkelsesfri fremkommelighet, hvilket både sikrer høy reisehastighet og et kollektivsystem passasjerene kan stole på
- En mest mulig rettlinjet trasé, som gir passasjerene en komfortabel reise
- Høye arkitektoniske kvaliteter, som gjør at Bussveien kan integreres som en attraktiv del av bybildet og fremme god byutvikling

⁴ Kilde: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/BRT-Standard-2014.pdf>



Figur 3.2 Mål for et konkurransedyktig kollektivtilbud i Stavanger

«The BRT-standard» gis det poeng for ulike valg av løsning, og maksimalscoren løsningen kan få totalt er 100 poeng. For å kvalifisere som en BRT-korridor i det hele tatt, må løsningen være minst 3 km lang, få minst 4 poeng på prioritert i vegsystemet minst 4 poeng for linjeføring, og minst 20 poeng på alle fire BRT-basics elementene. Deretter kan BRT-løsningene kvalifisere til tre ulike nivåer avhengig av totalsum: Gull (85-100 poeng), sølv (70-84 poeng) og bronse (55-69 poeng).

Tekstboks 3.1 Om "The BRT-standard"

Det er likevel ikke alle elementene som inngår i en BRT-løsning som kan styres av en trafikkleder (operasjonelle faktorer). De målsetningene som har betydning er derfor markert med blå ramme på Figur . Den viser at en automatiske trafikkleder indirekte vil kunne være med å påvirke kapasiteten til kollektivsystemet dersom den kan bidra til å mer effektiv bruk av materiell (økt frekvens), i tillegg til å bedre fremkommeligheten dersom den gir bedre pålitelighet og punktlighet for eksempel gjennom bedre avvikling gjennom lyskryss og sørger for at bussen kan holde en høyere hastighet. En tilsvarende gjennomgang av elementene som inngår i en BRT-løsning, er vist i påfølgende tabell. Der er de forholdene som gir rammebetingelsene til trafikklederen markert med lyserødt, mens de som ikke har noen direkte betydning for trafikklederen, er markert med rødt. Det som derimot har betydning og kan påvirkes av trafikklederen, er markert med grønt, og de som til dels kan ha en innvirkning er markert med lysegrønt. Oversikten viser at den automatiske trafikklederen kan påvirke særlig trafikkavviklingen og bidra til å opprettholde en gitt tilbudsutforming.

Noe av det samme viste rapporten «Identifying the performance parameters of importance in the design of Bus Rapid Transit: An experimental framework using microscopic simulation» som undersøkte hvilke av seks utformingselementer ved en BRT-løsning (traseen, stasjonene, kjøretøyene, billettinnkrevningen, ITS-teknologien, eller service- og driftsplanen) som hadde størst betydning for systemytelsen til en BRT-løsning (Bayle, 2012). Det ble gjort ved hjelp av en microsimulering på en gitt kalibrert og kodet del av byområdenettverk (en korridor) i Sydney, Australia. Den påpekte at særlig frekvensen til tilbudet, antall bussholdeplasser i nettverket (da det påvirker hastigheten), tilstedeværelsen av dedikert trase (reducerer forsinkelse) og kapasitetsutnyttelsen til nettverket har større betydning enn øvrige forhold (Bayle, 2012). Selv om rapporten i større grad ser på effekten av å velge ulike fysiske utforminger fremfor direkte å vurdere ytelsesindikatorer, viser den indirekte at ventetid ved holdeplass, hastigheten til bussene, forsinkelse og trengsel om bord (kapasitetsutnyttelse) er viktige ytelsesindikatorer. Ytelsesindikatorer omtales nærmere i påfølgende delkapittel.

Tabell 3.1. De like elementene en BRT-løsning består av

BRT-element	Direkte påvirkning av trafikkleder
«BRT basics»	
Eget bussfelt (minst 90 % av strekningen)	Infrastrukturen er ferdig bygd.
Bussvegens linjeføring/tverrsnitt	
Forhåndsbillettering	Må forutsette at dette gjennomføres slik at man reduserer oppholdstid ved holdeplass.
Påstigning på holdeplassnivå	
Vegkryss	Hvordan prioritet bussen har i forhold til øvrig trafikk, har stor betydning for trafikkavviklingen. Prioritering f.eks. i lyskryss vil styres gjennom trafikklederen.
Tilbudsplanlegging/utforming	
Lokasjon av korridor	Må forutsette at infrastrukturen er bygd der etterspørselen er høyest, og sett i lys av øvrig tilbud for best mulig kundegrunnlag
Etterspørselsprofil	
Korridor-nettverk	
Flere ruter benytter korridoren	Antall ruter vil påvirke hvor mye trafikklederen må håndtere, men vil ikke styres direkte gjennom trafikklederen
Kontrollsenner	En forutsetning for å ha en automatisk trafikkleder
Driftsdøgn	Driftsdøgnet er forhåndsbestemt, og inngår som en del av rammebetingelsene for trafikklederen f.eks. i beregningen av total passasjerkapasitet.
Ekspress/lokal service	Dersom rutene i traseen vil gå med ulik hastighetsprofil, vil det påvirke hvilke trafikkstyringsstrategier trafikklederen kan benytte
Infrastruktur	
Mulighet for forbikjøring på holdeplass	Mulighet for forbikjøring er forhåndsbestemt, og vil påvirke rammebetingelsene til trafikklederen i form av mulige driftsstrategier.
Minimalisere utslipp fra bussene	Dette vil ha betydning dersom man ønsker å styre busstrafikken etter en miljøstrategi («eco-driving»)
Lokalisering av holdeplass ift kryss	Kryssenes lokalisering er forhåndsbestemt, og vil påvirke rammebetingelsene til trafikklederen
Sentrerte stasjoner	Må forutsette at infrastrukturen er bygd med tilfredsstillende asfaltkvalitet og hensiktsmessig holdeplasslokasjon
Asfaltkvalitet	
Stasjoner	
Avstand mellom holdeplasser	Avstanden mellom holdeplassene er forhåndsbestemt gjennom holdeplass-lokalisering, og bestemmer maksfarten bussene kan ha. Avstanden mellom holdeplassene blir dermed en fast variabel inn i trafikklederen for beregning av makshastighet.
Trygge stasjoner med høy komfort	Det må antas at infrastrukturen tilrettelegger for mest mulig komfortable og trygge stasjoner. Den sosiale tryggheten kan ikke påvirkes direkte gjennom trafikklederen.
Antall dører på bussen	Antall dører på bussen påvirker oppholdstid ved holdeplass. Den bestemmes av innkjøpt materiell, og blir dermed en konstant variabel i trafikklederen.
Antall oppstillingsplasser	Antall oppstillingsplasser påvirker holdeplasskapasitet og dermed passasjerkapasiteten til løsningen. Antall oppstillingsplasser per holdeplass bestemmes i utformingen av infrastrukturen, og blir dermed en konstant variabel inn i trafikklederen.
Skyvedører på stasjonene	Det vil ikke anlegges skyvedører på stasjonen så dette er ikke aktuelt.
Kommunikasjon	
Merkevarebygging	Resultatet av trafikklederen vil kunne være viktig passasjerinformasjon og den automatiske trafikklederen kan benyttes inn i markedsføringen, men informasjonsflyten går ikke motsatt vei
Passasjerinformasjon	
Tilgjengelighet og integrering	
Universell utforming/tilgjengelighet	Det må antas at infrastrukturen er universelt utformet og tilrettelegger for best mulig tilgjengelighet (og trygghet) for alle trafikanter.
Tilgjengelighet for fotgjengere	
Sykkelfelt	
Trygg sykkelparkering	
Integrering med øvrig kollektivtransport	Avhenger av bruken av sanntidsinformasjon i samspill med trafikklederen.
Dele-sykkel integrering	Informasjon om det er ledige sykler kan påvirke hvilken holdeplass passasjerene velger å gå av på gjennom sanntidsinformasjon, men det tas ikke med i trafikklederen på nåværende tidspunkt.

3.2 Måling av ytelsen til bussveien fra trafikantenes perspektiv

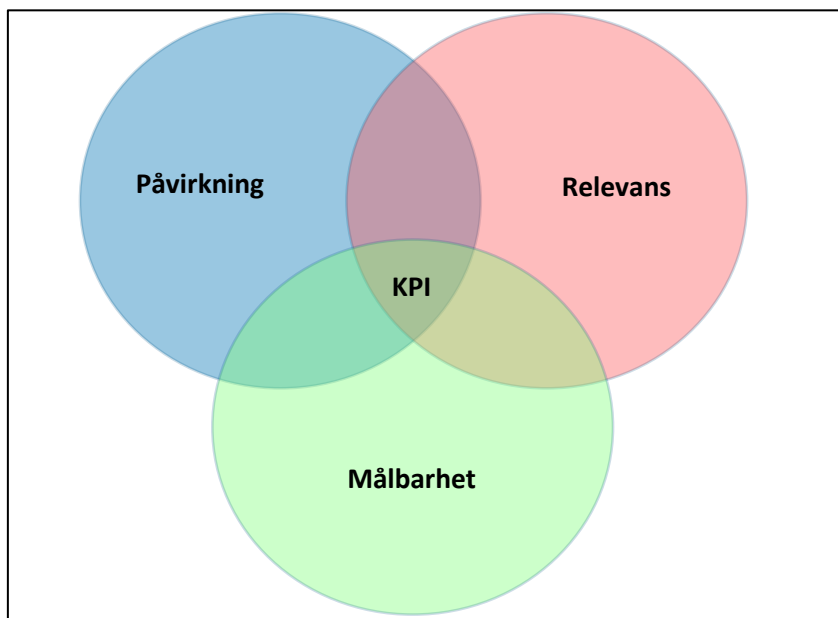
Vi gjennomgår nå hvordan man kan måle bussveiens ytelse sett fra trafikantenes perspektiv. Første steg er definere kriterier for en god ytelsesindikator, deretter avgrense påvirkede grupper, deretter diskutere relevante faktorer å se på, før vi til slutt operasjonaliserer faktorene.

Hva er en god ytelsesindikator (KPI)

Ytelsen til et system måles gjerne med ytelsesindikatorer, kanskje bedre kjent under den engelske betegnelsen «Key Performance Indicator» (forkortet «KPI»), og gjør det mulig å se i hvilken grad man har oppfylt de gitte målsetningene på en objektiv måte. Det er viktig at ytelsesindikatorene ikke er vilkårlig, men springer ut ifra og imøtekommer de behovene som brukerne av bussløsningene og/eller trafikklederen har. I tillegg er de gjerne lett å forstå og har en viss forutsigbarhet sånn at den kan sammenlignes over tid (Kaparias og Bell, 2011). En god ytelsesindikatorer (KPI) kjennetegnes dessuten ved at den:

- har **relevans** for det eller de den skal si noe om
- er **målbar**
- kan **påvirkes** gjennom de styringsmekanismene man har til rådighet

Disse egenskapene ved en god KPI er illustrert på figuren under. En god ytelsesindikatorer for bussveien i Stavanger har relevans for trafikantene, er målbar og vil kunne påvirkes av den automatiske trafikklederen. Det er i bruk mer enn 400 ytelsesindikatorer i transportindustrien i dag, og de benyttes på ulike plannivåer (Dhingra, 2012). For superbussløsningen i Stavanger er det viktig å finne noen som kan benyttes på et operasjonelt nivå.



Figur 3.3. Kriterier for et godt KPI, som målbarhet, påvirkning og relevans.

Avgrensning av berørte grupper

Det er viktig at ytelsesindikatorerne ikke er vilkårlig, men springer ut ifra og imøtekommer de behovene som brukerne av bussløsningen har (Kaparias og Bell, 2011). Det er fordi i hvilken grad superbussløsningen oppfyller de skisserte målsetningene, kan måles ut i fra flere grupper/aktører sitt ståsted ettersom det er flere grupper/aktører i samfunnet som kan påvirkes av hvordan man utformer og drifter et kollektivsystem. Man må derfor starte med å definere hvilken gruppe som påvirkes av bussveien, og hvilke grupper man ønsker å fokusere på dvs. inkluderer i analysen. «A Guidebook for Developing a Transit Performance Measurement System» av Federal Highway Administration i USA, fremhever fire grupper som påvirkes av et kollektivtransportsystem:

5. **Brukerne:** De som faktisk benytter seg av systemet som passasjerer
6. **Samfunnet rundt:** De som påvirkes av kollektivsystemet selv om de ikke nødvendigvis benytter seg av det
7. **Operatøren:** De som drifter systemet
8. **Utførerne:** De som faktisk fører kjøretøyet langs ruten

I denne rapporten legges det størst vekt på brukerne av systemet ettersom oppdragets ramme tilsier at trafikantopplevelsen skal stå i sentrum for hvordan systemet driftes. Samtidig vil mulige konsekvenser for operatøren belyses der det måtte være relevant, mens effekter for førere og samfunnet for øvrig (slik som forurensning/støy, etc.) ligger utenfor oppdragets rammer.

Generelt om trafikantperspektivet

Tilbudsfaktorer

Fokusgruppen i denne rapporten er trafikantene. For å kartlegge hvilke egenskaper som er viktig for de og tallfeste hvordan kollektivtilbudet oppleves, deles derfor reisen opp i ulike bestanddeler⁵, såkalte *tilbudsfaktorer*. En kollektivreise består således gjerne av ombordtid, tilbringertid (til og fra stasjon/holdeplass), antall bytter og eventuell byttetid, ventetid, eventuell forsinkelser, billettpris og i hvilken grad man får sitteplass eller ikke. Tekstboks gir en kort beskrivelse av de ulike tilbudsfaktorene.

Den påfølgende figuren viser at det særlig er høy hastighet og regelmessig frekvens som er viktig for trafikantene (Muñoz, 2017). Viktigheten av raske reisetider, korte ventetider, pålitelig frekvens og begrenset antall stopp dras også frem i artikkelen «Bus Rapid Transit Service Design» (APTA Bus Rapid Transit Working Group, 2010).

⁵ En bussreise kan for eksempel bestå av gangturen hjemmefra til holdeplassen (tilbringertid), tiden man bruker til å vente på bussen, ombordstigningstid, den faktiske kjøretid, avstigningstid og gangtid til bestemmelsesstedet som for eksempel arbeidsplassen, i tillegg til eventuelle forsinkelser.

Ombordtid (reisetid)

Med ombordtiden menes den tiden man befinner seg ombord på bussen, altså tiden bussen bruker på å reise mellom to holdeplasser (inkludert tid ved holdeplass). Den tiden man befinner seg ombord på bussen (bussens kjøretid) oppleves som den minst belastende delen av reisen ettersom tiden kan benyttes til andre ting som å arbeide, lese eller sove. De øvrige tilbudsfaktorene vurderes/vektes gjerne opp imot denne.

Tilbringertid

Den tiden det tar å komme seg hjemmefra til holdeplassen, og fra endeholdeplassen og til endelig destinasjon. Flere undersøkelser anbefaler å vektlegge tilbringertiden likt som reisetiden, mens Ellis og Øvrum (2014) viser at det varierer mellom byområdene. Det begrunnes med at på et lokalt nivå vil opplevelsen av tiden til og fra stasjonen påvirkes av grad av tilrettelegging og lokale forhold rundt holdeplassene

Bytte av transportmiddel (antall bytter og byttetid)

Ettersom det er uforholdsmessig dyrt å opprette et kollektivtilbud som gjør at alle reisende når sin destinasjon med ett og samme transportmiddel, må en del reisende bytte kollektivt transportmiddel for å komme frem til bestemmelsesstedet. Byttet innebærer en ulempe for trafikanten ved den faktiske ekstra tiden byttet tar (byttetid, både ventetid og gangtid), og belastningen ved det å bytte i seg selv (for eksempel det å måtte orientere seg på en ny holdeplass, eller usikkerheten ved om man rekker byttet dersom det første kollektive transportmiddelet skulle være forsinket). Dette illustrerer viktigheten av å tilrettelegge for gode såkalte «sømløse byttepunkt» dvs. enkel navigering og kort avstand mellom transportmidlene.

Forsinkelse

Defineres gjerne som den tiden ruten ligger bak oppsatt rutetabell, og innebærer dermed mer ventetid på holdeplass, eller tid ombord for den reisende. Denne tiden er påtvunget, og dermed mer irriterende enn den planlagte tiden ettersom det er knyttet stor usikkerhet til hvor stor forsinkelsen er og dermed hvor lang tid reisen faktisk tar. Dersom det er hyppige forsinkelser på en strekning, legges det inn ekstra marginer i ruteplanen. Belastningen knyttet til forsinkelser handler dermed både om tapt tid når forsinkelsen først har oppstått, og om faren for en mulig forsinkelse. Den nye bussløsningen langs E18 kan bidra til å redusere faren for mulig forsinkelse (påvirker utviklingen av rutetilbudet) og den faktiske forsinkelsen, spesielt i rush, ved å gi bussen fri fremkommelighet. Det sikres for eksempel gjennom egen trasé og ved å legge bussløsningen utenom kryss/rundkjøring ev. benytte signalprioritering dersom det ikke lar seg gjøre.

Ventetid

Ventetiden illustrerer belastningen ved at man ikke kan reise akkurat når man vil, i motsetning til en bilreise, og utgjør en stor andel av den totale reisetiden på korte reiser (Norheim and Ruud, 2007). Ventetiden har to komponenter i) åpen ventetid (faktisk ventetid på holdeplass) og ii) skjult ventetid (illustrerer at rutetidene ikke er nøyaktig tilpasset det tidspunktet man ønsker å reise/ankomme på). I modellsammenheng tar man ofte ikke hensyn til den skjulte ventetiden, og benytter en (åpen) gjennomsnittlig ventetid lik «tiden mellom to avganger per time dividert på to». Ventetiden avgjøres dermed av frekvensen på kollektivtilbudet, og flere avganger per time vil dermed redusere ventetiden til de reisende. Frekvensen til tilbudet av henger av når på døgnet reisen gjøres ettersom et kollektivtilbud gjerne operer med et sett av regler for å opprettholde en minimumsfrekvens (lavtrafikk), og et annet sett av regler som gir en høyere frekvens der frekvensøkningen (etterspørsel) og tidspunktet for den (rush) er definert (APTA Bus Rapid Transit Working Group, 2010).

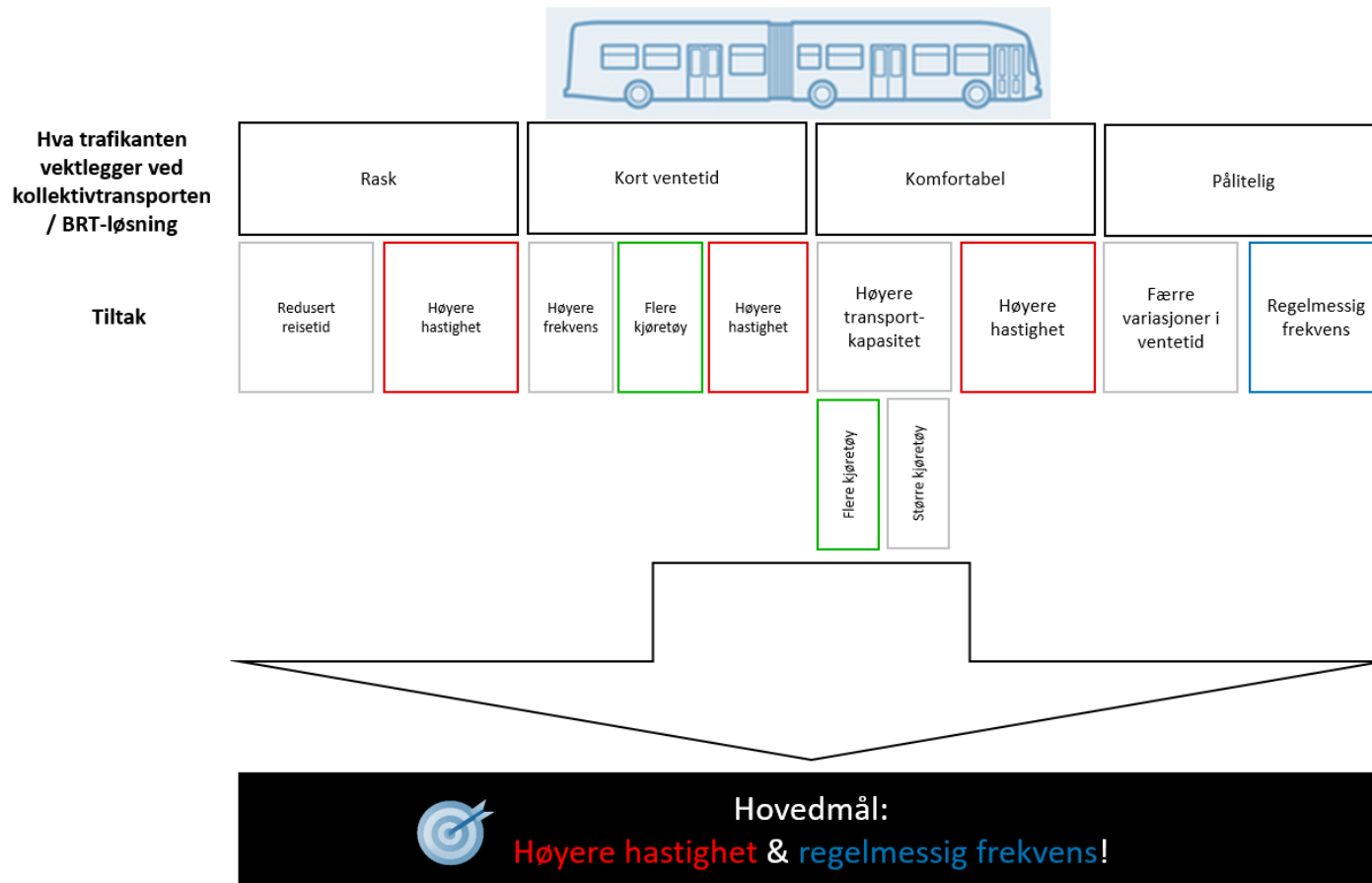
Trengsel om bord

Hvert kollektive transportmiddel har et gitt antall sitteplasser og plass til et visst antall stående passasjerer (praktisk kapasitet). Desto nærmere den praktiske kapasiteten transportmiddelet opererer, desto mer tettepakket vil menneskene måtte stå. Dette omtales gjerne som trengsel om bord, og oppleves veldig ubehagelig (og dermed som en belastning) for trafikantene. I tillegg blir det vanskeligere for passasjerene å komme seg av/på bussen når det er mange om bord, og bussen vil dermed bruke mer tid ved holdeplass (omtales under).

Takst

Den faktisk billettprisen er trafikantenes direktekostnad ved reisen. For kollektivtransporten er takstene både et virkemiddel for å skaffe flere passasjerer, og en finansieringskilde for å opprettholde et godt tilbud. Valg av "riktig" takstnivå avhenger dermed av hva som gir størst effekt på etterspørselen: Lavere takster eller et bedre tilbud (de trafikantavhengige kostnadene).

Tekstboks 3.2 Kort omtale av de ulike tilbudsfaktorene



Figur 3.4. Høy hastighet og like intervaller er noe av det viktigste i et trafikantperspektiv (utarbeidet med utgangspunkt i en figur av Muñoz, 2017)

Verdsetting av tid

Bruken av slike tilbudsfaktorer bunner i at transport ikke er et mål i seg selv, men et middel for å komme seg fra A til B. Tiden man bruker på transport, kunne dermed potensielt vært brukt til noe annet. Hva denne tiden er verdt i alternativ anvendelse illustreres gjennom vektingen av tilbudsfaktorene. Vektingen av tilbudsfaktorene viser at de reisende opplever at reisens ulike bestanddeler har ulik grad av belastning, og i tillegg at ulike trafikanter ikke nødvendigvis verdsetter de samme tingene på samme måte. En person som skal hente barn i barnehagen innen stengetid, vil for eksempel være mest opptatt av pålitelighet og lite forsinkelse, mens personer med nedsatt bevegelsesevne er antageligvis sitter lenger på busen fremfor å måtte gå langt til bussholdeplassen.

Generaliserte reisekostnader

Når tilbudsfaktorene sammenstilles og vektet slik at det måles i kr, utgjør de sammen med billettprisen, summen tidskostnadene ved reisen. GK defineres derfor gjerne som «*summen av alle kostnader trafikanter står overfor når de tar beslutningen om å reise*». Det er altså den totale oppofrelse ved å foreta en reise målt i kroner, og sier noe om hvordan for eksempel kollektivreisen oppleves totalt sett (Statens vegvesen, 2014).

Tilbudsfaktorer som ytelsesindikatorer

Ettersom tilbudsfaktorene kan omfatte flere ting som påvirker trafikantene, oppsummeres bare de som er relevant for dette arbeidet med bussveien i Stavanger tatt med i tabellen under. Det baserer seg på de nevnte tilbudsfaktorene i kombinasjon med oversikten gitt i «A Guidebook for Developing a Transit Performance Measurement System», og begrunnelsen for hvorfor de egner seg eller ikke gis under, fortrinnsvis med utgangspunkt i målbarhet og påvirkningsevne på trafikklederen.

Tabell 3.2. Tilbudsfaktorer vurdert ut fra kriterier for et godt KPI. Faktorer med full score på alle kriterier anses for å være en god KPI.

Mål	Relevans	Målbarhet	Påvirkning	KPI
Åpningstid	X	X		
Ventetid/Frekvens/Punktlighet	X	X	X	X
Reisetid/hastighet	X	X	X	X
Gangtid	X	X	X	
Forsinkelse	X	X	X	X
Bytter	X			
Takst	X	X		
Trengsel	X	X	X	X
Renhold	X	X		
Sikkerhet	X	X		
Komfort	X			

Under følger en kort beskrivelse av faktorene som påvirker kollektivtilbudet, som er av relevans for trafikklederen og som er målbare, og dermed vil være godt egnet som KPI-faktorer:

- **Ventetid**
Ventetid, den tiden man venter på bussen, er påvirker trafikkantopplevelsen i høyeste grad. Selv om antall avganger per time skal være gitt for vårt formål, vil ulike reguleringsstrategier kunne påvirke faktisk ventetid gjennom såkalt «klumping», som igjen gir høyere ventetid enn rutetabellen tilsier.
- **Reisetid**
Reisetid påvirkes gjennom hastighet (sett bort fra forsinkelser). Normalhastighet påvirkes av avstanden mellom holdeplassene, trafikk (kø) og en rekke andre faktorer. Bussveien er planlagt å legges i separat trasé slik at kø trolig vil være et mindre problem. Samtidig er holdeplass-strukturen fastsatt, slik at hastigheten ikke påvirkes av dette. Det vil dermed først og fremst være avvik fra normaltid gjennom ulike forsinkelser som påvirker hastigheten.
- **Trengsel**
Trengsel er til en viss grad målbart gjennom å se på kapasitetsutnyttelsen om bord. Det er ikke sikkert om trafikklederen vil kunne påvirke trengsel direkte, men det virker rimelig at forsterkningsbusser vil kunne settes inn om problemer oppstår. En del av oppdraget er også drøfting av kapasitetshensyn, og dette anses derfor som en relevant KPI.
- **Forsinkelser**
Forsinkelser påvirker trafikantenes opplevelse av kollektivtilbudet i stor grad. I flere studier er det vist at de reisende opplever forsinkelse som spesielt belastende. Det er dermed en viktig faktor. Videre er det mulig for operatøren å påvirke forsinkelsene til en viss grad, gjennom god planlegging og avvikling av driften. Til sist er det målbart, og er dermed en høyst relevant KPI.

Faktorer som påvirker trafikanttilbudet, har relevans for trafikklederen og er målbart, men som ikke egner seg som KPI-parameter:

- **Gangtid**
Gangtid, den tiden det tar å gå til holdeplassen, avgjøres av den fysiske plasseringen til holdeplassene. Dette er knyttet til utformingen av infrastrukturen, og vil i utgangspunktet ikke være en del av optimaliseringen. På den annen side er et av de strategiske grepene som skal vurderes forbikjøring av holdeplasser. Dette kan potensielt gi høyere gangtid, slik at dette er relevant, om denne strategien implementeres. Det kan derimot være noe utfordrende å måle gangtiden nøyaktig, all den tid man ikke kjenner trafikantenes reisemål.

Parametere som vil påvirke trafikanttilbudet, men som vanskelig lar seg måle eller har liten relevans for trafikklederen:

- **Åpningstid**
Åpningstid (tiden av døgnet med tilbud) har påvirkning på trafikantenes opplevelse av tilbudet; dersom det ikke går en buss, vil heller ikke systemet kunne brukes. Innenfor trafikksimuleringen, skal imidlertid tilbudet ligge fast, som betyr at åpningstiden også ligger fast.
- **Bytter**
Belastning knyttet til bytter mellom bussveien og andre transportmidler vil i noen grad kunne påvirkes av trafikkreguleringen gjennom takting mot andre buss- eller toglinjer. Man behøver imidlertid data om hvilke transportmidler man skal bytte til, for at dette kan bli en god KPI. Dersom man først og fremst har tilgang på av- og påstigningsdata, vil det bli vanskelig å måle byttekostnader, slik at en kan se bort fra dette.
- **Takst**
Takst er fastsatt utenfor trafikkregulatoren, og har dermed ikke relevans.
- **Renhold, sikkerhet og komfort**
Det er mulig å trekke inn sikkerhet og komfort gjennom kjøremønsteret til sjåføren. Med rask opp- og nedbremsing vil trafikantene potensielt få redusert komfort. Samtidig vil avstanden mellom bussene kunne påvirke sikkerheten, i det mindre avstand gir økt fare for kollisjoner. Vår vurdering er imidlertid at disse faktorene er relativt vanskelig å måle. Spesielt hvordan parametrene varierer for enkelte bussavganger. Komfortaspektet vil til dels tas hensyn til i valg av akselerasjons- og retardasjonsparametere i modellen for hastighet på bussveien. En ser dermed bort fra sikkerhet og komfort som en eksplisitt KPI. Renhold vurderes også til å ligge utenfor ansvarsområdet til den automatiske trafikklederen.

På bakgrunn av diskusjonen ovenfor anbefaler Urbanet Analyse at KPI-parametrene forsøker å dekke systemets ytelse mht reisetid, ventetid, forsinkelse og trengsel. Disse faktorene er målbare, relevante og kan påvirkes av operatøren, som er de tre kriteriene som legges til grunn for en godt KPI-parameter.

Neste steg er å diskutere hvordan man operasjonaliserer disse tilbudsfaktorene på bakgrunn av data som hentes inn av Kolumbus. Spørsmålet er da hvordan man måler de ulike tilbudsfaktorene på en mest mulig presis måte.

3.3 Operasjonalisering av valgte KPI-parametere

Operasjonalisering av KPI-parametrene innebærer at man utarbeider et opplegg for hvordan man ut fra tilgjengelig data fanger opp systemets ytelse med hensyn til tilbudsfaktorene KPI-parametrene skal dekke. Eksempelvis hvordan man måler forsinkelse og faktisk ventetid.

Det er flere grunner til at en drøfting av temaet er viktig:

- For det første kan det tenkes at to operasjonaliseringer måler det samme, eller flere tilbudsfaktorer, mens andre måler kun en. Spørsmålet er om man da skal velge faktorer som måler bredere.
- For den andre kan det være motsetninger mellom ytelsen målt ved de enkelte tilbudsfaktorene.

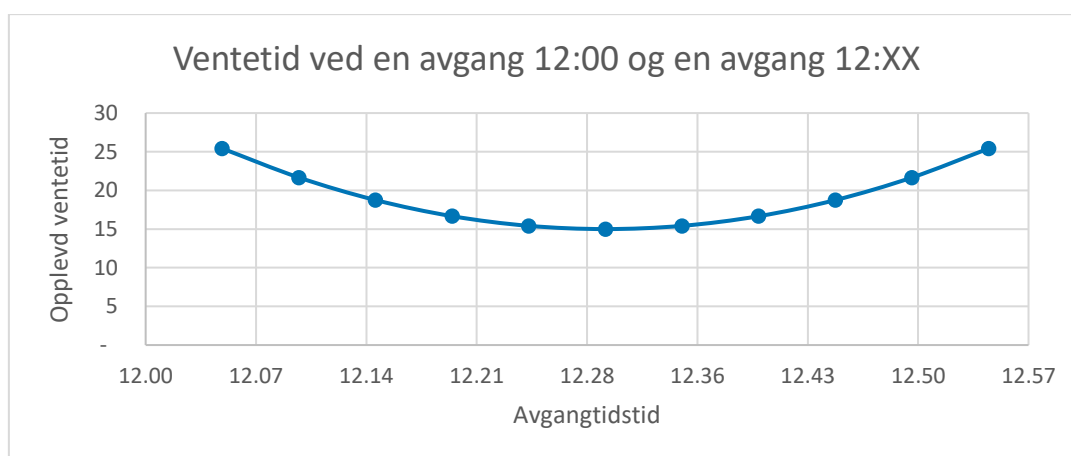
Det er gjennomført et litteratursøk for kartlegge hvilke metoder som brukes for å måle kvaliteten på ulike tilbudsfaktorer, og det er tatt utgangspunkt i litteratursøket i operasjonaliseringen av de ulike KPI-parameterne.

Ventetid

Ankomstmønsteret til bussene påvirker ventetiden på holdeplassene i stor grad. Det er vanlig å kalle ytelsen for denne tilbudskomponenten systemets *reliabilitet*. Dersom man har faste intervaller vil ventetiden være halvparten av tiden mellom avgangene, gitt at passasjerene ankommer holdeplassen tilfeldig. Men jo mer irregulære avgangene er, jo høyere blir den faktiske ventetiden.

Fenomenet skyldes at mer irregulære avganger med ulike intervall, vil bety at noen avganger er tettere, mens man har perioder med lengre ventetid. Dersom passasjerene ankommer holdeplassen tilfeldig, vil det være større sannsynlighet for ankomst i et tidsrom med lang, enn kort ventetid. Dermed «skyves» den faktiske ventetiden opp fra den teoretiske (Furth & Muller, 2011).

Figuren under vises et eksempel på sammenhengen mellom faktisk ventetid og planlagt ventetid etter ulike avgangstider. I eksemplet er det en avgang klokken 12:00 og en 12:30. Grafen viser hva den faktiske ventetiden blir i gjennomsnitt dersom avgangen planlagt 12:30 går ved andre tidspunkt. Kurven er lavest ved 12:30 (15 minutters ventetid) og øker i begge retninger. Hvis avganger går etter 12:30, påvirker den reisende før 12:30, og motsatt hvis avganger går før 12:30 som resulterer i formen vist på kurven under.



Figur 3.5. Faktisk ventetid etter avvik fra planlagt avgangstid klokken 12:00, 12:30 og 13:00. X-aksen viser faktisk avgangstid for 12:30-avgangen og y-aksen tilsvarende ventetid.

Det finnes flere måter å måle ekstra ventetid på i litteraturen. Metoden som har fått mest oppmerksomhet er den såkalte «excess wait time»-metoden (EWT), som måler den ekstra ventetiden man opplever i forhold til rutetabellen (Furth & Muller, 2006; Trompet et.al., 2011).

Dersom $EWT = 2$, indikerer dette at passasjerene i gjennomsnitt venter 2 minutter lenger enn det planlagt rutetid skulle tilsi. Dersom $EWT = 0$, holdes avgangene perfekt, og det er ingen ekstra ventetid.

Ifølge Trompet et.al. (2011) dekker dette målet fire viktige kriterier på en gode måte:

- Det er relativt lett å kommunisere
- Det er et objektivt mål (man behøver ikke *definere* et avvik er for alle avvik telles med)
- Det måler ytelsen for alle passasjerer
- Det straffer veldig lange ventetider

Trompet et.al. (2011) trekker også frem regularitetsmål hvor man definerer regularitet som antall avganger hvor forskjellen mellom planlagt og faktisk ankomsttid er over et visst intervall. Denne definisjonen er i større grad knyttet til forsinkelser, og er vesentlig mer subjektiv (man må definere et terskelverdi, den måler kun påvirkning for passasjerer på avganger over terskelen (måler ikke ytelsen for alle passasjerer) og den straffer ikke høyere ventetider mer enn lavere. De anbefaler dermed å bruke EWT, spesielt i tilfeller hvor man har avganger med faste intervaller.

Beregningen av EWT kan gjøres på flere måter. En relativt enkel metode er å benytte følgende formler der AWT er faktisk tid mellom avganger og SWT er planlagt tid mellom avganger:

$$AWT = \frac{\sum_i AHway_i^2}{2 \sum_i AHway_i}$$

$$SWT = \frac{\sum_i SHway_i^2}{2 \sum_i SHway_i}$$

EWT er dermed differansen mellom disse tallene $EWT = AWT - SWT$. Målet forutsetter at man har planlagt like intervaller mellom hver avgang. Hvis ikke, vil man kunne få en negativ EWT. Årsaken er at et rutetilbud med faste intervaller gir den laveste ventetiden. Hvis man planlegger med ujevne intervaller, mens det i driften faktisk oppstår jevne intervaller, vil systemet oppnå en lavere ventetid enn planlagt. Det foreslås derfor en modifisert utgave, som tar hensyn til disse faktorene, EWT_M :

$$EWT_M = \max(AWT - SWT, 0)$$

Her endres definisjonen til maximum av null og den opprinnelige definisjonen. Man vil dermed aldri få en negativ verdi. Hvis $EWT_M = 0$ betyr dette enten at man holde en ujevn rutetabell helt perfekt, eller at den faktiske ventetiden er lavere enn den planlagte.

Målet som er satt opp her gjelder for én time, for én holdeplass. Man kan vekte uttrykket opp over flere holdeplasser og tidsperioder på forskjellige måter. En relativt rett frem metode, vil

være å vekte etter passasjertall. En vektet EWT for en time, vil kan for eksempel regnes ut ved å beregne EWT per holdeplass h ($EWT_{M,h}$) som et vektet snitt av påstigende på holdeplassen per time (P_h):

$$EWT_{M,t} = \sum_h \frac{P_h EWT_{M,h}}{\sum_h P_h EWT_{M,h}}$$

Man kan gjøre lignende aggregeringer for tidsperioder også.

Beregning av EWT

Under vises et eksempel på beregning av EWT for en holdeplass i en gitt time. Man har planlagt ankomst, headway ved denne (tid mellom avganger) og det samme for faktisk ankomst.

Steg 1) Beregn kvadrert headway for planlagt og faktisk ankomst $A/SHway_i^2$

Steg 2) Beregn summen av kvadrert headway ($\sum A/SHway_i^2$) og headway ($\sum_i SHway_i$)

Steg 3) Del på summene som i formlene og beregn $EWT = AWT - SWT$

I eksemplet under blir dette

Steg 1) Se tabell under

Steg 2) Man får $\sum SHway_i^2 = 396$, $\sum_i SHway_i = 52$, får $\sum SHway_i^2 = 431$ og $\sum_i SHway_i = 49$

Steg 3) $EWT = 49/431 - 52 - 396 = 0.59$ minutter tilsvarende 35 sekunder høyere ventetid enn planlagt.

Planlagt ankomst	Headway	Minutter	Minutter i annen	Faktisk ankomst	Headway	Minutter	Minutter i annen
06:39:00				06:41:00			
06:46:00	00:07:00	7	49	06:48:00	00:07:00	7	49
06:55:00	00:09:00	9	81	06:56:00	00:08:00	8	64
07:01:00	00:06:00	6	36	07:02:00	00:06:00	6	36
07:09:00	00:08:00	8	64	07:15:00	00:13:00	13	169
07:16:00	00:07:00	7	49	07:17:00	00:02:00	2	4
07:25:00	00:09:00	9	81	07:27:00	00:10:00	10	100
07:31:00	00:06:00	6	36	07:30:00	00:03:00	3	9
SUM		52	396			49	431
Planlagt rutetid		3.81		Faktisk rutetid		4.40	
EWT		0.590					

Forsinkelser

Forsinkelser kan defineres som avviket mellom faktisk og planlagt avgangstid. Slik forsinkelser ofte er definert i litteraturen, vil det ha en viss likhet med ventetid som ble diskutert i forrige avsnitt. Dette skyldes at sen ankomst ofte vil gi en økt ventetid. Det er derfor viktig å diskutere sammenheng mellom de to målene etter å ha definert hvordan forsinkelser måles.

Det er to KPI-parametere som er trukket frem i litteraturen: Punktlighet og gjennomsnittlig forsinkelse. KPI-parametere som diskuteres under dekker to ulike formål:

- Punktlighet er en global parameter som beskriver forsinkelsen for hele systemet. Denne er også lettere å kommunisere utad.
- Gjennomsnittlig forsinkelse etter tidsperiode er en lokal parameter som beskriver forsinkelsen i et gitt tidspunkt

Punktligheten vil være et godt mål når man skal oppsummere overordnet hvordan forsinkelsene i kollektivsystemet er, mens gjennomsnittlig forsinkelse vil være et kompletterende mål som i større grad muliggjør å identifisere områder hvor man bør sette inn tiltak.

Forsinkelser kan defineres som differansen mellom planlagt og faktisk ankomsttid, målt i minutter eller sekunder. Målet gir forsinkelser i absolutt forstand, og et mye brukt praktisk mål er å benytte *andelen av avgangene som har en differansen mellom planlagt og faktisk ankomsttid over en viss terskel* (Furth. Et. al., 2006), såkalt «schedule adherence» eller «punktlighet» på norsk. Hvis man lar $I_{|t^P-t^F|>t_{min}}$ være en indikator funksjon som er 1 hvis planlagt ankomsttid (t^P) er annerledes enn faktisk ankomsttid (t^F) over en viss terskelverdi (t_{min}) og N er antall avganger, er punktligheten (p):

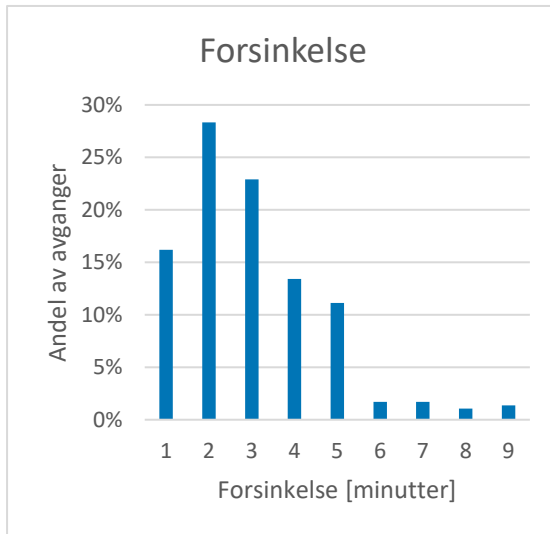
$$p(t_{min}) = \frac{\sum_i I_{|t^P-t^F|>t_{min}}}{N}$$

Dette målet vil påvirkes av hva man definerer som terskelverdi. Figuren under viser et eksempel på forsinkelser på linje 2 på Nord-Jæren. Her er forsinkelsene målt som absoluttverdien av differansen mellom faktisk og planlagt ankomsttid. I venstre panel vises punktlighet som beregnet med formelen over etter ulike terskelverdier.

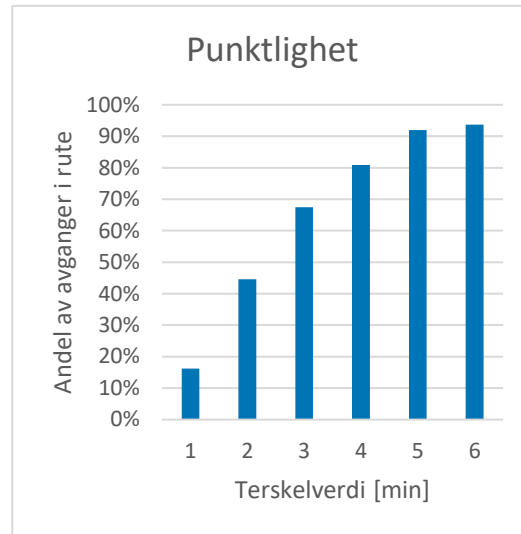
Figuren viser en naturlig motsetning i punktlighetsmålet:

- **Dersom man setter terskelverdien lavt**, vil selv små avvik regnes som en forsinkelse. I en normal driftssituasjon er det rimelig å forvente noe avvik fra det nøyaktige klokkeslettet avganger er planlagt til. Dermed blir målet lite informativt.
- **Dersom man setter terskelverdien for høyt**, vil man kunne utelate hvordan forsinkelser påvirker en gruppe av trafikantene, og i praksis oppnå en vilkårlig høyt punktlighetstall. Også i dette tilfellet blir målet lite informativt.

En utfordring med punktlighet er at det er uklart hvordan terskelverdien skal defineres.



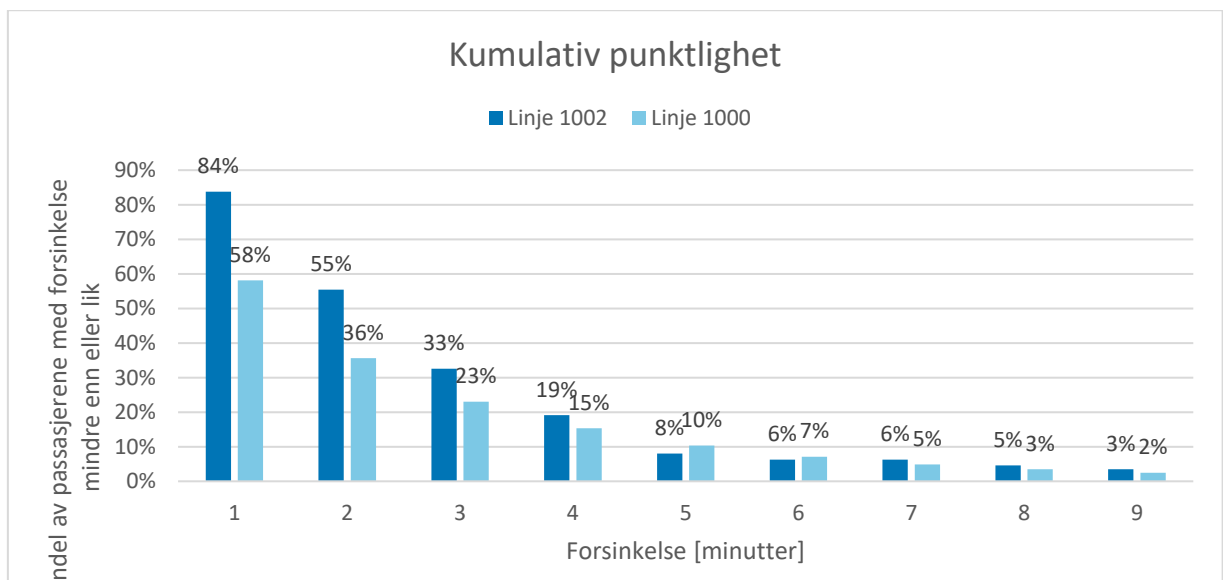
Figur 3.6: Frekvensfordeling over forsinkelse på eksempel linje



Figur 3.7. Punktligheit etter ulike terskelverdier

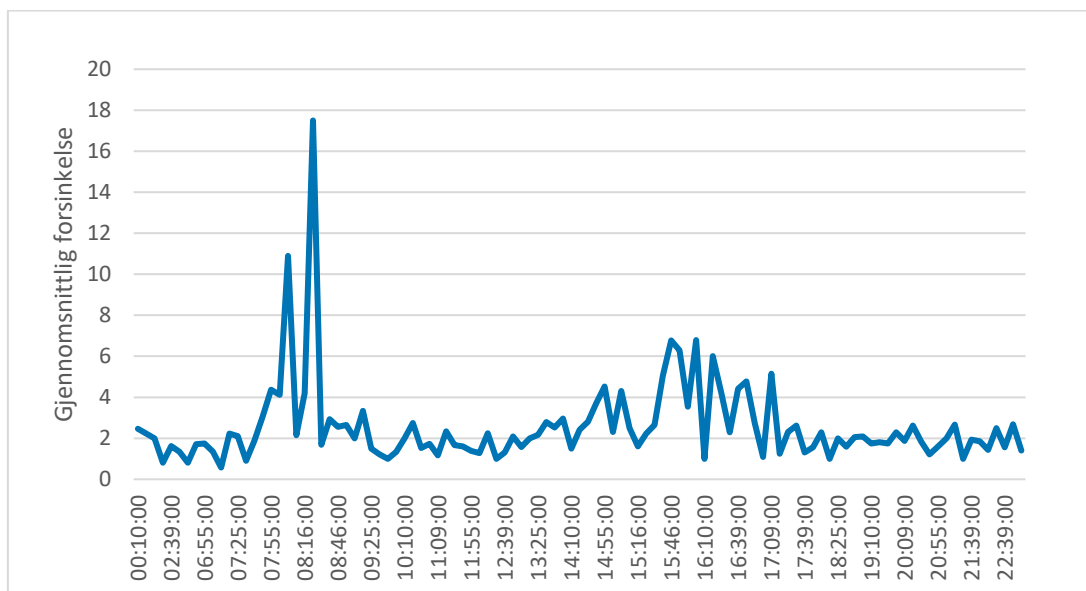
En metode for å omgå problemet er å variere terskelverdien for å variere terskelverdien og beregne den kumulative fordelingen til forsinkelsene. Dette viser hvor mange av avgangene som har en forsinkelse mindre enn eller lik terskelverdien t_{min} .

Figuren under viser den kumulative punktligheten. Dette gir et langt bredere bilde enn en gitt terskelverdi. Da får 84 % av avgangene mindre enn eller lik 1 minutt forsinkelse, 55 % mindre enn eller lik 2 minutter for linje 1002. Videre er det tegnet inn data fra linje 1000. Denne linjen har lavere punktlighet siden stablene er lavere på de lavere kategoriene, og høyere i «halen».



Figur 3.8. Illustrasjon av kumulativ punktlighet for to linjer (1000 og 1002) i Stavanger. .

Den kumulative punktligheten er en gode måte å oppsummere den totale forsinkelsen i kollektivsystemet på. Men når man skal gjennomføres tiltak, kan det være nyttig å undersøke noe mer finkornet hvor forsinkelsene oppstår. Et tillegg er derfor å se på den gjennomsnittlige forsinkelsen over en viss tidsperiode. Man vil da kunne identifisere hvilke tidsperioder som bidrar til at den kumulative forsinkelsen øker.



Figur 3.9. Gjennomsnittlig forsinkelse etter tidsperiode. Avvik mellom planlagt og faktisk tid.

Figuren over viser gjennomsnittlig forsinkelse for linje 1002 på Nord-Jæren. Man ser her en klart topp i morgenrushet, hvor en nokså høye forsinkelser oppstår. Slik informasjon vil kunne være et nyttig supplement til den mer overordnede kumulative punktligheten.

Sammenhengen mellom forsinkelser og ekstra ventetid

Et viktig poeng som ble nevnt innledningsvis var en eventuell sammenheng mellom forsinkelser og ekstra ventetid. Målene er intuitivt knyttet sammen, og det er derfor viktig å diskutere om man unødig måler det samme fenomenet «dobbel opp» med dobbelt så mye arbeid som nødvendig.

Det er flere viktige forskjeller mellom forsinkelser og ekstra ventetid. Først og fremst påvirker målene to ulike grupper:

- Forsinkelse er knyttet til målpunkt og ankomsttid. Det avgjørende er forskjellen mellom planlagt og faktisk **ankomsttid** for de **avstigende**.
- Ventetid er knyttet til startpunkt og avgangstid. Det avgjørende er forskjellen mellom planlagt og faktisk **avgangstid** for de **påstigende**.

Forsinkelse og ventetid påvirker altså to ulike grupper. Det er også en mulighet for overlapp mellom gruppene; at man både kan være forsinket på første og siste holdeplass for reisen man foretar. Dersom man ønsker å beregne gjennomsnittlige KPI-parametere vektet etter

passasjerer, er det en forutsetning at man behandler ventetid og forsinkelse som to separate størrelser, siden de påvirker ulike grupper.

På den annen side eksisterer det et motsetningsforhold mellom forsinkelse og ekstra ventetid. Forsinkelse kun avhenger av ankomsttiden på en gitt holdeplass, mens ventetiden avhenger av forsinkelse (faktisk avgangstid) på en gitt holdeplass og holdeplassen rett før. Dette skyldes at ventetiden er en funksjon av tiden **mellom avgangene**. Dersom bussen er forsinket på plattformen før, vil innkjøring av forsinkelsen gi reduserte økt gjennomsnittlig ventetid på nest holdeplass. Dette skyldes at ventetiden øker jo mer ujevne avgangene er. Dersom det oppstår en forsinkelse, vil ventetiden minimeres ved å holde denne forsinkelsen lik gjennom hele ruten. Kjører man den inn, blir intervallene mer ujevne og ventetiden øker.

Dersom man definerer forskjellen mellom faktisk og planlagt intervall mellom avgangene (under forutsetning av to avganger i timen) som:

$$\Delta H = (T_1^F - T_0^F) - (T_1^P - T_0^P)$$

Hvor T_1^F er faktisk ankomsttid på plattform 1, T_0^P er planlagt ankomsttid på plattform 0 som kommer rett før 1. Hvis man ser bort fra oppholdstid, slik at ankomst- og avgangstid er lik, og definerer forsinkelse på plattform i som $F_i = T_i^F - T_i^P$, kan ekstra ventetid skrives som⁶:

$$EWT = \frac{(F_1 - F_0)^2}{2H^P}$$

Hvor $H^P = (T_1^P - T_0^P)$ er planlagt headway (intervall) mellom avgangene. Formelen viser at ekstra ventetid er en fallende funksjon av forskjellen mellom forsinkelse på en gitt holdeplass og holdeplassen før, $F_1 - F_0$. Dette gjør at sammenhengen mellom forsinkelser og ventetiden ikke er én-til-én:

- Hvis det hverken er forsinkelser på forrige, eller inn mot neste holdeplass, ($F_0 = 0, F_1 = 0$), vil ekstra ventetid være null fordi man opprettholder konstante intervaller mellom avgangene.
- Hvis bussen er like forsinket på begge holdeplasser, vil ekstra ventetid være null ($F_0 = F_1$) fordi man opprettholder konstante intervaller mellom avgangene.
- Hvis det ikke er forsinkelser på forrige holdeplass, men oppstår forsinkelser underveis ($F_0 = 0, F_1 > 0$), **vil reduksjon av forsinkelsene** inn mot neste holdeplass **redusere ventetiden**.
- Hvis det er forsinkelser på forrige holdeplass, men ikke underveis ($F_0 > 0, F_1 = 0$), kan **økte forsinkelser** inn mot neste holdeplass **redusere ventetiden**.

⁶ Den teoretiske definisjonen av ekstra ventetid er $1/2H^P * cv^2(H)$ hvor $cv^2(H)$ er variasjonskoeffisienten til intervallene mellom avgangene. Følger man definisjonen med noe omskriving, ender man opp med uttrykket for EWT som en funksjon av forsinkelse.

Siden forsinkelse og ventetid til dels påvirker to ulike grupper og kan være motstridende mål, er det ikke tilstrekkelig med en enkelt KPI-parameter for begge, og man bør derfor måles separat.

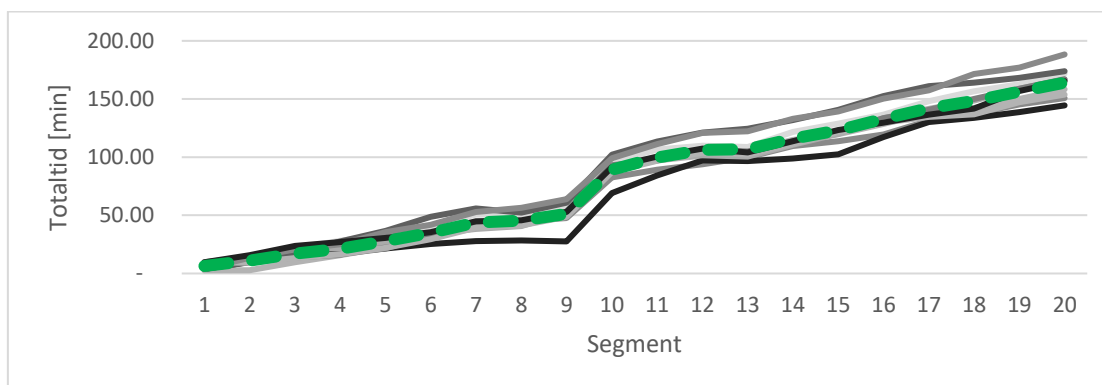
Reisetid

Reisetid er en viktig komponent for trafikantene som påvirker deres opplevelse av tilbudet. Reisetiden er åpenbart en funksjon av hastigheten på vei. Gjennomsnittshastigheten vil også knyttes til både ventetid og forsinkelser, slik at det naturlig oppstår noe overlapp mellom de ulike KPI-parametrene. Forsinkelser kan for eksempel oppstå på grunn av kø, som igjen skyldes lav hastighet. For å skille mellom de ulike faktorene som kan fanges opp i reisetiden, defineres reisetiden her som tiden man kjører i trase. Det vil si, tiden fra man forlater holdeplassen, til man ankommer neste. Dermed vil ikke tid på holdeplass telles med.

Reisetid er også brukt i litteraturen, men som et mål på driftsmessig ytelse i systemet (Trépanier, 2009). Siden effekten av hastighet for brukerne i stor grad er fanget opp gjennom forsinkelse og ventetid, vil ikke parameteren bidra vesentlig mer til å beskrive brukernes opplevelse. Men hastighet muligens benyttes som et KPI-parameter på driftsmessig ytelse. Samtidig er det slik at forsinkelse og ventetid er knyttet til en spesifikk holdeplass, mens redusert hastighet kan oppstå mellom holdeplassene. Dersom man har tilgjengelig data, kan reisetid eller hastighet langs ulike punkter i traséen bidra til å identifisere områder som skaper problemer med forsinkelser. Dette kan være nyttig dersom man vil iverksette avbøtende tiltak.

Et eksempel på en mulig oppsummerende KPI-parameter er å se på gjennomsnittshastighet på ulike segmenter. I figuren under er det gjort en simulering av ulike kjøretider langs en tenkt strekning.

Her er det lagt inn en betydelig forsinkelse langs segment nr. 10. Hver går eller svarte strek representerer en simulert kjøretid, mens den grønne stiplede linjen representerer gjennomsnittet. Den økte forsinkelsen kommer tydelig frem som et hopp i gjennomsnittsverdien. En slik tilnærming kan benyttes for å identifisere flaskehals i traseene. Reisetid kan dermed være en viktig driftsmessig KPI-parameter.



Figur 3.10. Simulerte reisetider på en strekning med forsinkelse på segment 10 og gjennomsnitt inntegnet ved grønn, stiplet linje.

Trengsel og kjøretøykapasitet

Akkurat som en heis bare har fysisk plass til et gitt antall mennesker, er det bare mulig for en viss mengde kjøretøy (og mennesker) å passere på en veg/banestrekning i et gitt tidsrom. Personkapasiteten til et kollektivnett sier derfor noe om hvor mange personer som kan passere på en strekning innenfor en gitt tid (Statens vegvesen 2014b). Kapasiteten til et kollektivsystem kan oppgis for det enkelte kjøretøy (kjøretøykapasitet), for enkeltruter⁷ eller for systemet som helhet (totalkapasitet⁸). Man kan si at kapasiteten sier noe om hvor mange passasjerer det er *mulig* å frakte dvs. hvilket fraktpotensiale løsningen har.

Kjøretøyskapasiteten avhenger av kjøretøyets størrelse, og kapasitetsteori omtaler gjerne både den teoretiske og den praktiske kapasiteten til et kjøretøy. Teoretisk kapasitet eller utgangskapasitet sier noe om hvor mange mennesker det maksimalt er fysisk mulig å fylle en buss med (antall mulige passasjerer). Den teoretiske kapasiteten (antall plasser om bord) er dermed summen av antall sitte- og ståplasser.

$$Kjøretøykapasitet_{teoretisk} = \text{antall sitteplasser} + \text{antall ståplasser}$$

Hvor tettpakket folk kan stå før det oppleves som ubehagelig, varierer noe. I henhold til EU-standard for ståplasser i buss beregnes det 8 personer per kvadratmeter. Det gir en høy fyllingsgrad av kjøretøyene, og medfører gjerne økt tid på holdeplass og redusert reiseopplevelse for passasjerene. Erfaringer fra Trondheim tilsier derimot at frakjøring⁹ oppstår lenge før man når denne kapasitetsbegrensningen, og at 4 personer per kvadratmeter således er et mer realistisk tall for å ivareta god komfort for stående passasjerer (AtB, 2016). «BRT Standard» opererer med noe tilsvarende tall. Der står det at dersom BRT-løsningen har mer enn 5 passasjerer per kvadratmeter på mer enn 25 % av bussene i rushretning i rush, så gis løsningen fem minuspoeng fordi det ikke er et tilfredsstillende tilbud. Bruken av de ulike «trengselsmålene» illustrerer også hvorfor ulike leverandører kan oppgi ulikt antall ståplasser for det samme gulvarealet. I realiteten er dermed:

$$\text{Antall ståplasser} = \text{kvadratmeter ståareal} \cdot 4 \text{ pers/kvm}$$

Slik at:

$$Kjøretøykapasitet_{teoretisk} = \text{Sitteplasser} + (\text{kvm. ståareal} \cdot 4)$$

Hva som er fysisk mulig er ikke nødvendigvis forenelig med praksis. I virkeligheten vil bussene oppleves som fulle før man har nådd teoretisk kapasitet, da den teoretiske kapasiteten gjerne

⁷ Den teoretiske kapasiteten til en gitt rute (enkeltrute) er kjøretøykapasitet multiplisert med antall kjøretøy som frekventerer ruta i det gitte tidsrommet. Antall kjøretøy for én time, finner man ved å dividere 60 på frekvensen (hvis det går en buss hvert 30. minutt, går det to busser på strekningen, mens det går 12 busser der dersom frekvensen økes til hvert 5. minutt).

$$\text{Timevis rutekapasitet}_{teoretisk} = \text{Kjøretøykapasitet}_{teoretisk} \cdot \text{antall busser per time}$$

⁸ Den totale kapasiteten avhenger i hovedsak av kjøretøyet (kjøretøykapasitet) og infrastrukturen kjøretøyet benytter (veg-, holdeplass- og banekapasitet), der kjøretøystørrelse, kjøretøybeholdning og frekvens er viktige stikkord.

⁹ Frakjøring: Passasjerer få ikke være med bussen fordi den er så full at det ikke er mulig å plukke opp ytterligere passasjerer.

gjør at menneskene om bord vil måtte stå langt tettere enn hva de er villig til å gjøre i virkeligheten. En benytter derfor praktisk kapasitet som sier noe om hvor full bussen kan være uten at det føles ubehagelig for passasjerene, og samtidig at det er mulig å komme seg av og på bussen uten store problemer. Ifølge Transit Capacity and Quality of Service Manual (2013) er praktisk kapasitet omtrent 75-80 prosent av den teoretiske kapasiteten (TCQSM, 2013).

$$Kj\ddot{o}ret\ddot{o}ykapasitet_{praktisk} = Kapasitet_{teoretisk} \cdot 0,75$$

Den praktiske kapasiteten tar dermed hensyn til at transporten må skje med en viss kvalitet ettersom passasjerene opplever forskjellige servicenivå avhengig av hvor full bussen er dvs. fyllingsgrad («occupancy rate»). Figur 3.11 illustrerer hvordan brukertilfredsheten ved tilbudet varierer med ulik fyllingsgrad eller trengsel om bord. Fyllingsgrad eller trengsel kan defineres som antall passasjerer på bussen til enhver tid i forhold til bussens kapasitet:

$$Fyllingsgrad = Faktisk\ antall\ passasjerer\ ombord / Kj\ddot{o}ret\ddot{o}ykapasitet$$

Urbanet Analyse har i flere prosjekter analysert hvordan trafikantene opplever ulik fyllingsgrad, men da under det mer folkelige begrepet «trengsel». Prosjektene har avdekket at trafikantene opplever trengsel som en ekstra belastning ved kollektivreisen og klar ulempe. Fyllingsgraden eller trengsel sier dermed noe om hvor godt og attraktivt tilbudet oppleves, og om kapasiteten som tilbys er tilstrekkelig for å gi en behagelig reiseopplevelse for de som faktisk bruker det (passasjertellinger). Trengsel er dermed en god KPI-parameter fordi det tar hensyn til at transporten må skje med en viss kvalitet eller servicenivå ut ifra et markedsmessig perspektiv. Samtidig illustrerer det også hvor mye ledig plass man har til potensielle eller mulige passasjerer¹⁰ (teoretisk kapasitet).

$$Trengsel = Antall\ passasjerer / (Sitteplasser + (kvm.\ st\ddot{a}areal \cdot 4)) \cdot 0,75$$

Dersom formelen skal benyttes til å måle den opplevde trengselen fra trafikantene, må man anta at trengselskostnadene er proporsjonale med den tekniske kapasitetsutnyttelsen. Dette betyr at trengselen øker lineært med kapasitetsutnyttelsen.

Ettersom graden av trengsel vil avhenge av antall passasjerer som går på og av en gitt holdeplass, vil man få ulike (praktisk) kapasitetsutnyttelse over linja. Dette er illustrert på figur 3.12 (antas at det er passasjerer om bord på bussen før den ankommer første holdeplass). Dersom man skal gi bussen kommandoer via en automatisk trafikkleder basert på kapasitetsutnyttelsen, er man avhengig av at trengsel måles på dette detaljeringsnivået fremfor for eksempel det mer overordnede passasjerer-km per rute-km. Dersom formelen skal benyttes til å måle den opplevde trengselen fra trafikantene, må man anta at trengselskostnadene er proporsjonale med den tekniske kapasitetsutnyttelsen. Dette betyr at trengselen øker lineært med kapasitetsutnyttelsen.

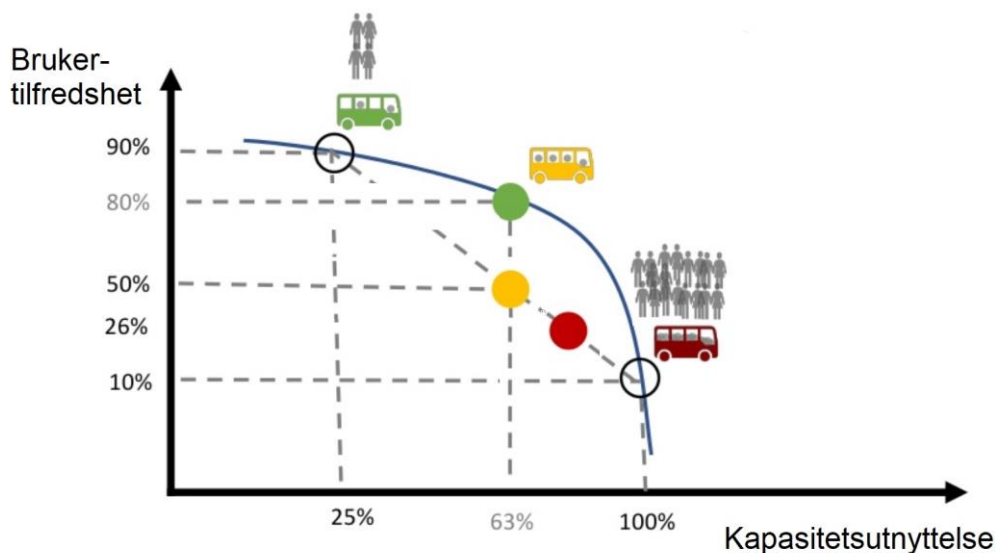
¹⁰ «Mulige antall passasjerer per time» ble presentert som en mulig KPI-parameter i oppdragsutlysningen.

Planlagt brukertilfredshet på 85 % (grønt punkt)

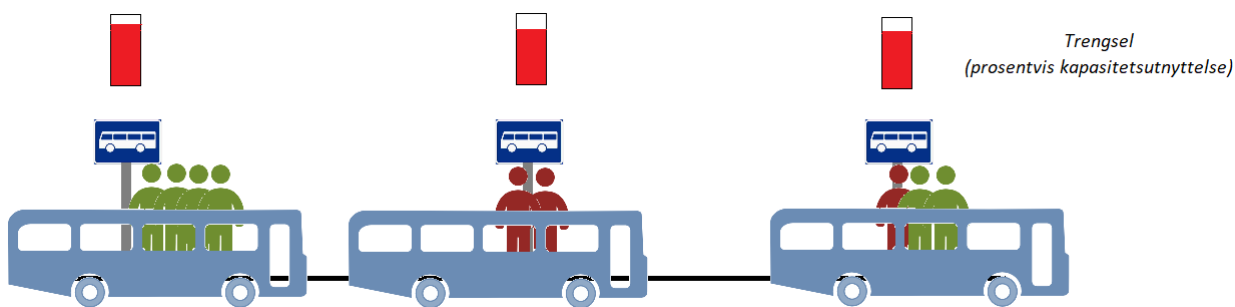
Brukertilfredsheten ved et busstilbud reduseres etter hvert som trengselen (kapasitetsutnyttelsen) om bord øker (illustrert ved den blå kurven under). Det ankommer 10 passasjerer per minutt ved en gitt holdeplass der det stopper en buss hvert 5. minutt. Bussene ankommer holdeplassen tom, og hver buss vil dermed forlate holdeplassen med 50 passasjerer. Hvis man antar at bussene har en kapasitet på 80 passasjerer, gir det en kapasitetsutnyttelse på 63 % (grønt punkt ved gul buss).

Faktisk brukertilfredshet på 26 % (rødt punkt)

Det viser seg derimot at bussene ikke ankommer holdeplassen med like stort intervall, men at den ankommer holdeplassen med først 2 og så 8 minutters intervaller. Det gir en kapasitetsutnyttelse på henholdsvis 25 % (grønn buss) og 100 % (rød buss). Den gjennomsnittlige kapasitetsutnyttelsen vil fremdeles være 63 %, men brukertilfredsheten for bussene vil reduseres til 50 % (gult punkt). Det er likevel ikke den gjennomsnittlige brukertilfredsheten mellom bussene som har betydning, men den gjennomsnittlige tilfredsheten blant passasjerene. Den gjennomsnittlige kapasitetsutnyttelsen blant passasjerene vil være 85 % med en brukertilfredshet på bare 26 % (rødt punkt).



Figur 3.11. Illustrasjon av klumping påvirkning på kapasitetsutnyttelsen, trengsel og brukertilfredshet



Figur 3.12 Illustrasjon av hvordan kapasitetsutnyttelsen varierer med antall på- og avstigende ved hver holdeplass (antas at det sitter passasjerer på før bussen ankommer første holdeplass)

Vekting av faktorer

Hvis man skal utvikle et markedsorientert tilbud er det viktig at man styrer utviklingen i den retningen trafikantene ønsker. Målet bør være å redusere den totale reisebelastningen for alle trafikantene. Reisebelastningen består av to faktorer:

1. Hvor mye hver enkelt faktor tynger
2. Hvor mange som påvirkes

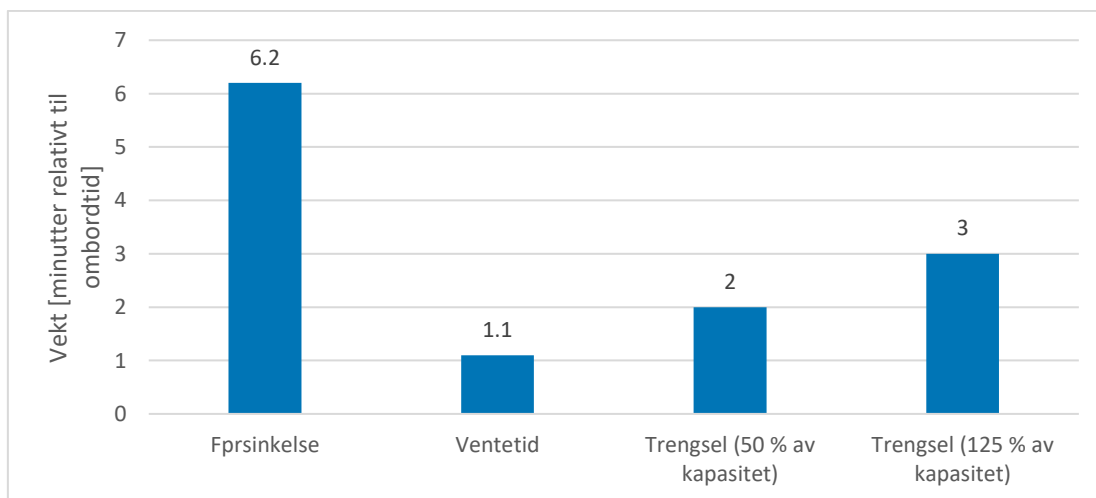
Samtidig som man utvikler faktorer som i større grad speiler markedet, kan dette redusere noe av treffsikkerheten med tanke på driftsøkonomi, som vil drøftes under.

Hvor belastende er hver faktor i seg selv: Vekting etter tidsulempe

Det første spørsmålet kan besvares ved å si noe om hvor viktig de ulike KPI-parameterne er i forhold til hverandre. Dette kan ta utgangspunkt i hvor belastende trafikantene opplever de ulike elementene. Urbanet analyse har gjennomført en rekke tidsverdsettingsstudier som undersøker hvordan trafikantene «vekter» de ulike delene av en reise. Det er vanlig å måle tiden relativt til ombordtid.

Undersøkelser har vist at trafikantene opplever 1 minutt forsinkelse like belastende som 6.2 minutter ombordtid og ventetid som 1.1 minutt ombordtid i Stavanger (Ellis & Øvrum, 2014). Her er et viktig spørsmål hva som er ventetid og hva som er forsinkelser, og om disse er ulike.

I utgangspunktet er ventetidsvekten gjeldende for en passasjerer som ankommer en holdeplass med faste intervaller mellom avgangene. Det vil si at ekstratiden som oppstår ved ujevne avganger, egentlig ikke gjelder for ventetidsvekten på 1.1 vist i figuren under. Et viktig spørsmål er dermed om trafikantene oppfatter slik ekstra ventetid som forsinkelser, eller en litt mer belastende ventetid. Det finnes dessverre lite empiri på dette området, men det virker trolig at når avgangene blir temmelig ujevne, vil dette oppfattes som en klar ulempe. Effekten på ventetid av ujevne avganger vil trolig ikke være en del av planlagt ventetid, slik at det blir mest korrekt å benytte samme vekt som forsinkelses på denne faktoren.



Figur 3.12. Vekting av ulike reisetidsfaktorer i målt som antall minutter ombordtid. Kilde: Ellis & Øvrum (2014) og Hensher et. al. (2013).

Ifølge Hensher et. al. (2013), varierer belastningen med trengsel etter kapasitetsutnyttelsen. Ifølge den studien, opplever man trengsel ved omkring $\frac{1}{4}$ av kapasitetsutnyttelsen. Ved 50 % flere passasjerer enn kapasiteten, opplever man 1 minutt om bord som 2 minutters reisetid. Dette går mot 3 minutter ved en 125 % flere passasjerer enn kapasiteten tilsier.

Hvor mange påvirkes: Vekting etter antall passasjerer

Vekting av faktorene kan være et viktig bidrag til å øke kvaliteten på KPI-parameterne. Samtidig må man sikre at man går etter de faktorene som i sum har størst påvirkningskraft på trafikantene. Dette er som nevnt sammensatt av hvor tyngende hver enkelt faktor er, og hvor mange som påvirkes av den.

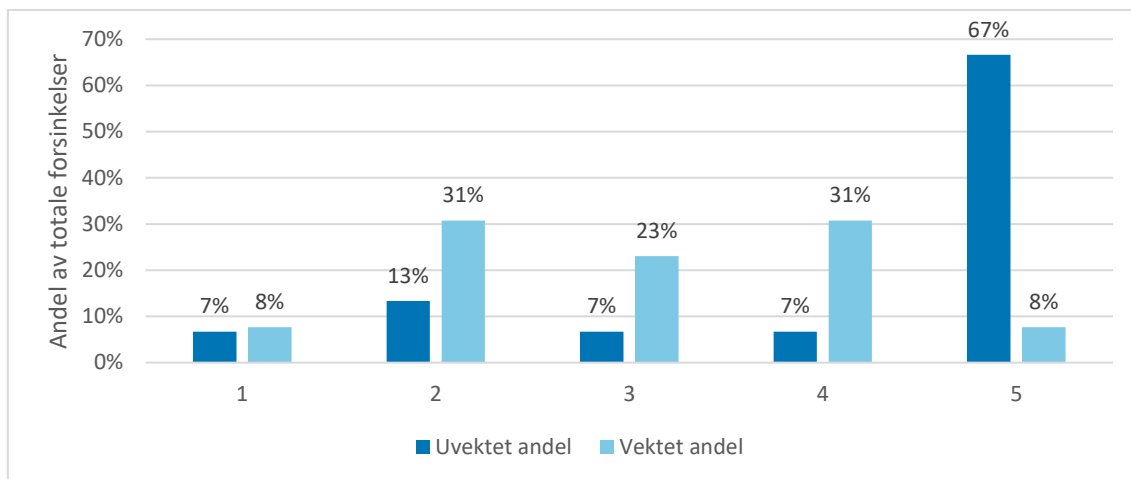
Forsinkelse

Under vises en tabell med en tenkt avgang for en buss, som stopper på fem holdeplasser med ulikt antall passasjerer og forsinkelse. Det fleste holdeplassene har relativt lav forsinkelse, men den siste skiller seg markant ut.

Tabell 3.3. Eksempel på forsinkelse og passasjerer ved en bussavgang etter holdeplass.

Holdeplass	Forsinkelse [min]	Passasjerer
1	1	10
2	2	20
3	1	30
4	1	40
5	10	1

Dersom en beregner hvor stor andel av forsinkelsene som oppstår på den enkelte holdeplass kun etter antall minutter, vil den siste holdeplassen være klart «hardest rammet». Dersom man istedenfor vektet etter antall passasjerer, får man illustrert effekten av at kun en passasjer går på ved holdeplass 5. Det er dermed langt viktigere å redusere forsinkelsene ved holdeplass 2, 3 og 4.



Figur 3.13. Andel av forsinkelse vektet og uvektet mot antall passasjerer.

Samtidig som vektning etter passasjertall gir et bilde som er tettere opp mot markedet, vil vektning etter ren tid gi et bedre inntrykk av hvor kostnadene for operatørene oppstår. Dette skyldes operatøren betaler lønn til én bussjåfør, uavhengig av hvor mange passasjerer som går på. Kostnadene for operatøren blir dermed helt proporsjonale med tiden.

Oppsummert vil:

- Forsinkelse vektet mot antall passasjerer gi et godt bilde av hvordan markedet påvirkes.
- Forsinkelse vektet mot ren tid vil gi et godt bilde av hvor operatørens kostnader oppstår.

Begge mål har derfor god informasjonsverdi for driften av et kollektivsystemet.

Ventetid

Vekting av ventetid mot antall passasjerer vil på samme måte som forsinkelser gi et mer korrekt bilde av hvor problemene er størst. Dette vil derfor bedre informasjonsverdien for KPI-parameteren. Det vil trolig ikke være noen direkte fordel å benytte uvektet ventetid til å si noe om driftskostnader på samme måte som forsinkelser. Trolig vil man i stor grad beskrive den samme bakenforliggende sammenhengen, slik at forsinkelse vel så godt kan brukes.

Trengsel

Trengsel vil naturlig vektet mot antall passasjerer, siden dette inngår i definisjonen.

3.4 Oppsummering

Vi har i dette kapitlet diskutert og etablert ulike ytelsesindikatorer for bussveien sett fra trafikantens perspektiv. Vi startet med å definere berørte grupper og hva en god

ytelsesindikator er. Deretter gjennomgikk vi hvilke deler av trafikantenes belastning som kan integreres som KPI-parameterne, på bakgrunn av litteraturen og egen drøfting.

Vi har definert en god KPI som:

- **Målbar:** KPI-parameteren må kunne benytte data som er tilgjengelig på det oppløsningsnivået trafikklederen krever
- **Relevans:** KPI-parameteren må kunne argumenteres for å ha en reell effekt på trafikantenes reiseopplevelse.
- **Påvirkning:** KPI-parameteren må kunne påvirkes av de styringsverktøyene som er tilgjengelig i den automatiske trafikklederen.

På bakgrunn av diskusjonen i kapitlet har vi kommet frem til følgende fire variabler som vi mener kan benyttes som KPI-parametere:

- Forsinkelse
- Ekstra ventetid i forhold til tidtabell
- Reisetid
- Trengsel

Disse fire faktorene mener vi oppfyller de tre kriteriene for et godt KPI, og dekker de viktigste delene av trafikantens reisebelastning som trafikklederen kan påvirke. Vi mener derfor at det i første omgang er tilstrekkelig å benytte disse kriteriene for å måle ytelsen på bussveien. Vi har også diskutert hvordan man bør vekte de ulike tidskomponentene. Her anbefaler vi at forsinkelse og ekstra ventetid vektet likt.

Videre har vi operasjonalisert de ulike kriteriene med konkrete formler. I denne delen har vi kommet frem til noen viktige konklusjoner:

- Selv om forsinkelse og ekstra ventetid kan tilsynelatende fremstå som like, er det viktig å måle dem separat, siden de kan være delvis motvirkende.
- Måling av forsinkelse bør gjøres ut fra ulike terskelverdier for hva en forsinkelse er
- Vekting mot passasjertall vil bedre kunne reflektere markedets påvirkning av ulike ytelsesindikatorer, mens uvektede måltall representerer bedre den driftsmessige påvirkningen.

Første steg i analysen har vært å måle trafikantenes belastning, og vi går nå videre med å diskutere hvilke verktøy vi kan benytte for å redusere belastningen i tilfeller der avvik oppstår.

4 Strategisk trafikkregulering

Forrige kapittel tok for seg hvordan vi kan måle trafikantenes opplevelse av reiser på bussveien. I dette kapitlet går vi ett skritt lenger og spør hvordan vi kan forbedre opplevelsen. Herunder er hovedspørsmålet hvilke verktøy vi har tilgjengelig, fordeler og ulemper ved dem, og hvordan de påvirker KPI-parameterne.

Strategisk trafikkregulering omfatter alle de strategiene man kan styre trafikkavviklingen etter for at kollektivsystemet skal operere på best mulig måte. De ulike strategiene innebærer gjerne fordeler og ulemper, og dette kapitlet diskuterer disse med utgangspunkt i KPI-parameterne dvs. ventetid/frekvens/punktlighet, reisetid/hastighet, forsinkelse og trengsel (kapasitet). På bakgrunn av dette gis det en anbefaling på hva som vil være mest hensiktsmessig strategi for Stavanger.

Vi starter med å definere hovedproblemet trafikkreguleringen er ment å motvirke, nemlig sammenklumping og forsinkelser av busser før vi kommer inn på løsningene. Deretter diskuterer vi ulike grupper av strategier i litteraturen, før vi går inn på noen konkrete strategier vi har valgt å fokusere på. Til sist gjør vi enkle beregninger for å vise fordeler og ulemper med strategiene.

4.1 «Klumping» («bus bunching»)

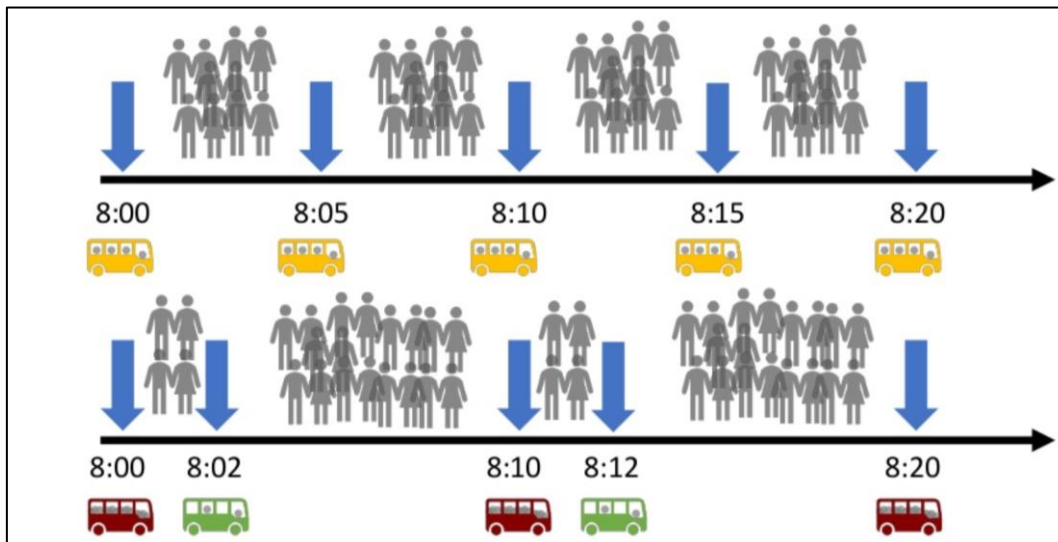
Prinsippet bak kollektivtransport er enkelt: Et kjøretøy skal følge en forhåndsdefinert rute, ankomme de ulike holdeplassene til en gitt tid og ta med seg påstigende passasjerer som har bestemmelsesstedet sitt et sted langs ruta. Etter et gitt intervall, følger neste kjøretøy samme mønster. Denne rutestrategien der bussen kjører med gitte, statiske intervaller seg imellom, kalles («dispatch strategy»).

Klumping («bus bunching»)

Denne strategien innebærer en utfordring ved at trafikkbildet er et dynamisk system der det stadig vekk inntreffer hendelser som potensielt kan forsinke bussene (for eksempel ordinære ting som mange røde trafikklys eller mer ekstraordinære ting som en trafikkulykke). Det å kjøre busser i et kollektivsystem med like stor avstand eller intervall mellom bussene, kan ansees som en ustabil likevekt. Enhver forstyrrelse i systemet gjør at likevekten går tapt, og bussene fungerer som magneter på hverandre og klumper seg sammen. Dette kalles «bus bunching» eller «klumping». Dette er illustrert på Figur .

Årsaken til at bussene ikke klarer opprettholde rutestrategien med gitte intervaller seg imellom, er at de har ulik reisetid. Variasjoner i reisetiden skyldes flere forhold: i) De holder ulike hastighet f.eks. på grunn av kø og ulik ventetid knyttet til trafikklys, og bussjåførene har heller ikke helt lik kjørestil. ii) De bruker ulik tid ved holdeplass («dwell time»). Det skyldes den

underforståtte forutsetningen som ligger i strategien om like intervaller mellom bussene om at det ankommer like mange personer til en gitt holdeplass hver gang. I realiteten går det derimot på et tilfeldig antall personer ved en gitt holdeplass over døgnet (stokastisk fordeling). Når bussene tar hverandre igjen, vil de også forsinke hverandre ytterligere da holdeplassene gjerne har begrenset kapasitet.



Figur 4.1. Illustrasjon av konsekvensene av klumping¹¹

Dette gjør at noen passasjerer får lengre ventetid mens andre får kortere på grunn av tidligere avganger for enkelte busser dvs. at tilbudet som helhet får redusert pålitelighet både for passasjerer og operatører. For passasjerene innebærer det en mer belastende ventetid for de som får økt ventetid ettersom 1 minutt ventetid på holdeplass tilsvarer 2-3 minutter ombordtid. Gjennomsnittlig trengsel vil også øke ettersom økt ventetid korrelerer med høy kapasitetsutnyttelse slik at flere passasjerer vil oppleve høy trengsel. Hvordan dette påvirker brukertilfredsheten med tilbudet, ble illustrert med et eksempel i kapittel **Feil! Fant ikke referanseilden.** under «Trengsel» i **Feil! Fant ikke referanseilden.**. Det er også en tendens at passasjerene husker den verste kollektivtransportopplevelsen. For operatørene innebærer redusert hastighet at kapasiteten til systemet reduseres. I tillegg påvirkes tiden bussen bruker fra rutas startpunkt til endepunktet og så tilbake til utgangspunktet («cycle time»). Variasjonene i denne tiden gjør at operatørene må sette inn ekstra busser/sjåførere.

Uten regulerende tiltak vil bussene ofte «klumpe» seg sammen, som representerer en kostnad, i det den faktiske ventetiden går opp på «neste» holdeplass. Benytter man regulerende tiltak vil dette samtidig øke reisetiden for reisende på regulerende holdeplass. Klumping kan løses ved hjelp av dedikert infrastruktur, signalprioritet for buss og sanntidsstyring av starttidspunktet for bussene og gjennom ruta («holding»). Det er verdt å

¹¹ Juan Carlos Muñoz (2017). «Connected and automated buses. An opportunity to bring reliability to bus service». Tilgjengelig fra: <https://www.slideshare.net/BRTCoE/juan-carlos-muoz-connected-and-automated-buses-an-opportunity-to-bring-reliability-to-bus-service>

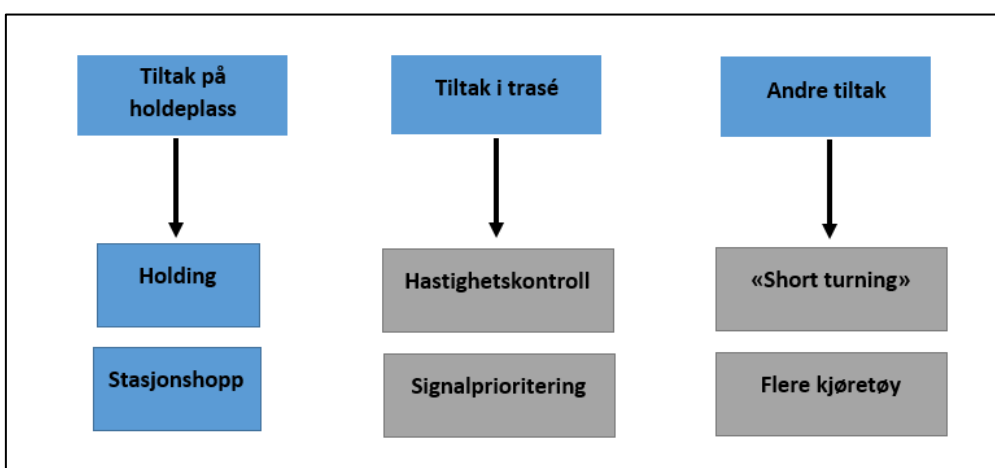
merke seg at dersom bare et fåtall bussjåfører systematisk ikke overholder instruksene fra trafikklederen, vil fordelene ved koordinert kontroll i stor grad ødelegges.

4.2 Hovedkategorier av kontrollstrategier

Det er en rekke strategier man kan styre trafikkavviklingen etter for at et kollektivsystem skal operere på best mulig måte. Dette handler i stor grad om hvordan det er mest hensiktsmessig å styre bussene for at de skal opprettholde en mest mulig regelmessig frekvens, enten gjennom for eksempel faste rutetider eller jevnt innbyrdes intervaller. Den internasjonale forskningslitteraturen på kontrollstrategier ved avvikling av et busstilbud inneholder tre hovedkategorier av tiltak (Eberlein et. al., 1999). De tre hovedkategoriene er:

- **Tiltak på holdeplass**
Denne kategoriene inkluderer blant annet «holding» (det at man holder igjen busser på holdeplasser), og forbikjøring/stasjonshopping (det at man kjører forbi en gitt holdeplass).
- **Tiltak i trasé**
Eksempler på slike tiltak er blant annet hastighetskontroll og signalprioritering.
- **Andre tiltak**
Eksempler på slike tiltak er «short turning» (som innebærer at en buss avslutter ruten tidligere hvis en bak nærmer seg) og innsetting av flere kjøretøy.

Av disse hovedkategoriene er det tiltak på holdeplass som er de klart mest beskrevne og undersøkte kontrollstrategiene i litteraturen, noe som blant annet støttes av Eberlein et. al. (1999). Det er derfor tatt utgangspunkt i denne type strategier, i tillegg til at de øvrige strategiene foreslått av Kolumbus' trekkes inn der det er relevant. Vurderingen fokuserer spesielt på effekten strategiene har på KPI-parameterne dvs. ventetid/frekvens/punktlighet, reisetid/hastighet, forsinkelse og trengsel.



Figur 4.2. Kontrollstrategier i den internasjonale forskningslitteraturen.

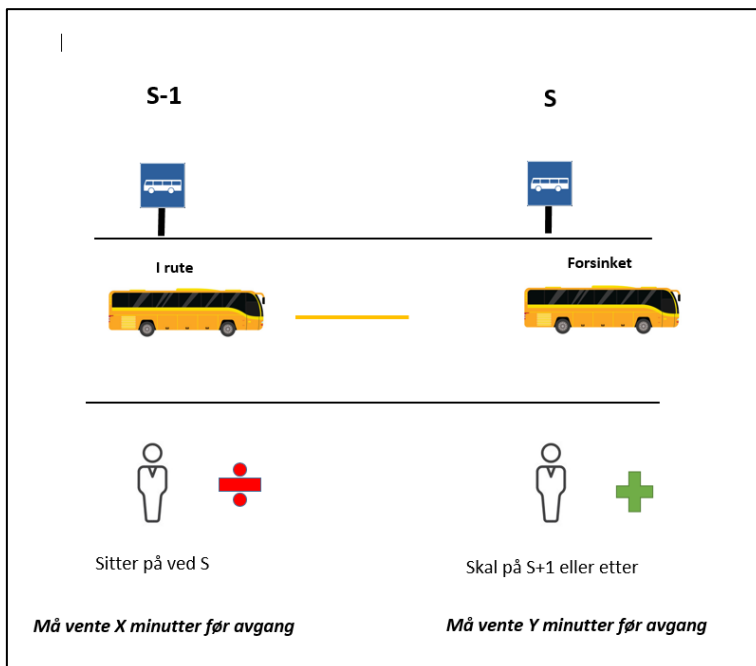
4.3 Strategigruppe 1: Tiltak på holdeplass

Strategi 1: Intervallreguleringstid («vehicle holding strategy»)

En av strategiene en kan benytte for å unngå klumping er intervallreguleringstid («holding»), og den kan gjennomføres på to ulike måter: Enten ved å holde igjen busser ved busstoppene, eller regulere hastigheten i traséen. Den første implementasjonen er den klart mest beskrevne og undersøkte, og det legges derfor størst vekt på denne. Teksten baserer seg i stor grad på Barnett (1974) som er en mye sitert artikkel på feltet.

Intervallregulering på holdeplass

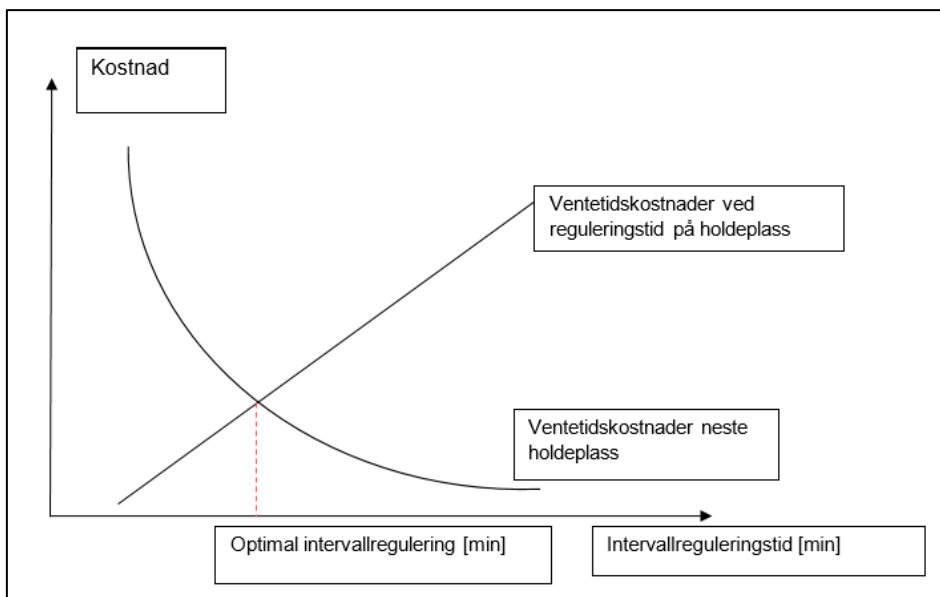
Figuren under viser prinsippet bak intervallregulering på holdeplass. Bussen på holdeplass S er forsinket, mens bussen klar til å forlate holdeplass S-1 er i rute. Dersom bussen ved S-1 kjører med én gang, vil den nærme seg buss S mer enn planlagt, som øker ventetidskostnadene for de som går på fra S og utover. Hvis man derimot utsetter avgangen fra S-1, vil man redusere «klumpingen», som forminsker ventetiden på de neste holdeplassene. Men samtidig vil dette være en belastning for passasjerene som allerede befinner seg på bussen ved S-1. Holding påvirker altså trafikantene ulikt etter hvilken gruppe de tilhører.



Figur 4.3. Illustrasjon av effektene ved intervallregulering. De som sitter på ved S-1 får økt forsinkelse, mens de som går på og etter S får redusert ventetid.

En optimal intervallreguleringstid vekter sammen kostnadene til trafikantene på regulerende og påfølgende holdeplass til et minimum, se figur under. Totalkostnaden for alle passasjerer måles her på y-aksen og intervallreguleringstiden på x-aksen. En høyere intervallreguleringstid vil redusere ventetidskostnadene mens det vil øke ventetidskostnader / forsinkelse på holdeplassen reguleringen foretas.

Videre er det slik at reduksjonen i ventetid normalt er størst ved små endringer i intervallreguleringstiden, mens kostnadene for de som sitter på bussen øker lineært. Dette skyldes at den ekstra ventetiden som oppstår ved ujevne intervaller er tiltagende etter som ujevnheten øker. Konsekvensen er at gevinsten av tilbakeholding på holdeplass er avtagende mens kostnaden er konstant. Dette innebærer at nytten av å utsette avganger for å opprettholde konstante intervaller trolig avtar raskere enn kostnadene ved økt forsinkelse for bussene bak. En optimal intervallreguleringstid vil trolig avta for hver buss som utsettes, slik at man kun behøver å forsinke et par busser for å redusere ventetiden mellom avgangene.



Figur 4.4. Illustrasjon optimal holding/intervallreguleringstid. Kostnader vist på y-aksen og intervallreguleringstid på x-aksen.

I hvilken grad man skal benytte intervallregulering og eventuelt hvor mye, avhenger også av forholdet mellom dem som påvirkes negativt og positivt. En optimal intervallreguleringstid bør helst ta innover seg hvor mange som blir påvirket negativt eller positivt. Noen generelle trekk ved dette er at:

- Jo flere som sitter på bussene som blir forsinket, jo kortere intervallreguleringstid
- Jo flere som går på etter intervallreguleringen, jo lengre intervallreguleringstid.

Det er viktig å ta hensyn til disse effektene. Årsaken er at man i utgangspunktet ikke er interessert i ventetid eller forsinkelse per buss eller holdeplass, men total ventetid og forsinkelsestid for alle passasjerer. Reguleringen bør altså forsøke å fange opp markedet, og hva trafikantene totalt sett opplever som mest belastende. Dersom man forsinke en buss for å jevne ut en ventetid som ingen får glede av, er det en mindre gunstig strategi.

For å kunne si noe mer om hvordan effektene fordeler seg, er det viktig å kjenne til hvordan kostnadene og gevinstene påvirker de ulike gruppene av trafikantene i busslinjen. Generelt sett kan man si at:

- Uten tiltak vil effekten av det ujevne avgangsintervallet **forplante seg fremover**.
- Med tiltak vil effekten av **forsinkelser forplante seg bakover**.

Figur 4.4 som illustrerer utfordringer med intervallregulerende tiltak viser dette med to stopp og to busser. I virkeligheten, vil det trolig være busser både foran og bak de to første som påvirkes. Passasjerer som går på ved holdeplasser etter S, vil også få en positivt effekt av mer jevne avgangsintervall siden **forsinkelsene forplanter seg fremover** dersom man ikke gjør tiltak. Disse bør derfor telles med når man fastsetter en optimal intervallreguleringstid.

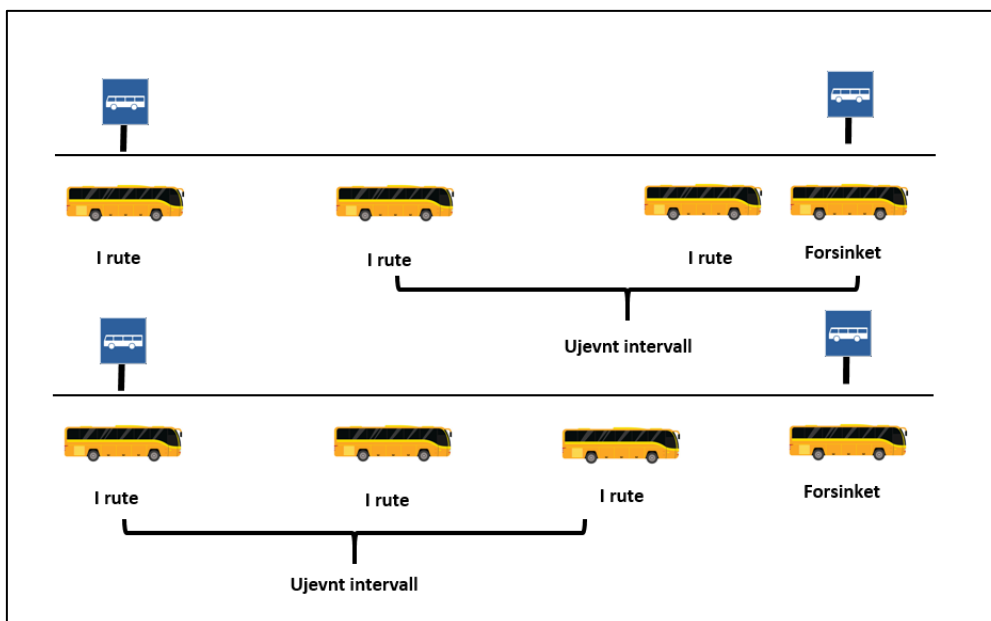
Samtidig, dersom man velger å forsinke en buss for å redusere ujevnheten i avgangsintervallene, vil dette **forplante seg bakover**. Figuren under illustrere utfordringen. Her en buss forsinket, mens de andre er i rute. Intervallene blir ujevne fordi bussen bak den forsinkede nærmer seg denne. Man kan da velge å forsinke (holde igjen) bussen rett bak den forsinkende for å jevne ut intervallene. Men bussen som nå forsinket med vilje i utgangspunktet var i rute, må det bety at avstanden til bussen bak minsker, og man får et mer jevnt intervall som igjen øker ventetiden.

Ved å forsinke en buss for å jevne ut intervallene, har man derfor flyttet problemet ett steg bak, og må nå løse det på nytt. For å kunne foreta en optimal regulering, er det avgjørende å kjenne til hvor mange passasjerer som sitter på de ulike bussene bakover, altså de som blir berørt av reguleringen i negativ forstand, for deretter å beregne optimal intervallregulering bakover (Barnett, 1974).

Det er imidlertid trolig at man ganske raskt når et punkt hvor det ikke er optimalt å forsinke ytterligere busser. Dette skyldes at:

- Gevinsten av jevnere intervaller er avtagende
- Kostnaden ved forsinkede busser er konstant

Med avtagende gevinst og konstant kostnad vil man nå et punkt hvor det ikke lenger er gunstig å forsinke bussene. Dette indikerer at man ikke behøver å ta hensyn til effektene bakover i traseen veldig mange avganger.



Figur 4.5. Illustrasjon av hvordan forsinkelser og ventetidskostnader forplanter seg bakover ved bruk av intervallregulering.

Dersom den forsinkende bussen er først i ruten, vil det intervallregulering redusere kostnadene. Men dersom forsinkelsen oppstår for en buss midt i traseen, kan behovet for intervallregulering reduseres dersom den forsinkede bussen klarer å kjøre inn noe av forsinkelsen.

Strategi 2: Forbikjøring av holdeplass / stasjonshopping

Stasjonshopping innebærer at man velger å kjøre forbi en eller flere stasjoner for å opprettholde avstanden mellom de ulike bussene. Dette kan være et aktuelt virkemiddel i tilfeller der en buss blir forsinket slik at bussene bak nærmer seg den.

Strategien er illustrert i figuren under. Bussen ved stopp S-1 er forsinket, og bussene bak (som ikke synes) nærmer seg denne bakfra, slik at avgangintervallene blir ujevne. Bussen kan dermed velge å kjøre forbi stopp S (i praksis kan dette være flere stopp, men i dette tilfellet benyttes det ett). Dette vil potensielt utjevne avgangintervallene for bussene bak. Tiltaket påvirker trafikantene på følgende måte:

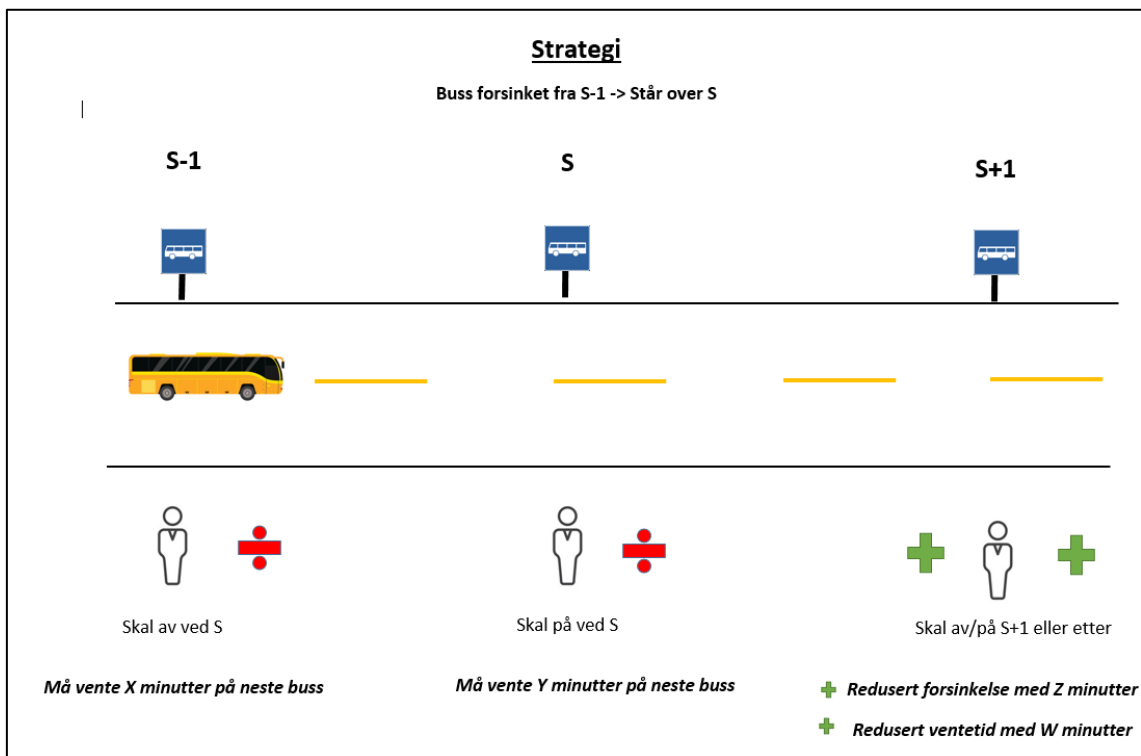
- De som skal av ved S, blir nødt til å vente på S-1 til nest buss kommer, eller gå til S. Dette representerer en kostnad for dem.
- De som skal på ved S, må nå vente på neste buss, siden bussen ved S-1, kjører forbi S, uten å hente passasjerene som står der.
- De som skal på ved S+1 eller etter, får en gevinst siden ventetiden blir lavere i gjennomsnitt for gruppen. Dette skyldes at forbikjøringen bidrar til å opprettholde jevne intervaller som reduserer ventetiden.
- De som skal av ved S+1 eller etter får en gevinst siden reisetiden deres blir lavere (man kan kjøre inn deler av forsinkelsen).

En optimal forbikjøringsstrategi minimerer summen av kostnadene for de ulike gruppene.

I motsetning til intervallregulering, er forbikjøring en mindre smidig strategi. Man kan enten velge å kjøre forbi, eller ikke. Man kan imidlertid velge hvilken holdeplass man skal kjøre forbi på en måte som gir lavest belastning for trafikantene. Følgende momenter påvirker sannsynligheten for at forbikjøring er gunstig:

- Jo færre som går på ved holdeplassen som forbikjøres, jo mindre belastende oppleves forbikjøringen (de må vente på neste buss)
- Jo flere som skal av holdeplassen som kjøres forbi, jo mer belastende oppleves forbikjøringen (de må vente på neste buss)
- Jo større forsinkelsen er, jo mer bidrar forbikjøring til å redusere forsinkelsene
- Jo flere som får redusert ventetid (jo flere som går på etter holdeplassen som kjøres forbi), jo mer gunstig er forbikjøring

Hovedutfordringen med strategien er å avgjøre om det finnes en holdeplass hvor det er optimalt å foreta en regulering. I denne avveilingen må man avstemme kostnadene mot gevinster ved hver enkelt holdeplass som vurderes forbikjørt på en konsistent måte.

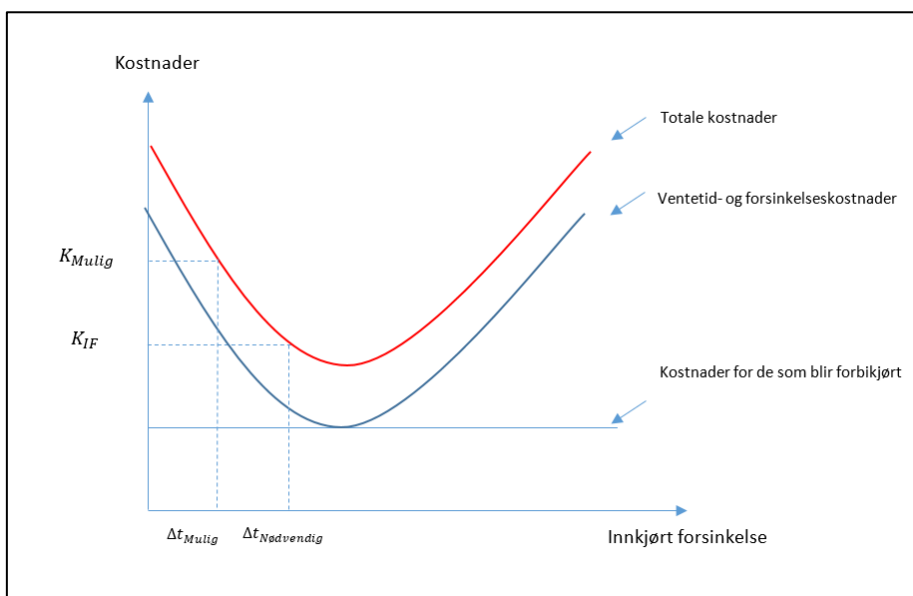


Figur 4.6. Illustrasjon av forbikjøring. Gruppen som skal av eller på S får økt forsinkelse, mens de som sitter på eller skal på fra S+1 får redusert forsinkelse/ventetid.

Et veldig viktig element i beregningen er **hvor mye forsinkelse man klarer å kjøre inn** ved å hoppe over en holdeplass. Denne størrelsen avgjør hvor store fordelene ved å kjøre forbi en holdeplass blir versus kostnadene. Det går nemlig ikke an å redusere forsinkelsene mer enn

det man klarer å «kjøre inn». Det finnes dermed en naturlig grense på hvor effektiv strategien vil være.

Vi har illustrert utfordringen i figuren under, som følger det samme mønsteret som figuren knyttet til intervallregulering¹². Her er innkjørt forsinkelse illustrert på x-aksen, og kostnader for de som blir forbi kjørt og ventet- og forsinkelseskostnader. K_{IF} er ventetidskostnadene når man ikke kjører forbi en holdeplass. For at det skal være gunstig å kjøre forbi en holdeplass, må det tilstrekkelig stor reduksjon i ventetidskostnader slik at summen av forsinkelse og ventetid blir lavere enn ventetidskostnadene når man ikke kjører forbi. Dette skjer dersom man klarer å kjøre inn mer enn $t_{Nødvendig}$. I figuren under kan man kun kjøre inn $t_{Mulig} < t_{Nødvendig}$, slik at forbi kjøring ikke er gunstig. Dersom man har mulighet til å regulere hastigheten slik at $t_{Mulig} \geq t_{Nødvendig}$, vil strategien bli gunstig.



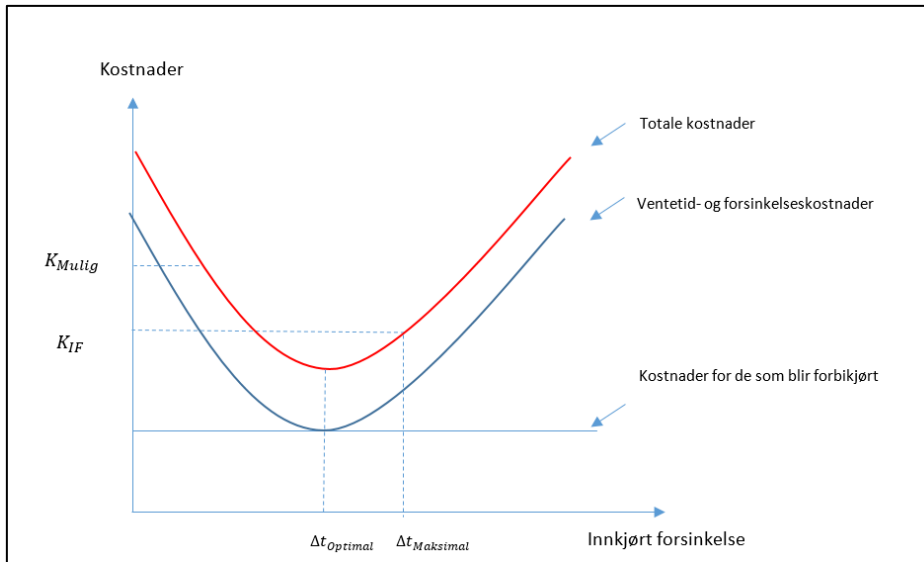
Figur 4.7. Illustrasjon av kostnader og tilpasning når det ikke er mulig å kjøre inn nok tid for at forbi kjøring er en gunstig strategi.

Det kan også eksistere tilfeller der man har mulighet til å kjøre inn mer enn nødvendig forsinkelse, som er forsøkt illustrert i figuren under. Uten en kombinasjon av andre virkemidler, som for eksempel hastighetsregulering eller gjenholding, vil strategien kunne gi en høyere kostnad enn nødvendig. Hvis man ikke regulerer hastigheten og $\Delta t_{Mulig} > \Delta t_{Optimal}$, betyr dette at man kjører inn en større andel av forsinkelsene enn det som er optimalt. Dermed oppstår en ekstrakostnad.

I figuren har vi tegnet inn ventetids- og forsinkelseskostnadene som økende etter en gitt innkjørt forsinkelse til i motsetning til figuren i intervallregulering. Dette skyldes at dersom

¹² I denne figuren har vi antatt at det finnes en reduksjon i forsinkelse og antall som blir forbi kjørt slik at forbi kjøring kan være gunstig for å gjøre den grafiske fremstillingen sammenlignbar med dynamisk holding. Det kan imidlertid ofte være tilfeller hvor det ikke finnes noen reduksjon i forsinkelse som reduserer totale kostnader.

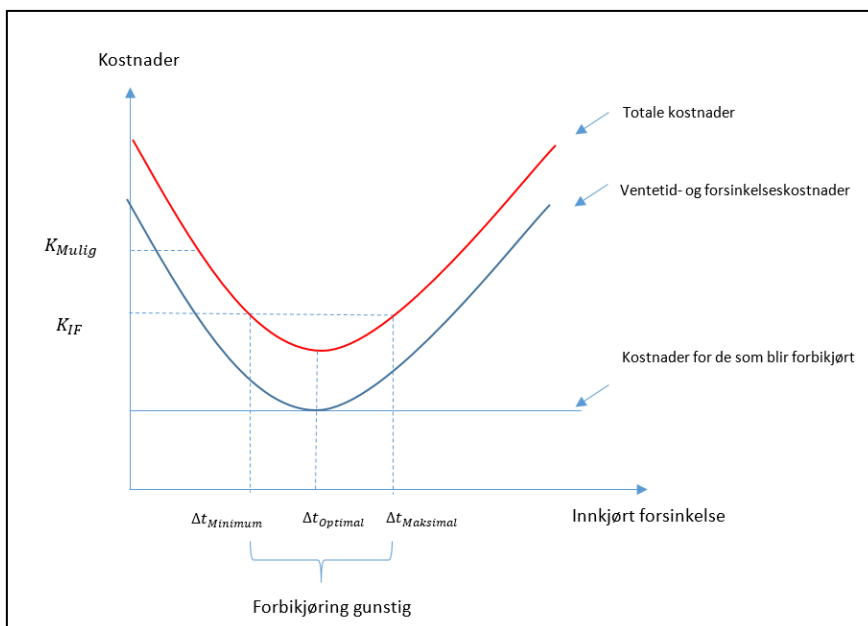
man nærmer seg bussen foran for mye, vil ventetiden øke siden intervallet mellom hver avgang blir mer ujevnt. Som nevnt er K_{IF} er ventetidskostnadene når man ikke kjører forbi en holdeplass. På samme måte som finnes en minste nødvendige innkjørt forsinkelse, eksisterer det også en maksimal innkjøring, $\Delta t_{Maksimal}$. Etter $\Delta t_{Optimal}$ stiger ventetidskostnadene igjen fordi man nå nærmer seg bussen foran mer enn det som er tilrådelig. Overstiger man $\Delta t_{Maksimal}$, vil ikke strategien bli fordelaktig, med mindre man regulerer hastigheten.



Figur 4.8. Illustrasjon av tilfelle av maksgrense for hvor mye man kan kjøre inn ved forbikjøring før kostnadene er høyere enn uten forbikjøring.

For at forbikjøringsstrategien skal gi lavere trafikantbelastning, **uten** at man også regulerer hastigheten, må den mulige innkjørte forsinkelsen ligge mellom minimal og maksimal reduksjon, som vist i figuren under. Havner man utenfor dette området, vil ikke strategien, uten ytterligere virkemidler, i seg selv gi redusert trafikantbelastning.

En klar ulempe med strategien er dermed at man forsøke å «treffe» innenfor et område uten med et fastsatt utfallsrom.



Figur 4.9. Illustrasjon av område der forbikjøring gir en forbedring mot ikke-forbikjøring.

Oppsummert viser diskusjonen ovenfor at forbikjøringsstrategien uten kombinasjon av andre strategier er et mindre treffsikkert virkemiddel for å minimere trafikantkostnadene. Dette skyldes at forbikjøring er en «enten-eller»-avgjørelse hvor effektiviteten i stor grad styres av hvor mye forsinkelse man kan kjøre inn. Man kan enten kjøre inn mer eller mindre, eller akkurat tilstrekkelig mye for at å minimere trafikantenes tidskostnader. Generelt sett er det slik at:

- Dersom man kan kjøre inn mindre enn optimalt ($\Delta t_{Mulig} < \Delta t_{Min}$) vil man ikke kunne realisere trafikantenes minimale kostnadsbelastning uten endringer i hastighetsprofil eller kjøremønster. Man må da kjøre raskere for at strategien skal bli mer effektiv.
- Dersom man kan kjøre inn mer enn optimalt ($\Delta t_{Mulig} > \Delta t_{Maks}$) vil man ikke kunne realisere trafikantenes minimale kostnadsbelastning uten endringer i hastighetsprofil eller kjøremønster. Man må da kjøre saktere for at strategien skal bli mer effektiv.

Diskusjonen viser at forbikjøring først blir effektiv i kombinasjon med andre strategier. Dette indikerer at forbikjøring blir en mer kompleks strategi før den kan gi fullt potensial. Man må i praksis først beregne en hva den optimal innkjørte forsinkelsen er, og deretter sjekke om denne er mulig å kjøre inn. Dette vil ikke være nødvendig ved intervallregulering, siden man her regulerer ankomsttidspunktet ved neste holdeplass fritt etter hvor lenge man venter på en gitt holdeplass.

I denne rapporten har vi ikke gått videre med en modifisert versjon av forbikjøringsstrategien. Vi mener intervallregulering i stor grad gir det samme mulighetsrommet for tilpasning til trafikantenes preferanser og samtidig enklere implementasjon.

I litteratursøket vi gjennomførte og som vi bygger vår regnemodell ut fra, søker man gjennom alle holdeplasser og undersøker om det er fordelaktig å kjøre forbi eller ikke (Eberlein et. al.,

1999; Sun & Hickman, 2005). Flere andre studier vurderer hvor mange holdeplasser man skal kjøre forbi. Vi har for å gjøre problemet enklere valgt å undersøke en og en holdeplass av gangen. Videre er det en distinksjon mellom metoder der man vurderer forbikjøring ut fra først holdeplass eller underveis på ruten. Vi har i dette prosjektet lagt til grunn det siste, altså at man vurderer forbikjøring underveis på ruten.

4.4 Test av strategier

Optimal intervallreguleringstid

En del av oppdraget er å vise hvordan ulike metoder kan avveies mot hverandre. I denne forbindelse har vi satt opp en forenklet regnemodell. Denne modellen har en optimaliseringsrute som er veldig enkel, og detaljene rundt implementeringen finnes i vedlegget.

Grunnlaget for modellen er at man minimerer totalt tidstap for trafikantene. Tidstapet gjelder for de som sitter på bussen (forsinkelse) og de som venter på holdeplasser etter den forsinkede bussen (ventetid). Forsinkelseskostnadene påløper alle trafikanter som sitter på busser som holdes igjen, mens ventetidstapet påløper alle dem som venter på bussen etter holdeplassen hvor forsinkelsen oppstår.

Modellen minimerer altså følgende ligning:

$$\text{Tidstap} = \text{Forsinkelsestap} + \text{Ventetidstap}$$

Dette gjøres ved å velge optimal tid hver enkelt buss skal holdes igjen på en gitt holdeplass. Vi antar i modellen at passasjerene fordeler seg uniformt utover tidsperioden vi regner på, og at det er likt antall påstigende for hver holdeplass. I praksis vil det være ulikt antall per holdeplass, og den fulle modellen vi presenterer i appendikset tar hensyn til dette. For å vise prinsippene bak, gjør imidlertid en slik forenkling bare poenget tydeligere uten å tape gyldighet.

Test av intervallregulerende strategier

Intervallregulerende strategier forsøker å holde en avstand mellom bussene som anses som «optimal». Spørsmålet er her hvor stor avstanden skal være, og hvor mange busser som skal påvirkes bakover i rekken fra den forsinkede bussen.

Ovenfor har vi forsøkt å illustrere de ulike hensynene som må tas når man bestemmer en optimal reguleringstid. På den ene siden, vil økt reguleringstid minske ventetidskostnadene, men øke forsinkelseskostnadene. Den endelige effekten vil avhenge av hvor mange som påvirkes i hver retning og hvor mye.

Et mål med oppdraget er å vurdere ulike strategier Kolumbus har satt frem. I dette avsnittet ser vi på intervallregulerende strategier og tester dem mot hverandre. Det er tre strategier som undersøkes. Gitt at en buss blir forsinket fra en holdeplass, undersøker vi effekten av:

- **Første buss bestemmer (FBB):** Alle busser bakk holder igjen for å opprettholde konstante intervaller.
- **Ingen tiltak (IT):** Bussene fortsetter uten noen form for regulering
- **Intervallregulering (DH):** Vi benytter den optimale reguleringstiden som beregnet av optimeringsalgoritmen.

De tre strategiene representerer forskjellige avveininger mellom passasjerene og er egentlig spesialtilfeller av hverandre:

- Første buss bestemmer gir full prioritet til de som venter på bussen (**ventetidskostnadene**).
- Ingen tiltak legger full vekt på **forsinkelseskostnadene** for bussene bak den først forsinkede (ingen regulering gir ingen forsinkelse for de om bord).
- Intervallregulering forsøker å finne et **kompromiss** mellom ytterpunktene.

I en optimeringsmodellen kan man illustrere dette ut fra hvilken vekt man tillegger de enkelte tidselementene. Hvis a er et tall mellom 1 og 0, der 1 er full vekt på forsinkelseskostnadene og 0 full vekt på ventetidstapet, blir kostnaden vi forsøker å minimere til:

$$Tidstap = a \times Forsinkelsestap + (1 - a) \times Ventetidstap$$

Vi ser nå at hvis $a = 0$, blir $(1-a)$ lik 1, og dermed er kostnaden lik ventetidstapet ($0 \times$ Forsinkelsestap = 0). Nå blir tidstapet minst ved å sette ventetiden til minimum, som gjøres ved å ta bort alle ventetidskostnadene¹³. Dette er det samme som FBB.

Dersom man setter $a = 1$, blir kostnadene minst ved å sette forsinkelsestapet lik null, og dermed gjør man ingen endringen i avgangintervallene. Dette er det samme som IT.

Siden både forsinkelser- og ventetidskostnader er viktige for trafikantene, ser man at det på generelt grunnlag blir feil å velge både IT og FBB siden vi fjerner viktige deler av likningen. Denne konklusjonen kan modereres noe dersom f.eks. ingen sitter på bussene som blir forsinket, men selv i dette tilfellet er det ikke grunnlag for å velge FBB strategien i de fleste tilfeller, som vi bli demonstrert under.

Tabell 4.1. Tabell som viser hvilken vekt de ulike strategiene legger på ulike deler av trafikantenes reisebelastning.

Verdi på "a"	Strategi	Tidstap
1	Ingen tiltak (IT)	Forsinkelsestap
0	Første buss bestemmer (FBB)	Ventetidstap
Mellom 1 og 0	Intervallregulering (DH)	Forsinkelse- + ventetidstap

¹³ Kommentere at det ikke er lønnsomt selv med

Ved å velge DH, tar man hensyn til både forsinkelse- og ventetidstap, og prøver å gjøre dette så lite som mulig. Hvilken konkret vekt man skal tillegge forsinkelser versus ventetid kan variere, men det er generelt sett tilrådelig å ta hensyn til begge.

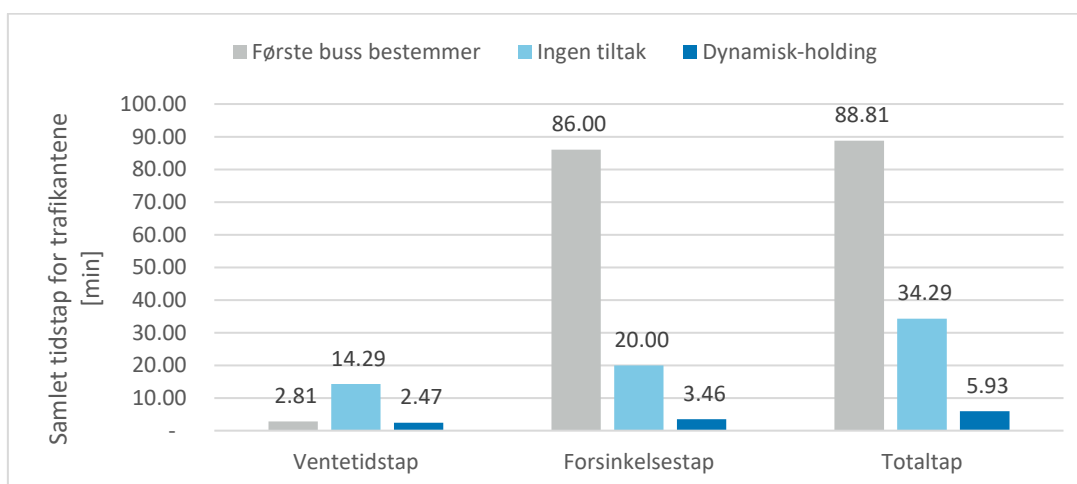
Regneeksempel

Vi har laget et regneeksempel som illustrerer kostnadene ved de ulike strategiene. I dette eksemplet er det samme antall påstigende per holdeplass. Videre holder bussene 20-minutters intervall som gir totalt tre avganger per time. Vi legger så på en 3 minutters forsinkelse og beregner totale kostnader ved de ulike strategiene.

Tabell 4.2. Forutsetninger i regneeksempel.

Tid mellom avganger	Forsinkelse	Passasjerer
20 minutter	3 minutter	10 per time 5 holdeplasser etter hvor forsinkelsen oppstår

Resultatene ser man i figuren under. Den klart dårligste strategien er FBB. Totalt sett er det mer fordelaktig (i vårt eksempel) og ikke foreta seg noe, heller enn å benytte nevnte strategi. Hovedårsaken er at man i alt for stor grad legger vekt på å redusere ventetiden gjennom opprettholdelse av konstante intervaller mellom avgangene. Reduksjonen i ventetid ved utsettelse av avganger avtar veldig raskt, slik at man tidlig når et punkt der man ikke lenger tjener på ytterligere utsettelse. Samtidig øker forsinkelsen konstant slik at man når et punkt hvor ytterligere forsinkelser er større en reduksjonen i ventetid. Når man forsinker alle bussene for å opprettholde konstante intervaller, påvirkes langt flere passasjerer negativt enn positivt, samtidig som den negative effekten per passasjer er større enn den positive.



Figur 4.10. Tidstap ved ulike strategier, inndelt etter ventetidstap, forsinkelsestap og totaltap.

Strategien IT fører til et langt lavere forsinkelsestap enn FBB Samtidig er ventetidstapet med denne strategien høyere, men samlet tidstap er langt lavere en FBB som illustrerer at det mulig å finne et kompromiss mellom de to strategiene.

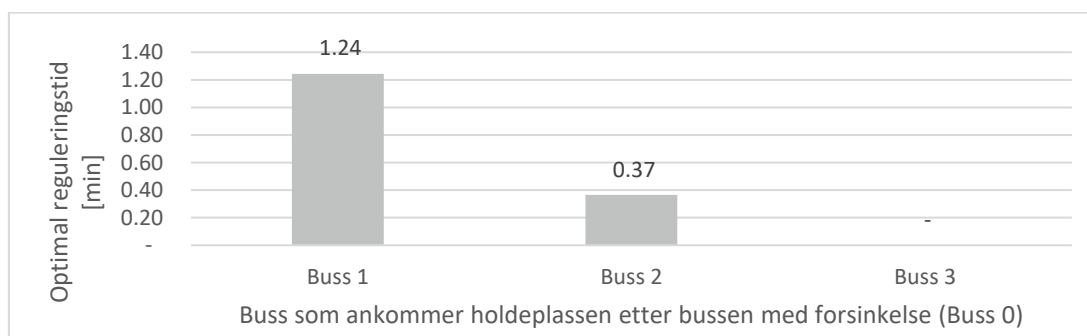
Benytter man DH blir kostnadene nå vesentlig lavere enn de andre strategiene. I vårt eksempel er det 70 % lavere tidskostnader for trafikantene ved å følge den beste strategien fremfor ingen tiltak og 90 % lavere kostnader enn ved «første buss bestemmer». Dette skyldes at den optimale strategien finner et kompromiss som gir lavest totalt tidstap, sammensatt av ventetid og forsinkelse.

Man ser at ventetidstapet er litt høyere ved DH enn FBB. Dette skyldes at det er optimalt med et litt høyere ventetidstap enn FBB, siden man da sparer veldig mye forsinkelseskostnader. Siden trafikantene også er opptatt av forsinkelser, oppnår man et bedre resultat ved å ikke hente inn alle ventetidskostnadene siden det medfører en veldig økning i forsinkelsene.

Ser vi på IT, er både ventetid og forsinkelse høyere enn ved DH. I dette tilfellet, «lønner» det seg fortsatt å øke forsinkelsene noe, siden man sparer inn veldig mye ventetidskostnader per minutt forsinkelse. DH-strategien finner det punktet hvor reduksjonen i ventetidskostnader er lavere enn økningen i forsinkelser. Fra dette punktet lønner det seg ikke å øke forsinkelsene ytterligere siden innsparingen (reduksjon i ventetidskostnader) er lavere enn kostnader (økte forsinkelser).

En viktig grunn til at første buss bestemmer er en mindre god strategi, fremkommer tydelig dersom vi ser på hvor mye det er optimal å holde igjen hver enkelt buss. Hvis man tenker på Buss 0 som den forsinkende fra en gitt holdeplass, og alle busser bak som Buss 1,.... osv, kan man beregne hvor lenge hver buss må vente. Dynamikken her er at man først forsinkes en buss, som gir effekter bakover, siden neste buss igjen blir forsinket. Man må derfor gjenta prosessen for hver nye buss som ankommer.

Figuren under viser optimal intervallreguleringstid beregnet med optimeringsmodellen vi har utviklet ovenfor. Bussen rett bak den forsinkede, må vente 1 minutt og 14 sekunder før den kan kjøre videre. Når neste buss ankommer, må den vente i ca. 22 sekunder, mens neste buss etter det venter i 0 sekunder. Etter dette er det ikke behov for at flere busser venter, med mindre nye forsinkelser oppstår.



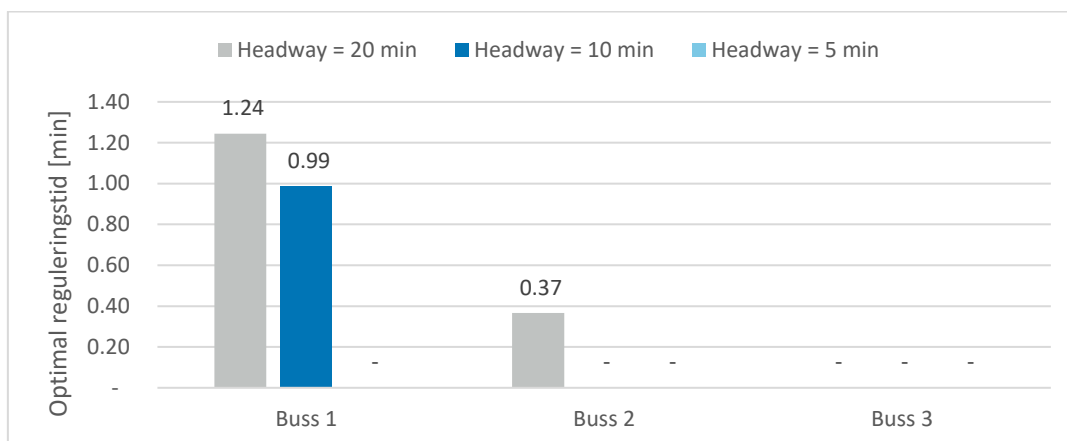
Figur 4.11. Optimal intervallreguleringstid etter ankomme buss på holdeplass etter forsinket buss. Buss 1 ankommer først, deretter buss 2, osv.

Eksemplet illustrerer at den optimale intervallreguleringstiden avtar veldig raskt. Dette henger sammen med illustrasjonen i figur xx. Her ser man at ventetidskostnadene avtar veldig raskt i starten med kun «litt intervallregulering». Deretter kreves det veldig mye intervallregulering for å oppnå samme reduksjon i ventetid. Dette innebærer at man som regel kun vil behøve moderat tilbakeholding på holdeplass før det ikke er gunstig å forsinke bussene ytterligere.

Videre er det slik at intervallregulering vil bli mindre attraktivt jo høyere frekvensen er i utgangspunktet. Dette skyldes at ved høy frekvens er det uansett relativt kort tid til neste buss. Om noen busser klumper seg sammen, er det da fortsatt relativt kort tid til neste buss ankommer, slik at frekvensen ikke ventetiden ikke påvirkes i særlig grad.

For å illustrere dette har vi laget et annet regneeksempel der alle forutsetninger holdes likt som tidligere, bortsett fra at tiden mellom avgangene endres fra 20 minutter (som ovenfor) til 10 og 5 minutter. Dette tilsvarer hhv 3, 6 og 12 avganger i timen.

Ved 3 avganger i timen er endringen som før, men ved 6 avganger i timen er det nå optimalt å holde igjen først buss i ett minutt, og deretter er det ingen endring. Ved 5-minutters intervall, er ventetiden så lav i utgangspunktet at det ikke er noen poeng i å holde igjen bussene.



Figur 4.12. Optimal intervallreguleringstid ved ulike planlagt headway etter ankomende buss på holdeplass etter forsinket buss. Buss 1 ankommer først, deretter buss 2, osv.

Eksemplet illustrerer at bruken av intervallregulerende tiltak er mindre viktig jo høyere frekvensen er. Dette skyldes at det er mindre å vinne på å redusere ventetiden, når den allerede er lav. Jo høyere frekvensen er, jo større tilbakeholding må til for å redusere ventetiden ytterligere. Dette innebærer at en høyere frekvens krever større forsinkelseskostnader, for en mindre reduksjon i ventetid, enn ved en lavere frekvens.

Oppsummering

Dette regneeksempel har illustrert følgende punkt:

- «Først buss bestemmer» er den minst fordelaktige strategien siden denne gir veldig store forsinkelser som ikke lar seg forsvare av reduksjon i ventetid

- «Ingen tiltak» gir langt bedre resultat enn første buss bestemmer, men gir fortsatt 270 % høyere kostnader enn den beste strategien i vårt eksempel.
- «Intervallregulering» gir den laveste kostnaden for trafikantene, fordi man tar hensyn til at både forsinkelser og ventetidskostnader er viktig for trafikantene når man bestemmer hvor mye hver buss skal holdes igjen på holdeplassen.

Optimal forbikjøringsstrategi

En del av oppdraget er å vise hvordan ulike metoder kan avveies mot hverandre. I denne forbindelse har vi satt opp en forenklet regnemodell.

Modellen består igjen av to typer kostnader: Forsinkelse- og ventetidstap:

$$Tidstap = Forsinkelsestap + Ventetidstap$$

Forsinkelsestap er større jo flere som skal av eller på holdeplassen man kjører forbi, mens ventetidstapet er større jo større forsinkelsene er og jo flere som skal på holdeplassene etter den man kjører forbi.

Grunnlaget for modellen er at man minimerer totalt tidstap for trafikantene. Tidstapet gjelder følgende grupper:

- De som egentlig skulle av på holdeplassen man kjører forbi må gå av holdeplassen før. De opplever en forsinkelse, siden de er nødt til å vente på neste buss for å komme videre.
- De som skal på holdeplassen man kjører forbi vil oppleve å måtte vente på neste buss
- De som skal på holdeplassene etter den som kjøres forbi opplever redusert ventetid siden avgangene blir mer jevne.

Hvor mye man tjener på å hoppe over en holdeplass, avhenger av hvor mye tid man kan spare inn. Man behøver ikke å bremse opp og ned for stoppet man hopper over, samtidig som man ikke bruker tid på å plukke opp passasjerer. Man må imidlertid bruke tid på å slippe av passasjerene som skal av på stoppet man hopper over, men dette skjer ett stopp før. Nettobesparelsen er altså tid brukt på start og stopp, samt av- og påstigning.

Man vil forvente at det er mer gunstig å benytte forbikjøring på holdeplasser hvor det er få som skal av eller på. Da vil ulempene være minst mulig. Siden valget om å stoppe er enten-eller, vil det også være muligheter for at ingen holdeplasser kan kjøres forbi. Slik sett stiller forbikjøringsstrategien litt strengere krav enn holding, og er mindre fleksibel.

For at det skal være fordelaktig å kjøre forbi en holdeplass, må tidstapet være lavere ved forbikjøring enn ikke. Dette kan uttrykkes ved følgende ulikhet:

$$Tidstap_{Ikke\ forbikjøring} < Tidstap_{Forbikjøring}$$

I motsetning til holding er dette er enten-eller-valg. Enten er tidstapet lavere ved forbikjøring, eller ikke.

Dersom man ikke kjører forbi en gitt holdeplass, vil ikke de som skal av- og på bli forsinket. Samtidig vil ikke de som stiger på oppleve økt ventetid på holdeplasser etter den som vurderes regulert få redusert sin ventetid, og de som sitter på bussen opplever heller ikke at den kjører inn redusert forsinkelse.

Tidstapet uten forbikjøring er ventetidstapet når man ikke gjennomfører forbikjøring, altså, økt ventetid ved påfølgende holdeplasser grunnet mer ujevne intervaller og forsinkelsene for de som sitter om bord på bussen:

$$Tidstap_{Ikke\ forbikjøring} = Ventetidstap_{Ikke\ forbikjøring} + Forsinkelsestap_{Ikke\ Forbikjøring}$$

Tidstapet med forbikjøring er lik forsinkelsestapet for de som skulle av- og på holdeplassen som ble forbikjørt, pluss ventetidstapet når man kjører forbi:

$$Tidstap_{Forbikjøring} = Forsinkelsestap_{Forbikjøring} + Ventetidstap_{Forbikjøring}$$

Størrelsen på forsinkelsestapet avgjøres av hvor mange som må vente og hvor lenge. Med andre ord hvor lenge det er å vente til neste buss, og hvor mange som skulle av og på den forbikjorte holdeplassen.

Tabellen under viser hvordan de ulike kostnadskomponentene er beregnet i modellen vi har satt opp. Her er står valget altså mellom å velge forbikjøring (**F**) eller ikke forbikjøring (**IF**).

Tabell 4.3. De ulike kostnadene forbundet med om man velger å kjøre forbi en holdeplass eller ikke.

Kostnad	Innhold
$Ventetidstap_{Ikke\ forbikjøring}$	<ul style="list-style-type: none"> Økt ventetid for de som skal på bussen fra stopp S+1 og utover (se figur xx)
$Ventetidstap_{Forbikjøring}$	<ul style="list-style-type: none"> $Ventetidstap_{Ikke\ forbikjøring}$ fratrukket den tiden man klarer å kjøre inn ved å hoppe over en holdeplass
$Forsinkelsestap_{Ikke\ Forbikjøring}$	<ul style="list-style-type: none"> Forsinkelse for de som sitter på bussen og som skal av etter holdeplassen som kjøres forbi
$Forsinkelsestap_{Forbikjøring}$	<ul style="list-style-type: none"> Forsinkelse for de som skal av eller på holdeplassen som kjøres forbi Forsinkelse for de som skal av etter holdeplassens om man hopper over og som man ikke har klart å «kjøre inn»

Test av forbikjøringsstrategi

En del av oppdraget er å vurdere fordeler og ulemper ved strategiene. Vi skal nå gjennomføre en test av forbikjøringsstrategien, som vil synliggjøre i hvilke tilfeller og hvor ofte det vil være gunstig å kjøre forbi en holdeplass.

I motsetning til intervallregulering, er forbikjøring en mindre smidig strategi. Man kan enten velge å kjøre forbi, eller ikke. Man kan imidlertid velge hvilken holdeplass man skal kjøre forbi på en måte som gir lavest belastning for trafikantene. I kapitlet om forbikjøringsstrategier, så vi at følgende momenter påvirker sannsynligheten for at forbikjøring er gunstig:

- Jo færre som får på ved holdeplassen som forbikjøres, jo mindre belastende oppleves forbikjøringen (de må vente på neste buss)
- Jo flere som skal av på holdeplassens som kjøres forbi, jo mer belastende oppleves forbikjøringen (de må vente på neste buss)
- Jo større forsinkelsen er, jo mer bidrar forbikjøring til å redusere kostnadene
- Jo flere som får redusert ventetid (jo flere som går på etter holdeplassen som kjøres forbi), jo mer gunstig er forbikjøring

Det er ikke like lett å lage en modell som illustrerer alle disse poengene på samme tid. I holding eksemplet, valgte vi å anta like mange på- og avstigende per holdeplass. Ved forbikjøring er nettopp valg av holdeplass man kjører forbi i større grad avhengig av passasjerfordelingen over linjen, og dette må derfor være en sentral del av beregningen.

Eksempel på anvendelse av modellen

For å vise hvordan modellen fungerer, har vi gjennomført en test av strategien på et overordnet nivå. Vi har valgt linje 2 i Stavanger som case, og beregnet kostnadene for trafikantene ved forbikjøring og ikke per holdeplass ved ulik grad av forsinkelse. Modellen er kjørt under ulike antagelser om forsinkelse. Vi har lagt til grunn 1, 2 og 3 minutters forsinkelse i våre beregninger. Siden det ikke går an å kjøre forbi første holdeplass (Stavanger sentrum) er denne utelatt fra beregningen.

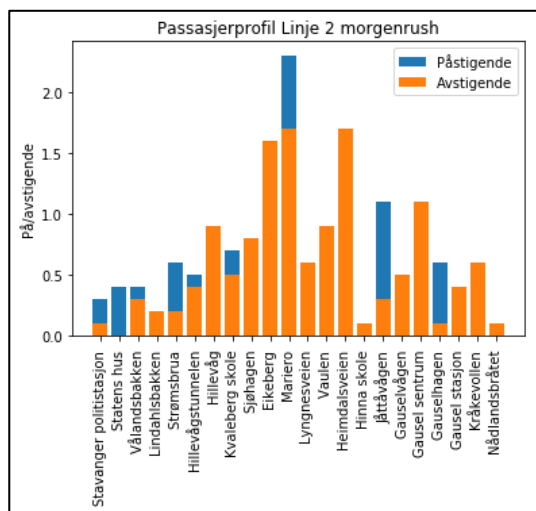
Figuren til venstre under viser passasjerprofilen ved linje 2 i morgenrushet. Man ser at det er en del variasjon i hvor mange som går av og på ved de ulike stasjonene. Dette vil påvirke hvilke holdeplasser som er egnet og ikke for forbikjøring.

Figuren til høyre under viser forskjellen i tidskostnader ved forbikjøring (**F**) og ikke forbikjøring (**IF**). Når stabelene er over null, er kostnadene ved å ikke kjøre forbi større enn ved forbikjøring. Det motsatte er tilfellet når stabelen er under linja.

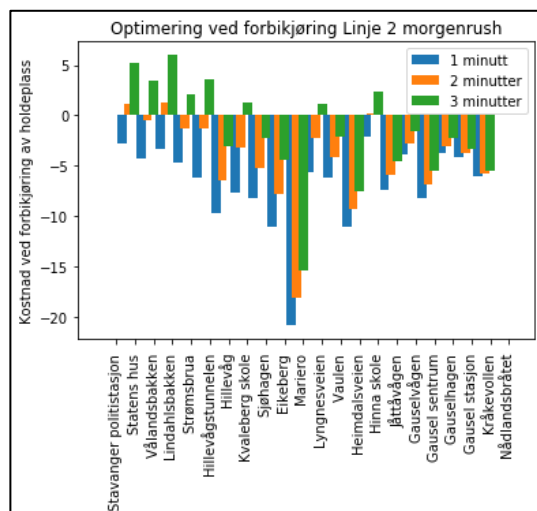
Vi ser at den ved ett minutt forsinkelse ikke er noen holdeplasser hvor det er optimalt å kjøre forbi. Ved to minutters forsinkelse blir noen av de første holdeplassene så vidt forbikjørt. Ved tre minutters forsinkelse er det nå enda flere som kan kjøres forbi, spesielt i starten. Det er to grunner til dette:

- For det første er det relativt få av- og påstigende ved disse holdeplassene. Dette gjør at kostnadene ved forbikjøring er lavere
- For det andre er holdeplassene tidlig på ruta. Dette gjør at en reduksjon i forsinkelsene vil redusere ventetiden på alle de påfølgende holdeplassene. Siden man ennå er tidlig på ruta, er det mange holdeplasser igjen som gjør gevinsten større.

Videre er det ingen av de større holdeplassene som blir forbikjørt, som skyldes at kostnadene som påføres de som skal av eller på holdeplassen er større enn gevinstene. Samtidig viser beregningen at de fleste holdeplassene ikke egner seg til å kjøres forbi.



Figur 4.13. Av- og påstigninger på linje 2 i morgenrush.



Figur 4.14. Differanse i kostnad ved forbikjøring og ikke etter ulik grad av forsinkelse.

For å gå litt dypere inn i hvilke faktorer som påvirker hvor «attraktivt» det er å kjøre forbi en holdeplass, har vi valgt å gjennomføre et simuleringsforsøk på en faktisk linje som kjøres av Kolumbus i dag. Dette er en høyst forenklet beregning, som er ment å vise potensialet ved forbikjøring, og hvilke faktorer som påvirker mest. Vi har altså to spørsmål som vi ønsker besvart med simuleringen:

1. I hvilken grad er forbikjøring fordelaktig med vår metodikk på en valgt linje?
2. Hvordan påvirker metodikkens faktorer sannsynligheten for at forbikjøring er fordelaktig?

Vi har valgt å benytte linje 2 som test-case for simuleringen. I simuleringsforsøket har vi kjørt optimaliseringsalgoritmen, som er dokumentert i vedlegget. I simuleringen kjører bussen til sammen 10 000 avganger. I hver avgang gjøres en beregning av følgende:

- På hvilken holdeplass oppstår forsinkelsen?
- Hvor stor er forsinkelsen?

I prinsippet kan alle holdeplasser foruten den første oppleve forsinkelse. Siden man ikke kan kjøre forbi den første holdeplassen, har vi valgt å ta denne ut av beregningen. Videre antar vi at den kan oppstå forsinkelser på mellom 0 minutter (ingen forsinkelse) og 10 minutter, og alle typer forsinkelser er like sannsynlige (det er like sannsynlig med ingen som full forsinkelse, og alle kombinasjoner i mellom).

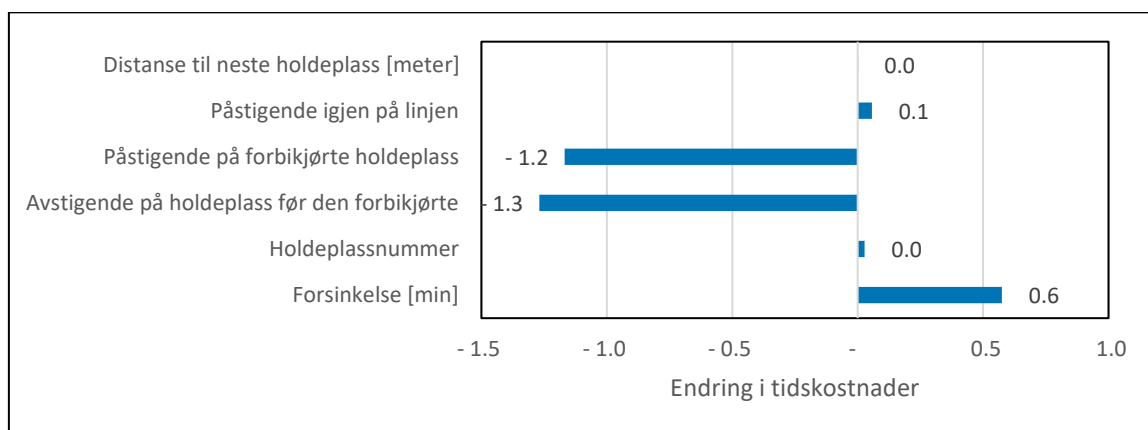
Simuleringen genererer et datasett med 220 000 registrerte beregninger av hvorvidt kostnaden ved å kjøre forbi holdeplassen er mindre enn ved å ikke kjøre forbi. Videre henter vi informasjon om antall av- og påstigende på holdeplassen, forsinkelsen, holdeplassestnummer, distanse til neste holdeplass og påstigende ved påfølgende holdeplasser. Disse dataene benytter vi til å teste om modellen gir «oppfører» seg på den måten vi forventer, og samtidig hvilke faktorer som er viktigst.

Vi har kjørt en regresjonsanalyse hvor differanse i kostnader ved forbikjøring og ikke er avhengig variabel (Y):

$$Y = Tidstap_{Ikke\ forbikjøring} - Tidstap_{Forbikjøring}$$

Formuleringen innebærer at positive effekter tilsier at, alt annet likt, så er tidstapet mindre ved forbikjøring enn ikke når variabelens verdi øker.

Figuren under viser resultatene av simuleringsforsøket og regresjonsanalysen. Her kan effektene leses som «med en prosent økning i variabel X, så øker forskjellen mellom $Tidstap_{Ikke\ forbikjøring}$ og $Tidstap_{Forbikjøring}$ med Z antall minutter». Dette innebærer at negative effekter gjør forbikjøring mindre attraktivt, mens positive effekter gjør det mer attraktivt. En positiv effekt indikerer at $Tidstap_{Ikke\ forbikjøring} - Tidstap_{Forbikjøring}$ øker, som betyr at tidstapet ved forbikjøring blir mindre enn ikke forbikjøring.



Figur 4.15. Effekten av ulike variabler på hvor gunstig det er å kjøre forbi en holdeplass kontra ikke. Effektene måles som antall minutters lavere tidskostnad totalt for trafikantene ved forbikjøring enn ikke ved 1 % endring i de ulike variablene. Beregnet ved regresjonsanalyse med data generert i simuleringsforsøk.

De to aller viktigste faktorene som påvirker om kostnadene blir høyere eller lavere med forbikjøring er av- og påstigende ved forbikjørt holdeplass. Når antall påstigende øker med 1 %, er det i gjennomsnitt 1.2 minutter høyere tidskostnader ved forbikjøring enn ikke. Når antall avstigende øker med 1 %, er det i gjennomsnitt 1.3 minutter høyere tidskostnader ved forbikjøring enn ikke. Grunnen til at antall påstigende har enn litt lavere effekter er at flere påstigende på holdeplassen man kjører forbi gir større besparelse på oppholdstid ved forbikjøring, som er en liten positiv effekt. Avstigende har ikke den samme effekten, siden vi har antatt at disse blir sluppet av. Man kan diskutere om effekten skal være med, da neste buss uansett må plukke de forbikjorte opp, men vi har valgt å inkludere den i vår modell for å synliggjøre effekten av oppholdstid.

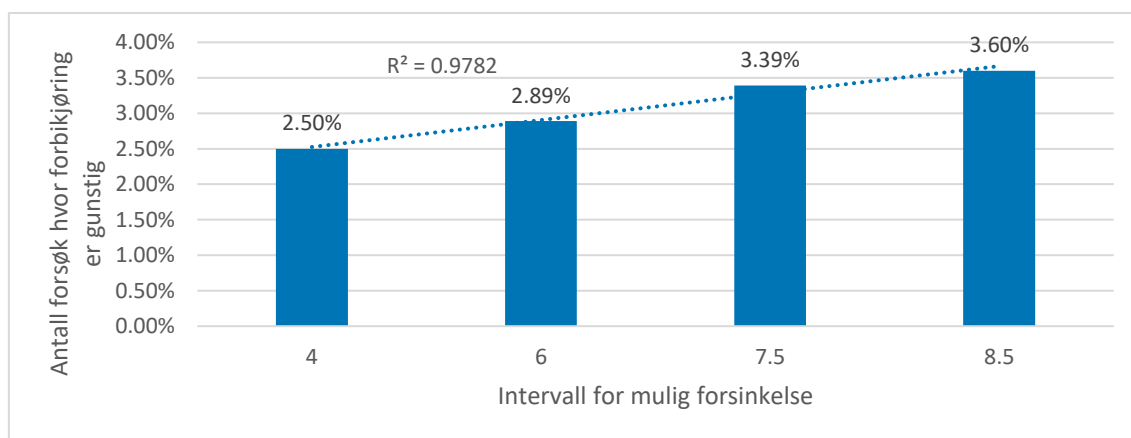
Størrelsen på forsinkelsene som har oppstått er den nest viktigste faktoren. En prosent høyere forsinkelser gir i gjennomsnitt 36 sekunder lavere tidskostnader ved forbikjøring enn ikke. Årsaken til at effekten ikke er like stor som for antall av- og påstigende, ligger i at gevinsten av å redusere forsinkelsene (spesielt effekten på ventetidstapet) er avtagende, mens effekten for de som kjøres forbi er konstant. Dette er den samme effekten man ser ved intervallregulering.

Til sist er den noen mindre effekter av påstigende igjen ved resten av linjen. Dette skyldes at jo flere som stiger på etter holdeplassen som regulerer, jo flere får nytte av reduserte ventetidskostnader.

De øvrige variablene er tatt med som kontrollvariabler.

For å undersøke hvor ofte det er optimalt å benytte forbikjøring, har vi beregnet antall simuleringsforsøk der kostnadene ved å kjøre forbi er lavere enn ikke å kjøre forbi. Figuren under viser andel forsøk hvor forbikjøring er gunstig ut fra ulike gjennomsnittsforsinkelser lagt til grunn på 4, 6, 7.5 og 8.5 minutter.

Resultatene viser at det for den konkrete linjen vi ser på, er svært få tilfeller der forbikjøringsstrategien er fordelaktig. Dette resultatet gjelder kun for linjen vi har sett på, og under de høyst stiliserte forutsetningene ang. forsinkelse vi har gjort.



Figur 4.16. Andel forsøk hvor forbikjøring er gunstig etter ulike grad av gjennomsnittlig forsinkelse per holdeplass. Resultat av simuleringsforsøk.

Ved fire minutters forsinkelse, er det ca. 2.5 % av holdeplassene man kan kjøre forbi. Ved 8.5 minutters gjennomsnittlig forsinkelse, er dette tallet kun økt med 1.1 prosentpoeng til 3.6 %. Dette skyldes at:

- Antallet av- og påstigende er såpass høyt ved de fleste holdeplassene at det forsinkelsene ikke er store nok til å forsvare forbikjøringsstrategien
- Reduksjonen i forsinkelsene ved forbikjøring øker ikke proporsjonalt med selve forsinkelsen. ***Det er den mulige innkjørte forsinkelsen som avgjør hvor fordelaktig forbikjøring er.***

Eberlein et. al. (1999) kom frem til et lignende resultat, der forbikjøring ble benyttet i langt mindre grad enn intervallregulering. De fant også at bruken av forbikjøring ble betraktelig redusert dersom man kunne velge mellom intervallregulering og forbikjøring.

4.5 Effekt på KPI-parametere

En del av oppdraget er å diskutere hvordan de ulike strategiene vil påvirke KPI-parametere. I dette kapitlet diskuterer vi de effektene vi tror vil eksistere mellom strategiene og KPI-parametere.

Vi har valgt å bruke strategien «ingen tiltak» som referansestrategi. Dette vil si at alle forventede effekter på KPI-parametere tolkes relativt til strategien «ingen tiltak».

Tabell 4.4. Forventet effekt på KPI-parametere ved ulike strategier når strategien «ingen tiltak» er referansestrategi.

Strategi/KPI	Ventetid	Forsinkelse	Trengsel
Første buss bestemmer	÷÷	+++	÷
Intervallregulering	÷	+	+/÷
Forbikjøring	÷	+	+

Ventetid forventer vi at reduseres med alle de tre strategiene vi har diskutert. Første buss bestemmer vil opprettholde faste intervaller mellom alle avganger, slik at ventetiden blir lik det teoretiske minimum (minimal ventetid, gitt rutetabellen). Siden strategien i praksis eliminerer all ekstra ventetid, vil den gi den sannsynligvis gi den største reduksjonen av alle strategiene.

Intervallregulering vil også redusere ventetiden, men ikke like mye, siden man her avstemmer interessene til ulike trafikanter istedenfor å kun legge vekt på en av dem som med første buss bestemmer. Forbikjøringsstrategien vil også kunne bidra til å redusere ventetiden, men vil trolig bli hindret av (1) man ikke klarer å kjøre inn «tilstrekkelig» med forsinkelse og (2) man kan potensielt kjøre inn mer enn gunstig.

Videre forventer vi at første buss bestemmer gir den absolutt største økningen i forsinkelser, relativt til «ingen tiltak». Dette skyldes at alle busser bak den forsinkede også forsinkes og forplanter seg til alle passasjerene. Intervallregulering er forventet å gi en moderat økning i forsinkelse, og langt lavere enn første buss bestemmer, mens forbikjøring også gir høyere forsinkelser siden passasjerer som skal av eller på forbikjørt holdeplass må vente lenger.

Når det gjelder trengsel, er effektene noe mer usikre. En hovedlinje er imidlertid at jevnere intervaller sprer trafikantene mer utover bussparken, slik at trengselen trolig blir noe mindre. Ved klumping, vil kanskje mange gå på den første bussen som ankommer, etter å ha ventet en lengre periode, slik at fordelingen av passasjerer blir veldig ulik fra buss til buss. Første buss bestemmer vil trolig bidra til lavest trengsel, siden man her har de mest jevne intervallene. Intervallregulering kan føre til mer trengsel dersom man legger mer vekt på forsinkelser enn ventetid, og motsatt om ventetid er viktigere enn forsinkelser. Til sist vil forbikjøring trolig føre til mer trengsel, siden de påstigende ved forbikjørt holdeplass må gå på neste buss, slik at lasten bli mer ujevnt fordelt.

Rutetider eller faste intervall?

I et driftsperspektiv kan en BRT-løsning kjøre etter en forhåndsdefinert rutetabell («schedule service») eller ved å holde konstante intervaller mellom bussene («headway-based service»). En kan også se for seg en hybridversjon der bussene følger en rutetabell, men alle tidspunktene langs ruta er da bare retningsgivende og må ikke overholdes (APTA BRT Operations Working Group, 2010). Den påfølgende teksten gjennomgår disse hovedstrategiene hver for seg i tillegg til forbikjøring på holdeplass.

Generelt sett ser man likevel at en forhåndsdefinert rutetabell ikke nødvendigvis gir den mest optimale reisetiden for trafikantene ettersom bussjåførene gjerne må vente med å reise fra gitt punkter. Samtidig kan konstante intervaller mellom bussene resultere i at man ikke benytter materiell på den mest optimale måten for eksempel hvis et kjøretøy når enden av ruta raskere enn forventet og dermed får u hensiktsmessig lang ventetid.

Dersom man velger konstante intervaller mellom bussene, er det dessuten viktig at det kombineres med sanntidsinformasjon til de reisende for å fjerne ev. usikkerheter rundt når bussen vil ankomme. Hvilken driftsstrategi som velges avhenger gjerne av markedssegmentet det skal betjene. Hyppige brukere vil raskt lære seg nyansene i tilbudet, mens kunder som benytter tilbudet i blant gjerne ønsker seg en rutetabell. Uavhengig av kundegruppen er uansett pålitelighet viktig overholdes (APTA BRT Operations Working Group, 2010).

Rushtidsavganger

Rushtiden er preget av høyere etterspørsel og gjerne i kombinasjon med lavere fremkommelighet. Delen av trafikantopplevelsen som er mest påvirket av rushtidssvingningene er trolig trengsel og forsinkelser.

Et godt argument for større kapasitet i rushtiden er derfor redusert trengsel om bord som gir en forbedret trafikantopplevelse. Vi har allerede dokumentert at trengsel er en relevant KPI-faktor. Generelt sett er anbefales det å operere med et tilbud som er tilpasset rushtiden dersom denne skiller seg vesentlig fra lavperioden. Man må da vurdere om kapasiteten er tilpasset etterspørselen i hvert tilfelle.

Dersom vi antar at man behøver økt kapasitet, kan dette fremkomme på to ulike måter: Enten kjører man flere avganger, eller så benytter man større vogner. Vi skal nå gjennomføre en regneeksempel for å vise hvordan de to strategiene gir ulikt utslag på kostnader for trafikanter og operatøren.

Vi har benyttet en normert kostnadsmodell utviklet av Urbanet analyse (Betanzo & Haraldsen, 2016) for å estimere kostnad per rutekilometer. Vi har så gjennomført tre eksempelberegninger som viser ulike strategier for å oppnå ønsket kapasitet.

Tabellen under viser antagelser om busstørrelser, antall avganger per time, rutelengde og kostnad per rutekilometer som beregnet av kostnadsmodellen¹⁴. Vi ser forenklet på en linje

¹⁴ Vi har antatt 19 km/t som gjennomsnittshastighet i alle beregninger.

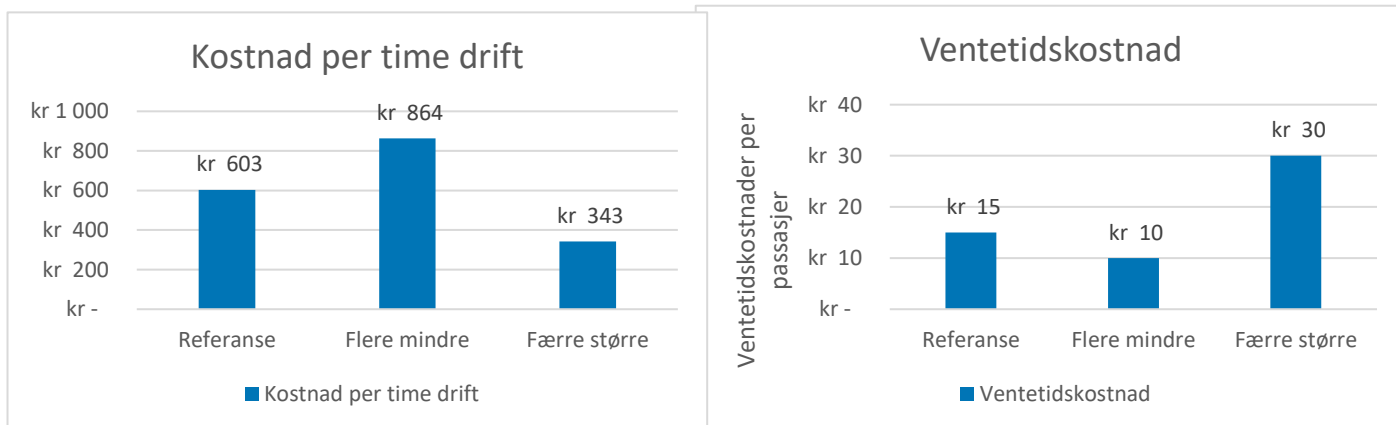
innen en rushtime, hvor man ønsker en kapasitet på 1300 setekilometer per time. De tre scenariene er:

- **Referanse:** Vi har valgt representative tall i modellen for å illustrere hvordan en representativ bussoperatør typisk vil oppnå ønsket kapasitet.
- **Færre større:** I denne strategien kjører man færre og større vogner.
- **Flere mindre:** I denne strategien kjører man flere små vogner oftere.

Tabell 4.5. Antagelser i regneeksempel som illustrerer ulike strategier for å oppnå ønsket kapasitet.

Kapasitet	Referanse	Færre større	Flere mindre
Plasser	65	130	43
Avganger	2	1	3
Lengde	10	10	10
Kost/rutekm	kr 30	kr 34	kr 29
Kapasitet	1300	1300	1300
Kostnad	kr 603	kr 343	kr 864

Vi gjennomfører beregningen på en slik måte at man alltid har samme kapasitet i de ulike scenariene. I tillegg til å beregne kostnader for operatøren, beregner vi også ventetidskostnader per trafikant.



Figur 4.17. (Venstre) Kostnader per time drift ved ulik størrelse på vognmateriell og avgangsfrekvens. (Høyre) Ventetidskostnader per passasjer med ulike tilbud.

Figurene under viser anslått kostnad per time drift, og ventetidskostnader for trafikantene i de ulike scenariene. I referansen koster tilbudet ca. 600 kr per time. I scenariet «flere mindre» har dette steget til 860 kr, som skyldes at man nå kjører flere avganger per time. Selv om kostnaden per rutekilometer er lavere siden man kjører mindre busser, gir ikke dette stor nok effekt til å senke kostnadene totalt. Går vi til «færre større», ser vi at kostnadene er desidert lavest på 343 kr per time, nesten halvparten av referansen.

Når vi ser på ventetidskostnadene (trafikanntytte) per passasjer, er bildet noe annerledes. Her ser vi at strategien «flere mindre» gir ca. 30 % lavere kostnader enn referansen, mens «færre større» gir 100 % høyere trafikanntytte enn referansen.

Diskusjonen ovenfor har vist at det **bør opereres med høyere kapasitet i rush dersom etterspørselen er så stor at man opplever kapasitetsproblemer og økt trengsel**. Videre er det ulike måter å øke kapasiteten på som innehar en sentral motsetning mellom ulike interesser:

- **Færre avganger, større vogner:** Gir lavest kostnader for operatør, høyest for trafikantene
- **Flere avganger, mindre vogner:** Gir høyest kostnader for operatør, lavest for trafikantene

Når man i praksis skal fastsette hvordan man oppnår en høyere kapasitet kan man enten velge en strategi som vektlegger operatørens kostnader eller trafikantenes. I praksis er det trolig gunstig å finne en «kompromiss» som gir lave trafikantkostnader uten å øke driftskostnader for mye.

Oppsummert bør man altså velge et tilbud som sikrer tilstrekkelig kapasitet i rush. Dette kan både gjennomføres med egne rutetider med flere avganger, med større vogner eller en blanding.

4.6 Oppsummering og anbefaling

Vi har i dette kapitlet gjennomgått ulike verktøy/strategier for hvordan trafikklederen kan benyttes til å gi de reisende en mindre belastning og bedre opplevelse. En viktig del av denne oppgaven, er å vurdere fordeler og ulemper med strategiene og gi en prioritert anbefaling til implementering.

Første buss bestemmer

Strategien første buss bestemmer har følgende fordeler og ulemper:

- **Strategien er veldig enkel å implementere**, man må kun sørge for at hver enkelt buss ikke nærmer seg neste buss slik at intervallene mellom avgangene blir mindre enn rutetabellen.
- **For trafikantene er første buss bestemmer den klart dårligste strategien.** Dette skyldes at man påfører unødvendig store forsinkelser uten å oppnå vesentlig reduksjon i ventetid. Strategien legger dermed alt for stor vekt på å redusere ventetiden, og tar ikke hensyn til forsinkelsene som trafikantene påføres. Tidligere undersøkelser har vist trafikanter misliker forsinkelser sterkt, slik at en strategi som ikke tar hensyn til forsinkelser, vil heller ikke ta hensyn til trafikantenes preferanser.

Konklusjon: *Vi vil fraråde Kolumbus og benytte strategien «første buss bestemmer», da den ikke tar hensyn til hvordan forsinkelser påvirker trafikantene.*

Intervallregulering

Holding-strategien har flere fordeler og ulemper, og under følger en gjennomgang av de som nevnes i litteraturen og de Urbanet Analyse har funnet i sitt eget arbeid med strategiene:

- **Tar hensyn til både ventetid og forsinkelser:** En klar fordel med strategien er at den bedre reflekterer trafikantens preferanser ved å både se på forsinkelser og ventetid.
- **Kontinuerlig beslutningsvariabel:** Siden man bestemmer antall minutter man skal holde igjen en buss, har man mange frihetsgrader til å anpasse strategien. For eksempel vil man med andre strategier som stasjonshopping (diskutert under) kunne velge å hoppe over ett stopp. Dette er en enten-eller-avgjørelse, mens holding vil kunne tilpasses bedre gjennom at man finkalibrerer antall minutter, som er kontinuerlig.
- **Tidligere studier viser god effekt:** Videre har holding vist seg å kunne gi betydelige besparelser for de reisende gjennom en rekke studier. Eberlein et. al. (1995) og Muñoz et. al. (2013) viser til betydelige besparelser med denne strategien for brukerne (opp mot 60 % reduserte ventetid). Dette er begge simuleringsstudier hvor flere strategier testes.
- **Førernes etterlevelse kan skape utfordringer:** En potensiell utfordring med strategien er å få førerne til å følge instruksjonene, pekt på av Gisen (2017). Videre må man sikre at løsningen er så enkel at den kan skaleres opp til et sanntidssystem, og samtidig beskrive dynamikken på en tilstrekkelig god måte.
- **Bruk på predikerte verdier gir usikkerhet:** En annen utfordring er at metoden i praksis må benytte predikerte verdier for antall busspassasjerer og ankomsttidspunkt ved holdeplasser fremover i ruten. Dette kan potensielt gjøre at en strategi som i utgangspunktet er optimal til mindre god. For eksempel kan antallet passasjerer som faktisk ankommer være ulikt det man forventer, eller forstyrrelser gjør at ankomsttidspunktet blir et annet enn det planlagte. Slike forhold er vanskelige å hensyn til, men Eberlein et. al. (1995) peker på at metoden kan fungere godt, selv med en del tilfeldige variasjoner i spill.

Konklusjon: *Vi vil anbefale Kolumbus og teste ut intervallregulerende strategier først. Enten gjennom en optimaliserende eller forenklet implementasjon, som angitt i kapittel 6.*

Forbikjøring av holdeplass

Forbikjørings-strategien har flere fordeler og ulemper, og under følger en gjennomgang av de som nevnes i litteraturen og de Urbanet Analyse har funnet i sitt eget arbeid med strategiene:

- **Tar hensyn til både ventetid og forsinkelser:** En klar fordel med strategien er at den bedre reflekterer trafikantens preferanser ved å både se på forsinkelser og ventetid.
- **Mindre treffsikker:** I motsetning til intervallregulering, er forbikjøringsstrategien begrenset av den mulige innkjøring av forsinkelse man oppnår. Ved for lav potensiell innkjøring, vil ikke strategien lønne seg, mens ved for høy innkjøring kan den øke, istedenfor redusere ventetidskostandene. Strategien er dermed i seg selv mindre «treffsikker» en intervallregulering.
- **Blir først effektiv i kombinasjon med andre strategier:** Forbikjøringsstrategien blir trolig først effektiv dersom den kombineres med hastighetsregulerende tiltak. I praksis innebærer dette at strategien må gjøres enda mer kompleks før den oppnår samme «smidighetsnivå» som intervallregulering.

Konklusjon: *Vi vil anbefale Kolumbus og teste ut forbikjøringsstrategier etter intervallregulering.*

Oppsummering

Vi oppsummerer nå kort anbefalingene vi har lagt frem i dette kapitlet og begrunnelsen for dem.

De ulike strategiene skiller seg på flere måter fra hverandre. I hvilken grad man inkluderer forsinkelser i regnestykket er trolig den viktigste. Der holding og forbikjøringsstrategien tar hensyn til forsinkelser, velger første buss bestemmer å ignorere denne delen av trafikantenes kostnader. En slik utelatelse gjør at strategien vil legge for stor vekt på redusert ventetid, uten å ta hensyn til de negative konsekvensene dette påfører trafikantene gjennom økte forsinkelser.

Både intervallregulering og forbikjøring tar hensyn til en større andel av trafikantenes kostnader gjennom forsinkelser og ventetid. Strategiene skiller seg imidlertid på hvilket type virkemiddel de benytter for å redusere forsinkelsene. Der intervallregulering står fritt til å velge nærmest hvilket som helst nivå på utsatt avgangstid, kan forbikjøringsstrategien benytte seg av et mindre sett av valgmuligheter for hvor nærme bussen foran man skal komme. Dette gjør at intervallregulering er en mer tilpasningsdyktig strategi, som i større grad gjør det mulig å «skreddersy» en regulering av trafikken som er samstemt med trafikantenes preferanser.

På bakgrunn av diskusjonen ovenfor anbefaler vi derfor følgende prioriterte rekkefølge for uttesting av de ulike strategiene i simulatormodulen:

4. Forenklet intervallregulering (se kap. 6)
5. Optimal intervallregulering
6. Forbikjøring

I tillegg fraråder vi å test ut «første buss bestemmer», da denne strategien etter vårt syn har svært lite potensial for bidra til en bedre trafikantopplevelse. Vi anbefaler å test ut forenklet intervallregulering først. Denne implementasjonen av intervallreguleringstrategien er noe mindre treffsikker en den optimale vi har sett til nå, men er vesentlig enklere å implementere.

5 Validering av valgte ytelsesindikatorer

Kapittelet beskriver hvilke ytelsesindikatorer som benyttes av andre BRT- eller baneprosjekter med kontrollrom for å regulere trafikken som et slags valideringsgrunnlag for det som er foreslått for bussveien i Stavanger. Litteraturkartleggingen har vist at det har vært begrenset informasjon om dette, og spesielt om utfordringene ulike løsninger har stått ovenfor. Kapittelet beskriver derfor i tillegg til de to valgte løsningene, BRT-løsningen i Almere og T-banen i København, også ytelsesindikatorer for kollektivtransport, ITS og/eller trafikkstyring på et mer overordnet, generelt nivå. Avslutningsvis er det forsøkt å tydeliggjøre hva det er viktig å ta med seg fra litteraturkartleggingen til løsningen i Stavanger.

5.1 Valg av referanseprosjekter (om litteraturkartleggingen)

Stort utvalg BRT-løsninger med kontrollrom

Ettersom BRT-løsninger tilbyr et tilbud med høy frekvens og dermed et stort volum reisende, kan det være utfordrende å kontrollere disse rutene på en kostnadseffektivt og konvensjonelle måte, og en ser derfor på mulighetene som ligger i ny teknologi. Det er da mest vanlig å i større grad ta i bruk kontrollrom og tilhørende teknologi. Teknologi som AVL og CAD muliggjør sporing av kjøretøyet, og én person kan dermed gi korrigerende instruksjoner til mange kjøretøy. Ved å se systemet i helhet er kontrolløren ofte i stand til å forutse potensielle problemer og ta korrigerende tiltak før det skjer noe som påvirker tilbudet til kundene (APTA BRT Operations Working Group, 2010). Det gjør også at intelligent transportsystem (ITS) gir gode muligheter for økt pålitelighet. Det forenkler forsinkelsesbasert planlegging da man for eksempel kan styre «bus dispatch» i sanntid, og det gir også sanntidsinformasjon som forbedrer komforten for passasjerene (APTA Bus Rapid Transit Working Group, 2010). Ytterligere informasjon om hvordan et slikt kontrollrom fungerer er omtalt i Tekstboks 5.1.

En rekke BRT-løsninger har i dag et fullstendig operasjonelt kontrollrom. En oversikt over hvilke løsninger som har et fullstendig operasjonelt kontrollrom i Europa, Nord-Amerika og Oseania hentet fra nettstedet Global BRT Data¹⁵ og en oversikten hentet fra ITDP er gjengitt i vedlegg.

¹⁵ https://brtdata.org/indicators/systems/operations_control_center

Denne nettsiden gir også en oversikt over BRT-løsninger som delvis har et fullstendig operasjonelt kontrollrom, i tillegg til de som ikke har det i det hele tatt.

«The BRT Standard» sier at et kontrollsentert er et økende krav for å oppnå tilbudsforbedringer av BRT-systemer. Et full-service kontrollsentert overvåker driften av tilbudet gjennom sporing av bussene med GPS eller lignende teknologi for å identifisere og løse eventuelle hendelser i sanntid. Man kan også bruke Computer-Aided Dispatch (CAD)/Automatic Vehicle Location (AVL) for sporing av busser og ytelesovervåking. Dette er nærmere omtalt i vedlegg. Kontrollsentert kan også brukes til å kontrollere avstanden mellom bussene f.eks. for å unngå klumping, registrere antall av- og påstigende passasjerer til bruk i fremtidige tilbudsforbedringer, og anslå vedlikeholdsstatusen til alle bussene i kjøretøyflåten (Breithaupt *et al.*, 2014).

Tekstboks 5.1. Om kontrollsentert for BRT-løsninger

Utfordringer ved valg av referanseprosjekter

Prosjektets omfang gjør at det ikke er mulig å se på alle løsningene. Det ble derfor forslått å se nærmere på BRT-løsningen som går mellom Schiphol Airport og Haarlem i Amsterdam, samt metroløsningene i Paris og København. Bakgrunnen for utvalget var at transportsituasjonen skulle være overførbare til norske forhold med tanke på trafikalsituasjon, bystørrelse og transportkultur, og at løsningene derfor fortrinnsvis skulle befinne seg i Europa. I tillegg var det ønskelig fra Kolumbus AS sin side at Urbanet Analyse og Trivector ikke brukte de samme referanseprosjektene ettersom kartleggingen ville foregå omtrent parallelt. Trivector skulle se på tre referanseprosjekter fra Nederland (R-Net, HOV Utrecht og HOV Twente) og to fra Frankrike (Mettis i Metz og BusWay i Nantes). Det er også verdt å nevne at rammen for litteraturkartleggingen ble justert ned underveis. Bakgrunnen for det var nettopp det at det var vanskelig å etablere direktekontakt med relevante løsninger og å finne god litteratur (beskrives i påfølgende tekst), samt at oppdragsgiver ønsket å benytte rammene til å fremstille bussveien i matematiske termer. Det gjorde at omfanget av kartleggingen ble redusert underveis, og at teksten representerer «det som var funnet på daværende tidspunkt».

Det har vist seg at selv om det fins flere BRT-løsninger med kontrollrom, har litteraturkartleggingen funnet lite informasjon om utfordringsbildet de har stått ovenfor. Det gjelder også de valgte referanseprosjektene, noe som ble forespeilet allerede på oppstartmøte. Dersom man har funnet informasjon, har den gjerne skildret utfordringsbildet i generelle ordelag med noen eksempler herfra og derfra fremfor å gi en helhetlig gjengivelse av utfordringsbildet til de ulike løsningene. Det kan være fordi informasjonen er rettet mot trafikantene eller myndigheter (kundegruppa) som i) er mer interessert i tekniske forhold som «hvor fort går løsningen» eller «hvor mange kan den frakte» etc., og ii) gjør at man ønsker at BRT-løsningen som konsept skal fremstå i best mulig lys da dens suksess avhenger av lokale forhold. Det kan også hende at operatørene oppfatter trafikkavviklingsstrategiene sine som et konkurransefortrinn, og derfor ikke vil frigi det til offentligheten. Strategiene er også sterkt knyttet opp mot den lokale transportstrategien i området. I tillegg er det en trend at informasjonen om løsningene gjerne bare foreligger på morsmålet.

For å unngå de språklige utfordringene som oppstår i møte med for eksempel franske/nederlandske info-nettsider, har Urbanet Analyse forsøkt å opprette direktekontakt med de ulike løsningene via mail. Da vi ikke hørte noe innen rimelig tid ble det forsøkt å finne andre fullgode, løsninger der informasjonen har vært lettere tilgjengelig.

Valg av referanseprosjekter

Det ble da tatt utgangspunkt i løsningene som Ristesund, Frøyland og Simonsen i Statens vegvesen besøkte på sin studietur i 2015, og viss erfaringer er gjengitt i studierapport «Kollektivløsninger i Frankrike, Belgia og Nederland» (Ristesund, Frøyland og Simonsen, 2015). Studieturrapporten inneholder også en kontaktperson for følgende av løsningene de besøkte:

- «Mettis» i Metz, Frankrike (BRT-system)
- Kollektivnettverket av tog, regionale busser og bybusser i Sint-Niklaas, Belgia (en del av EU-prosjektet PROCEED)
- Maxx Almere i Almere, Nederland

Disse løsningene valgte Statens vegvesen fordi I) byene er relevante ut i fra norske problemstillinger både i antall innbyggere og transportmiddelfordeling. II) Byene er samlet innenfor et relativt lite geografisk område i tre land. III) Byene har utmerket seg med gode, høystandard kollektivtrafikk-løsninger (superbuss), rask planleggingstid og rask byggetid (Ristesund, Øystein, Frøyland og Simonsen, 2015).

Disse løsningene ble kontaktet via mail, men per 12. april 2018 hadde Urbanet Analyse bare fått positivt svar fra Almere i Nederland (Edgar Siemerink). Det er derfor dette referanseprosjektene man først og fremst har sett på, i tillegg til metroløsningen i København basert på informasjon tilgjengelig på nettet. I tillegg har man sett på en del rapporter som gir generelle beskrivelser av hvilke ytelsesindikatorer kollektivtransporten bør benytte ettersom man fant mer informasjon om dette.

5.2 BRT-løsning: Maxx Almere i Almere, Nederland

Beskrivelsen av løsningen i Almere baserer seg på informasjon mottatt på mail 09.03.18 fra Edgar Siemerink (prleradus@almere.nl) fra Bus public transport team Gemeente Almere. Mailen inneholdt blant annet et notat om BRT-løsningen, skrevet på engelsk av Edgar Siemerink, og følgende nederlandske dokumenter:

- ***Thermometer Concessies Stadsdienst Almere - en Almere Streek (2010-2016)***
Et dokument om bytjenester i Almere og Almere-regionen for 2010-2016 omtaler datainnsamling, informasjon for DRIS, for tidlig avgang, avreise- og ankomst punktlighet, overlevering av informasjon, driftsfeil, oppgaver og ansvar for å sikre sosial sikkerhet, klagehåndtering, årsplan og årsrapport, personell, informasjon om bussen og utstyr, levering av informasjon i bussene, holdeplassinformasjon, betjening av OV-chipkortutstyr, i tillegg til nøkkeltall om kundetilfredshet, transporttilbudet, serviceutførelse, sosial sikkerhet og finansiering. Informasjonen er på nederlandsk, men det er mulig å hente ut tall dersom det er av interesse (Gemeente Almere, 2017).
- ***Mobilitetsplanen til Almere (2012), del 1-2***
Mobilitetsplanen til Almere er todelt. Den første delen inneholder hvilke politiske valg som er gjort med tilhørende forklaring og mål, mens del to dekker den underliggende

informasjonen som de politiske valgene er basert på (mer teknisk) (Gemeente Almere, 2012a, 2012b). Denne delen oppsummerer derfor den eksisterende mobilitetspolitikk og gir en analyse av de ulike delene det eksisterende trafikksystemet består av (Gemeente Almere, 2012a, 2012b).

Informasjonen om løsningen i Almere er hentet fra disse dokumentene så godt det lot seg gjøre med tanke på de språklige utfordringene.

Reisevaner i Almere, Nederland

Reisemiddelfordelingen i Almere er atypisk ved at det er høy bilbruk på lokale reiser, samtidig som de velger kollektivtransport oftere enn andre steder. Den offentlige transporten har vært det strukturelle elementet for byutviklingen i Almere som er bygget rundt Flevolijn. Den skaper gode forbindelser til og fra togstasjoner, bysentrum kjøpesentre og andre fasiliteter. Det påpekes likevel at kapasiteten til systemet må økes for å håndtere fremtidig befolkningsvekst. Det er forventet at byområdet vil øke med 60.000 boliger og 100.000 arbeidsplasser, men det skal håndteres slik at det ikke vil ha noen negative effekter på det eksisterende byområdet. I sentrum av Almere fungerer den offentlige transporten godt med høye reisetall og relativt lave statlige bidrag (Gemeente Almere, 2012b).

De regionale busslinjene transporterer ca. 8000 passasjerer per dag over Holland Bridge dvs. færre passasjerer enn toget. Bussen har likevel en viktig rolle ettersom det ikke er en togstasjon ved for eksempel Almere Haven, og det er vanskelig å reise Almere - Amsterdam – Zuidoost og Amsterdam – Amstel med tog. I tillegg blir busslinjer til Zeewolde og Hilversum stadig viktigere (Gemeente Almere, 2012b).

Kort om BRT-løsningen

Max Almere i Almere i Nederland består av 60 km bussveg i tillegg til separate sykkelvei da det ble utformet som et separat trafikksystem fra starten. Det er gratis å benytte busseveien i byen Almere. Bussen har prioritet i kryss. Det gjøres ved hjelp av planskilte krysninger med hovedstrømmene, og signalprioritering gjennom de mange krysningene med øvrige veier og gang- og sykkelveier. Selv om prioriteringen av bussen påvirker de øvrige transportmidlene til en viss grad, reduseres ikke fremkommeligheten for biltrafikken ettersom hovedstrømmene ikke krysses med bussveien (Siemerink, 2018).

Signalreguleringen forsøker å opprettholde kjøretøyets hastighet dvs. fartsgrensehastigheten på 45 km/t, for å opprettholde en uforstyrret kjørebane for bussen. Signalprioriteringen skjer ved at alle bussene er utstyrt med kortbølge-radio (KAR, «korteafstandsradio») som kommuniserer posisjonen til trafikkontrollsystemet. Før selve krysningepunktet passerer et annet trafikksignal som informerer bussjåføren om det vil bli gitt grønt lys i krysset. Det gjør at bussen kan holde en kontinuerlig hastighet gjennom krysset uten avbrudd, i nesten alle tilfeller. Punktligheten til bussen, dvs. at bussen skal ankomme innenfor 120 sekunder av rutetabellen, er derfor på ca. 80 prosent. Holdeplassene er for øvrig lokalisert etter krysset og hensyn til signalprioriteringen, og har god tilgjengelighet gjennom anleggelse av gang- og sykkelveg til nesten alle holdeplassene (Siemerink, 2018).

KPI-parametere

I Almere brukes følgende ytelsesindikatorer for å vurdere BRT-systemet (Siemerink, 2018):

- I hvilken grad korrekt informasjon er gitt til skjermene ved holdeplassene (i prosent av reiser og stopp)
- Hvor stor andel av bussene som går for tidlig fra busstasjonen eller byttepunkt
- Hvor stor andel av bussene som går for sent fra busstasjonen eller byttepunkt
- Hvor stor andel av bussene som kommer for sent til byttepunkt eller endestasjon
- Andel av turer- og driftstid som innstilles
- Kundene/passasjerene sin generelle vurdering og vurdering av sosial sikkerhet (årlig)
- Antall klager og tidspunkt for håndtering
- Antall passasjerer og passasjer kilometer
- Antall ubehagelige hendelser om bord («sosial trygghet»)
- Bussbelegg, antall fulle busser og prosentvis avgiftstanking

Mobilitetsplanen til Almere

Viktigheten av bussens hastighet er ytterligere presisert i mobilitetsplanen til Almere (2012) der det står at kvaliteten på den offentlige transporten for de reisende handler om kortest mulig reisetid (ønsker at maksimal reisetid med bussen fra utkanten til sentrum skal være 25 minutter) og høy pålitelighet, noe som står og faller på bussenes hastighet. Det betyr:

- Kort kjøretid (ettersom folk ønsker å forflytte seg fra A til B så fort som mulig) ved i størst mulig grad utforme kortest og strakest mulig rute med så høy hastighet som mulig.
- Minimere ventetid på stopp (da den oppleves veldig negativ for de reisende) ved å tilby høy frekvens.
- Begrense antall bytter (som gjerne betyr ekstra ventetid ved et stopp, i tillegg til å oppleves som en generell irritasjon for den reisende) gjennom å tilby lange, direktelinjer.
- Tilby pålitelig ruteplan (sånn at den reisende kan stole på at bussen går til planlagt tid).
- Kortest mulig tilbringertid ved å tilrettelegge for at den reisende kommer raskest mulig til holdeplass (ettersom viljen til å benytte kollektivtransport reduseres så fort det tar mer enn 15 minutter å gå/sykle til holdeplass).

For å realisere dette har man gitt bussen dedikert infrastruktur sånn at den kan opprettholde høy hastighet, for eksempel ved at den kan holde 50 km/t i et område biltrafikken må holde 30 km/t, og sørget for at holdeplassavstanden er forholdsvis lang (400-800 meter). I tillegg har man lagt restriksjoner på arealbruken ved at i utgangspunktet må 90 prosent av husene og 75 prosent av arbeidsplanene realiseres innen 400 meter fra bussholdeplassen, samt at man ønsker at kjøpesentre og viktige fasiliteter innen helse og utdanning legges i sentrale nabolag nær bussholdeplassene (Gemeente Almere, 2012b). Oppsummert i målsetningen står det dermed at et av målene for offentlige transport er at den skal ha høyest mulig kvalitet for reiser i byområdet. Det skal oppnås gjennom høyest mulig hastighet på bussen (45 km/t) ettersom det vil gi korte kjøretider, høy frekvens, høy pålitelighet og billig utnyttelse av

offentlig transport. Det innebærer at bussveien skal være reservert for offentlig transport og beredskapstjenester. I tillegg må man sørge for at bussholdeplassene har tilstrekkelig kvalitet og kapasitet (Gemeente Almere, 2012b).

Utfordringer referanseprosjektet har stått ovenfor

En av utfordringene som påpekes ved bussvegen er at den oppleves som en barriere, og at den ikke er like fin overalt, for eksempel ved å redusere det estetiske inntrykket av parker og grøntområdet. Det er derfor et mål å få til en bedre integrering av bussinfrastruktur i både eksisterende og nye byområder, og man må redusere følelsen av bussveien som en barriere. Det innebærer at skjerming av bussvegen bare skal skje av trafiksikkerhetsmessige årsaker (Gemeente Almere, 2012b). Avveining mellom fremkommelighet for bussen og tilgjengelighet for andre reisende, kan bli en utfordring i Stavanger. Eventuelle utfordringer knyttet til en trafikkleder er ikke omtalt.

5.3 T-baneløsning: København Metro

Bussvegen i Stavanger planlegges etter BRT-prinsippene der grunntanken er «*tenk bane, kjør buss*», i tillegg til at det åpnes opp for at løsningen på sikt kan bygges ut til en baneløsning. Det gjør det aktuelt å ha metroen i København som et referanseprosjekt. Samtidig er det verdt å nevne at det er noen vesensforskjeller ved det å kjøre buss og baneløsninger, og delkapittelet innledes derfor med dette.

Vesensforskjell på buss og bane

Baneløsninger er gjerne et lukket system

Baneløsninger er gjerne et lukket system dvs. adskilt fra omgivelsene, mens et buss-system er et åpent system som må forholde seg til omgivelsene på godt og vondt.

- **Bane skjermet fra ytre faktorer, mens bussen forstyrres av dem**
En baneløsning har adskilt infrastruktur som gjør den skjermet fra potensielle forstyrrelser fra ytre faktorer, i motsetning til bussen som kan bli hindret av lyskryss og øvrig trafikk som andre kjøretøy og gående/syklende. Adskilt infrastruktur gjør at baneløsninger kan holde høyere hastighet og dermed ha kortere reisetid enn andre kollektive driftsmidler.
- **Bane sårbar for indre faktorer, mens bussens fleksibilitet gir omkjøringsmulighet**
Et tog kan gjerne bare terminere dvs. avslutte ruta si der det er planlagt og muligens ved enkelte, utvalgte stasjoner. Årsaken til det er at toget går i lukket infrastruktur med begrensede avkjørings- og forbikjøringsmuligheter. En baneløsning kommer ikke unna dersom ev. det skjer noe på selve infrastrukturen (forstyrrelser fra indre faktorer). En buss kan derimot «terminere hvor som helst», i hvert fall sammenlignet med en baneløsning. Infrastrukturens utforming gir en fleksibilitet som gjør at den kan kjøre forbi andre busser og også benytte alternativ infrastruktur til å komme frem til ønsket målpunkt dersom noe skulle inntreffe.

En har likevel noen unntak som for eksempel trikken i Oslo som er en mer åpen løsning ettersom den må forholde seg til alle øvrige trafikantgrupper, og Bybanen i Bergen som kan ansees som en semi-lukket løsning som må forholde seg til øvrig trafikk i enkelte krysningspunkt. Den nye bussveien kan ansees som en slik semi-lukket løsning ettersom den skal gå i egen trasé på 90 prosent av strekningen. Den vil likevel ha mer til felles med en åpen løsning ettersom den må ta hensyn til gående/syklende, lyskryss etc., og den kan i større grad enn baneløsningen benytte alternativ infrastruktur.

Signalanlegget ivaretar sikkerheten for baneløsninger

Det er bussjåføren som sørger for at bussen kommer trygt fra A til B, f.eks. ved å sørge for stor nok avstand til øvrige kjøretøy og overholde trafikkregler. For baneløsninger ivaretas dette i enda større grad av et signalanlegg. Hensikten med signalanlegget er foruten å trygge togfremføringen (sørge for at vognene ikke krasjer i hverandre), og få togene punktlig og raskest mulig frem, og sørge for maksimal kapasitetsutnyttelse (Jernbaneverket, 2012). Det gjør at type signalanlegg, sammen med antall spor, er bestemmende for hvor mange tog som kan kjøre på en gitt banestrekning. Signalanlegget kan f.eks.:

- **Benytte faste blokkstrekninger**

Faste blokkstrekninger innebærer at det bare kan være ett tog på sporstrekningen mellom to stasjoner av gangen. Dette er f.eks. tilfelle for t-banen i Oslo (signalteknologien fra 1966), og det påvirker spesielt den praktiske kapasiteten¹⁶ gjennom Fellestunnelen, den 4,8 km lange delen av nettverket som trafikkeres av alle T-banelinjene fra Majorstuen stasjon i vest til Helsestasjon i øst som i dag er bestemmende for antallet tog på metronettet i Oslo. Denne tunnelen bestemmer dermed også kapasitet, frekvens og utviklingen av tilbudet i forstedene. I 2016 var den praktiske kapasiteten til systemet 28 tog per time (Ruter 2011b), dvs. at det på fellesstrekningen passerer et tog hver 2,1. minutt.

- **Være helautomatisert**

Et helautomatisert signalanlegg lar togene kjøre trygt selv om det er kortere intervaller mellom togene. Det øker kapasiteten til systemet og gir bedre frekvens til de reisende. Både t-banen i København og Paris er helautomatisert sånn at man kan operere med en minimumsfrekvens mellom togene på 85 sekunder. Dersom man hadde lagt samme frekvens til grunn i Oslo, ville det til sammenligning gitt en kapasitet på 42 tog/time.

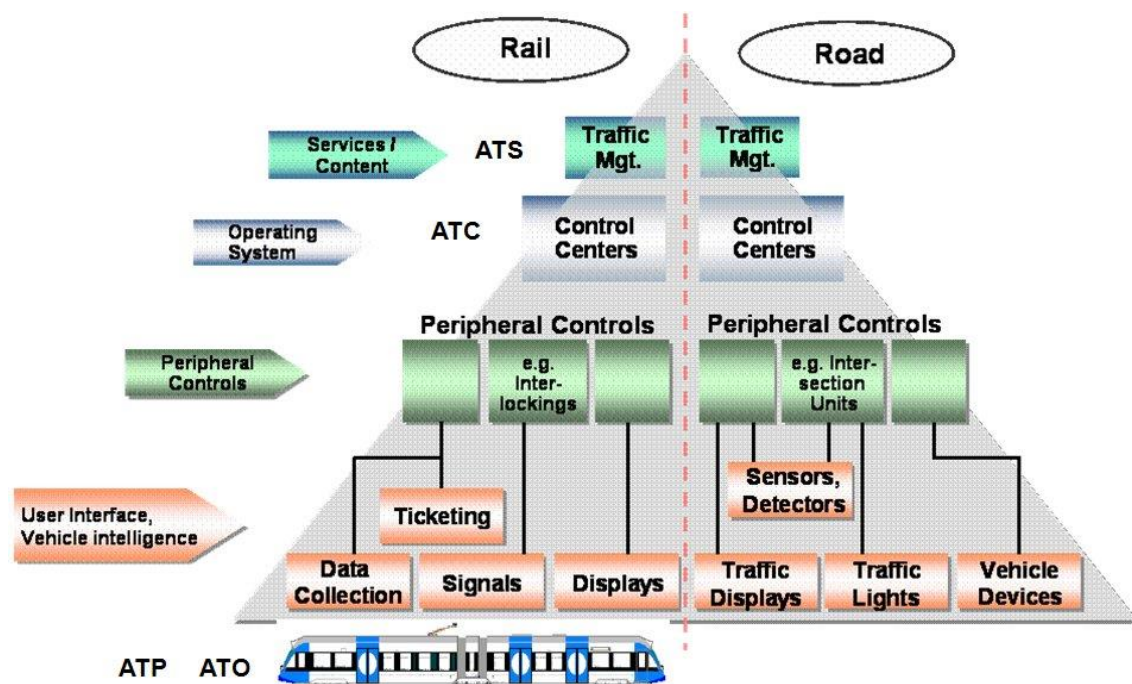
T-banen i København opererer likevel med en frekvens på hvert 2. minutt fremfor 85 sekunder. Det er fordi desto høyere oppunder den praktiske banekapasiteten man opererer, desto mer slår det inn på punktligheten. Det er fordi frekvensen inneholder et slags slingringsmonn i tilfelle noe tar lengre tid enn planlagt, f.eks. opphold på holdeplass. For buss legges det også inn et slags slingringsmonn ved at den oppgitte tiden i rutetabellen mellom to holdeplasser, gjerne er litt høyere enn den faktiske kjøretiden. Ruter med høy frekvens går gjerne på

¹⁶ Den praktiske kapasiteten kan økes noe, men det vil gå utover punktligheten som systemet allerede sliter med. Det antas at hvert 6-vognstog har en praktisk kjøretøyskapasitet på 600 personer (Ruter AS, 2011; Jernbaneverket, 2012).

strekninger der trafikantene foretar forholdsvis korte reiser. Mye «slark» i rutetabellen vil dermed utgjøre en stor prosentvis andel av den totale reisetiden. Det legges derfor gjerne inn på ruter der frekvensen er lavere enn hvert 30. minutt, noe som f.eks. er tilfelle for en del togruter.

Ulike elementer som inngår i kontrollsentret

Figuren under illustrerer forskjeller og likheter på det som inngår som en del av kontrollsentret for BRT- og baneløsninger. Deretter gjøres det ytterligere rede for referanseprosjektet København Metro.



Figur 5.1. Sammenfallende egenskaper ved trafikkstyring av BRT- og baneløsninger¹⁷

Om København Metro

Byggingen av København Metro ble startet i 1994, og første fase med et 11 km langt eget metronettverk og to metrolinjer ble åpnet i oktober 2002. Hensikten med byggingen var blant annet var å øke markedandelen for kollektivtransport (Vuk, 2005). Teknisk informasjon om løsningen er gjengitt i Tabell 5.1 etterfulgt av en figur med kart over metrolinjene.

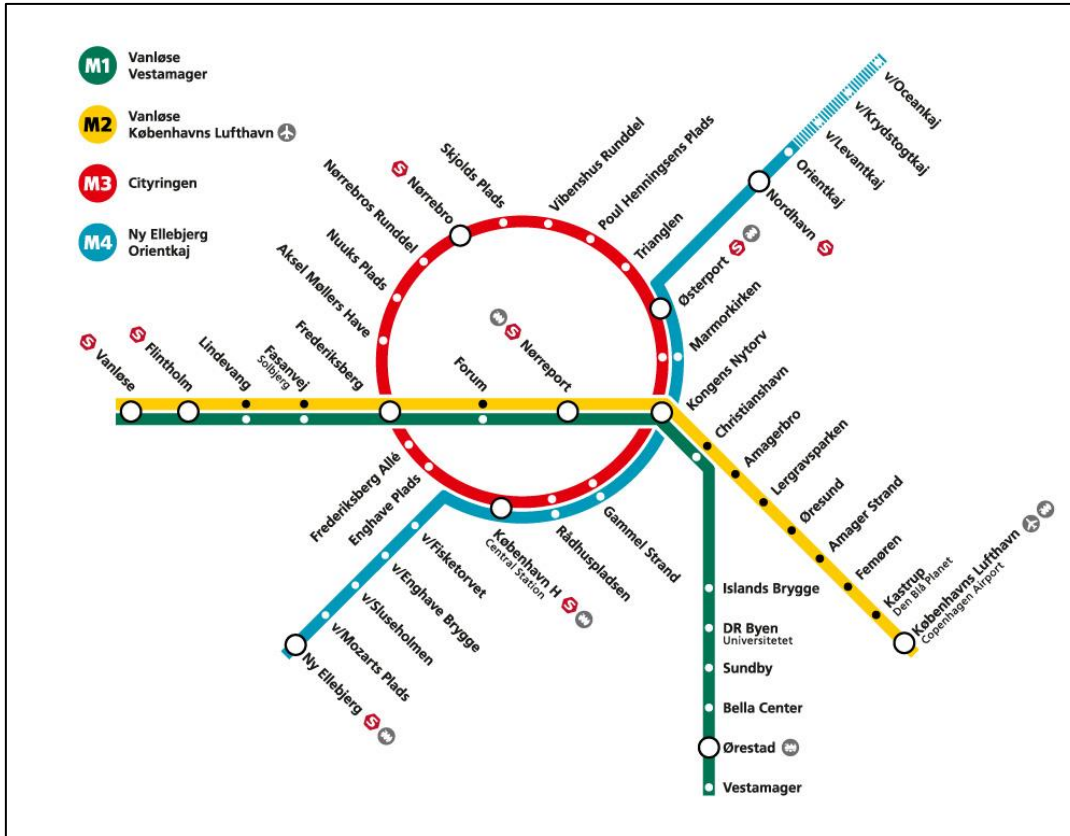
¹⁷ Figuren er hentet fra nettsiden: <http://www.gumuskaya.com/research/railwaysignalling/BigPicture-ITS.jpg>

Tabell 5.1 Oversikt over tekniske forhold ved København Metro (Metroselskabet, no date a, no date c).

Fakta	
Lokasjon	København, Danmark
Aktør/tilbyder	Metroselskabet ¹⁸
Åpningsår	2012
Infrastruktur	
Lengde¹⁹	22 km lang (hvorav halvparten ligger under bakken)
Antall stasjoner	22 stasjoner (9 underjordiske og 13 stasjoner over bakken)
Hastighet	Gjennomsnittshastighet gjennom byen: 40 km/t Topp hastighet: 80 km/t
Kjøretøyegenskaper	
Togstørrelse	Lengde: 39 m, bredde: 2,65 meter
Togutforming	Hvert tog har 6 vide dører (med sikker dørautomatisering) og fri tilgang mellom togene. Vognene har et innvendig design som skal gjøre det enkelt å rengjøre og å kunne benytte med barnevogn/rullestol/sykkel («flex zone»). Det er montert kameraer i alle vognene slik at kontrollrompersonalet kan se utvalgte områder av toget av sikkerhetshensyn. Hver vogn har dessuten to elektroniske skilt med informasjon om tid, neste stasjon, buss- og togforbindelser og andre relevante meldinger. De har også vanlige skilt med rutekart og overføringsindikasjoner
Togkapasitet	300 personer (96 sitteplasser og 204 ståplasser)
Vognpark	34 tog á 3 vogner (antall tog som betjener linjene)
Tilbud	
Dagens frekvens	4 minutter (på M1 og M2 sine dedikerte linjer dvs. 2 minutters frekvens på fellesdelen av linja) Hvert 2. minutt i rush
Mulig frekvens:	85 sekunder mellom togene (med dagens driftssystem)
Driftsdøgn:	24/7
Passasjergrunnlag:	Ca. 180 000 daglige reiser

¹⁸ Et partnerskap mellom København kommune (50 %), den danske regjeringen (41,7%) og Frederiksberg (8,3%). Metro Service A/S står for drift og vedlikehold.

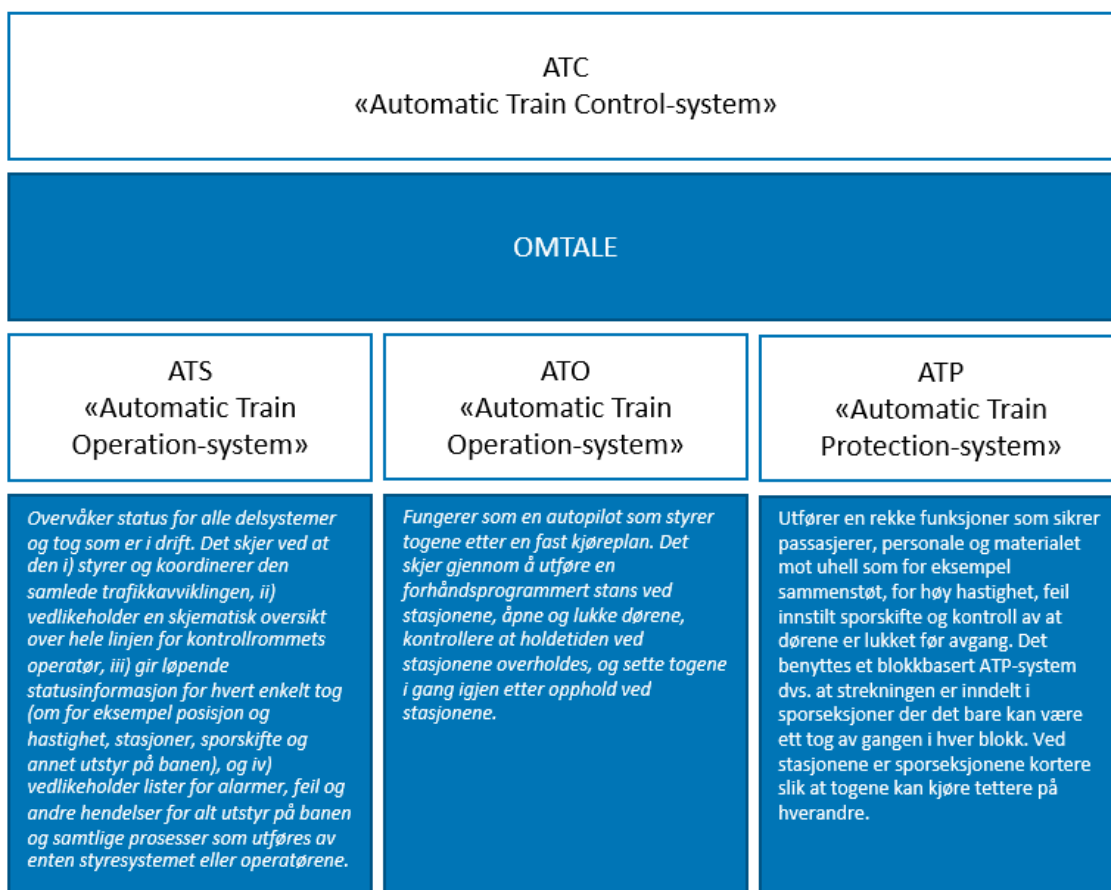
¹⁹ I juli 2019 vil den helt nye sirkellinjen, Cityringen, åpne under sentrum av København, Vesterbro og Frederiksberg. Den vil gå som en 15,5 km lang underjordisk t-banelinje med 17 undergrunnsstasjoner. Deretter vil man starte arbeidet med å utvide linjen med to stasjoner i Nordhavn slik at de kan være i drift fra begynnelsen av 2020. I 2023 planlegges så Sydhavnforlengelsen å være ferdig med fem ekstra tunnelbanestasjoner (Metroselskabet, no date b).



Figur 5.2.: Oversigtsbilde over København Metro med dagens og planlagte linjer (Metroselskabet, no date a)

Om kontrollsystemet

København Metro er førerløs med fullautomatisk drift gjennom det såkalte ATC-system («Automatic Train Control-system») driftes fra en datamaskin i Ørestad. ATC-systemet består av de tre delsystemene ATS, ATO og ATP som er nærmere beskrevet på Figur . Sikkerhetssystemet overvåker driften og griper inn dersom det skulle skje en feil, men det er likevel alltid en kontrollperson tilstede som kan ta over dersom noe skulle skje (Metroselskapet, u.d.).



Figur 5.3. Hvilke delsystemer ATC-systemet består av (Metroselskapet, u.d.).

Strategier og regler for trafikkregulering som benyttes

Metroen i København følger en forhåndsdefinert timetabell som blir automatisk korrigerert av det «the Automatic Train Supervision system» når det er nødvendig for å sørge for at t-banen går etter ruta. I 2012 innførte Metro Service i København et «Quality Management System» i henhold til ISO 9001:2008.

- **Punktlighet måles ved hjelp av terskelverdi**

København Metro omtaler punktlighet som «service tilgjengelighet», og det måles ved t-banens «faktiske avgang» versus «planlagt avgang». I 2014 var gjennomsnittlig servicetilgjengelighet 98,7 prosent, mens i 2016 var driftsstabilitet på 99,2 prosent (Metroselskapet, Metro Service 2014).

De ansatte ved kontrollrommet er opplært til å håndtere avbrudd eller avvik i tidsplanen. Vesentlige forstyrrelser håndteres ved hjelp av forhåndsdefinerte prosedyrer og instruksjoner og anvendelse av beredskapsplaner, for eksempel implementering av alternative ruter, innføring av ekstra tog, alternativ transport, passasjerinformasjon etc. Alternativ transport leveres av en bussoperatør. Skiltene som viser veien til bussene er plassert på stasjonene.

Årsrapporten til Metroselskapet for 2015 omtaler passasjerantallet, driftsresultatet (før av- og nedskrivninger) og driftsstabilitet som «financial highlights». I sin kortfattede oppsummering

av året redegjøres det også for billettinntekt, prosentvis antall avganger som gikk til tiden, og hvilke investeringer som er gjort både med tanke på infrastruktur og togsett. I tillegg omtaler årsrapporten hvordan man vil kunne øke kapasiteten gjennom nye plattformer (flere dører kan benyttes), hvilken billettype som gjerne benyttes og teknisk løsning, en del funn fra gjennomførte spørreundersøkelser og hvor fornøyde passasjerene er med tjenesten (Copenhagen Metro Service, 2016).

5.4 Pålitelighet og tilgjengelighet er viktige ytelsesindikatorer

Selv om ikke det fantes så mye litteratur som ga en helhetlig gjengivelse av referanseprosjektenes utfordringsbilde, er det gjort flere overordnede studier på hvilke ytelsesindikatorer som vil være hensiktsmessig å benytte for kollektivtransport og for trafikkstyring. Studiene baserer seg på innsamling av et stort datamateriale fra flere studier, og har vurdert i hvilken grad de fungerer som ytelsesindikatorer på ulike måter. Selv om det ikke er knyttet opp til en spesifikk løsning, gir det en validering på om de valgte ytelsesparameterne er gode parametere. De ulike rapportene bekrefter at det er særlig mål på pålitelighet (forsinkelse) og mobilitet/tilgjengelighet som er viktig, i tillegg til kapasitetsutnyttelse, ventetid og bussens hastighet. Hvordan de ulike studiene har undersøkt ytelsesparameterne, hva de anser som viktig, og hvordan de bør måles er oppsummert i den påfølgende teksten.

Mobilitet og pålitelighet er viktig ytelsesindikator for trafikkstyring og ITS

Rapporten «Key Performance Indicators for traffic management and intelligent Transport systems» definerer et felles rammeverk for ytelsen til trafikkstyring og ITS i form av KPI-parametere, i tillegg til retningslinjer for hvordan de skal benyttes (Kaparias og Bell, 2011). Ytelsesindikatorne er valgt for at man skal (i) kunne benytte eksisterende data, i tillegg til at det skal være kvantifiserbart og relevant for den respektive indikator, (ii) være lette å bruke og forstå, (iii) kunne benyttes av alle typer byer selv om de har ulike demografiske applikasjonsnivåer (segment, vei, område, nettverk), og (iv) kunne svare på politiske prioriteringer. Rapporten ser først og fremst på følgende fire strategiske hovedtema for bytransportstyring og ITS: trafikkeffektivitet, trafiksikkerhet, utslippsreduksjon og samfunnsinkludering og arealbruk (Kaparias og Bell, 2011). Hvilke elementer disse måles på er vist i påfølgende tabell.

Tabell 5.2 Oversikt over KPI-parametere for trafikkstyring og ITS (The CONDUITS European project, 2013)

Rammeverket for ytelsesparameterne (KPI)			
Trafikkeffektivitet	Trafiksikkerhet	Samfunnsinkludering og arealbruk	Utslippsreduksjon

13 Elektriske kjøretøy
12 Motorkjøretøy
11 Total dekket areal (funksjon av transportvekst)
10 Grad av universell utforming
9 Tilgjengelighet
8 «Car-to-infrastructure (C2I)»
7 Indirekte effekter av ulike trafikkstyringssystemer og ITS
6 Direkte effekter av ulike trafikkstyringssystemer og ITS
5 Ulykker (faktisk antall)
4 Mobilitet
3 Pålitelighet
2 Driftseffektivitet
1 Systemtilstand (fysisk utforming og tilstand)

På det nivået som trafikklederen skal operere på, vil det være indikatorene under trafikkeffektivitet som vil være mest aktuelle, og da særlig pålitelighet og mobilitet:

- **Mobilitet**

Mobilitet måles på reisetid for å si noe om tilgjengeligheten dvs. hvor enkel tilgang det er mellom ulike destinasjoner (OD-par). Som eksempler for mål på mobilitet nevnes gjennomsnittlig reisetid til relevante målpunkt, ruteproduksjon (rute-km / sete-km / passasjer-km), gjennomsnittlig avstand og byttetid mellom transportmidler, hvor lang tid man bruker på å komme seg til kollektivtilbudet, reisemiddelfordeling etc.

- **Pålitelighet**

Pålitelighet måles på forsinkelse, både når og hvor det oppstår, samt varighet for å beskrive hvor mobilt transportsystemet er. Hvordan dette skal måles vil avhenge av hvor kompleks det må være med tanke på hva det skal brukes til, og hvor mye datainnsamlingen kan koste.

Hvor mobilt og pålitelig et system kan bli, avhenger dessuten av tilstanden til systemet (f.eks. med tanke på dekketilstand eller mengden jernbanespor) som helhet. Det er dette «systemtilstand» tar hensyn til, og den komplementerer derfor de to andre. Rapporten oppgir også hvordan de ulike indikatorene kan kalkuleres ved hjelp av matematiske formler.

Reisetid og kapasitetsutnyttelse sentralt i kartlegging av veg-ITS i EU

Hensikten med studien «Key Performance Indicators for Intelligent Transport Systems» var å finne et felles sett av ytelsesindikatorer for før-/etter-implementering av veg-ITS for EU med tilhørende retningslinjer på hvordan de bør benyttes, presenteres og rapporteres. Studien

kartla 228 ulike ytelsesindikatorer relatert til ITS som er i bruk i EU i dag, hvorav Norge sies å benytte 8 ytelsesindikatorer. Kartleggingen viste store variasjoner i hvilke ytelsesindikatorer de ulike EU-landene benyttet, noe som gjør det utfordrende å etablere EU-universelle ytelsesindikatorer. I tillegg var indikatorene av varierende kvalitet og mange var uegnet som ytelsesindikatorer (Payne, 2015). En gjennomgang av «State of the Art» og et spørreskjema til interessenter reduserte antall til 38 ytelsesindikatorer, mens workshop med et ITS-ekspertpanel reduserte antallet ytterligere. Rapporten foreslår derfor en kortliste med 15 ytelsesindikatorer hvorav 7 relaterte seg til selve implementeringen av ITS, mens 8 fanger opp effekten (nytteverdien) ved å implementere ITS. Disse er gjengitt i tabellen under. Eksempler på faktorer som knytter seg til selve implementeringen er antall og prosent av kollektivtransport holdeplasser med dynamisk reiseinformasjon, og antall og prosent av de signalkontrollerte kryssene som benytter ITS. Det som er mest relevant med tanke på en trafikkleder er derimot de faktorene som knyttes opp mot nytteverdien. Herunder anbefales følgende ytelsesindikatorer:

- Prosentvis endring i reisetid i rush langs ruter der ITS er implementert
- Prosentvis endring i trafikkmengde i rush langs ruter der ITS er implementert
- Prosentvis endring i hvor mye reisetiden varierer på ruter der ITS har blitt implementert (målt ved variasjonskoeffisient)
- Prosentvis endring i reisemiddelfordeling på korridorer hvor ITS er implementert
- Prosentvis endring i antall rapporterte ulykker langs ruter der ITS er gjennomført (gjerne rapportert på alvorlighetsgrad)
- Prosentvis endring i årlige CO₂-utslipp (tonn) på ruter der ITS er gjennomført.
- Tiden det tar fra oppstart av nødtelefonsamtale til presentasjon av innholdet av en gitt melding («MSD») er skrevet ned på en forståelig måte hos operatøren ved alarmsentralen

Rapporten gjør SWOT-analyser på de ulike indikatorene dvs. hvilke styrker, svakheter, muligheter og utfordringer de innebærer. Som svakheter for endring i reisetid i rush nevnes at det kan kreve innsamling av ekstra data for eksempel dersom det ikke fins data på dagens reisetider. Det nevnes også som utfordring at det er andre ting som kan påvirke reisetiden (og forsinkelse) for eksempel trafikkvekst, noe som kan forstyrre målingen av ITS sin betydning. Ytelsesindikatoren styrke er at datainnsamlingen kan skje ved foreliggende metoder og er forholdsvis enkel å kvantifisere.

Pålitelighet og tilgjengelighet som mål på politiske målsetninger

«*Measuring Public Transport Performance. Lessons for Developing Cities*» fokuserer i stor grad på ytelsesindikatorer som et navigasjonsinstrument for myndigheter (fylkeskommunen) og politikere. De skal gjøre det lettere å indentifisere problemer og skape optimale løsninger, samt følge opp strategiske planer over tid. Ytelsesindikatorer foreslås å måle for eksempel tilgjengelighet, grad av tilgang, pålitelighet, reisemiddelfordeling, trygghet og trafikksikkerhet, og miljømessige effekter. Rapporten nevner også noen operasjonelle ytelsesindikatorer for kollektivtransporten (inntekt pr. km, antall busser som er satt ute av drift etc.), men da med tanke på hvor godt systemet presterer økonomisk og teknisk (Dhingra, 2012). I vedlegg gir den dessuten en oppsummering av hvordan ulike konkrete løsninger måler de forskjellige

ytelsesindikatorene, for eksempel Singapore og Sydney, Australia. Tabellene til Dhingra (2012) med utførlig informasjon om løsningene er gjengitt i vedlegg, mens ytelsesindikatorene de benytter er omtalt under.

Singapore: Pålitelighet og tilgjengelighet

Dhingra (2012) skriver at Singapore har ulike ytelsesindikatorer for buss og baneløsninger, samt noen som benyttes for begge transportformene. Pålitelighet er en viktig indikator for både buss og bane dvs. hvor stor de påfølgende avstanden mellom bussene er, antall innstilte busser, faktisk og planlagt avgang på hver rute. For buss benyttes også antall påstigende passasjerer i rush, samt tilbudets tilgjengelighet belyses gjennom dekningsgraden til tilbudet (måles gjennom antall bytter og ved å se på hvor mye areal med boligområder/arbeidsplasser som dekkes med en avstand på 400 meter til tilbudet) og driftsdøgn (maks frekvens og antall driftstimer). Andre forhold som måles er i hvilken grad buss- og togtilbudet er integrert, hva slags passasjerinformasjon som tilbys (både før og under reisen) og ulykkerater som mål på trafiksikkerheten til systemet. For baneløsninger måles servicekvaliteten på punktlighet («on-time performance»), togenes tilgjengelighet, antall påstigende passasjerer (kapasitetsutnyttelse), avstanden mellom togene (frekvens), hvor ofte det er brudd i servicetilbudet og hvor alvorlig hendelsen er.

Sydney, Australia: Pålitelighet

Ytelsesindikatorene som benyttes i Sydney, Australia er sterkt knyttet opp mot de politiske målsetningene for transportsystemet. Det gjør at detaljeringsgraden samt i hvilken grad de benytter kvantifiserbare eller kvalitative mål avhenger av hva de ønsker å oppnå. Hovedtemaene for ytelsesindikatorene er i hvilken grad det er introdusert nye og innovative tilbud, tilgjengelighets- og bekvemmelighetsnivå (måles blant annet på antall prosent av befolkningen som bor 400-800 meter fra en bussholdeplass), pålitelighet, trafiksikkerhet og trygghet for passasjerene, komfort, reiseinformasjon til passasjerene, personelloplæring og i hvilken grad de har lyktes med å tilby et kostnadseffektivt tilbud til en rimelig penge (måles blant annet på gjennomsnittlig driftskostnad per passasjerreise for buss). Dhingra (2012) sin tabell for Sydney er gjengitt i vedlegg om man ønsker å se nærmere på hvilke mål de ulike hovedtemaene omfatter. Av de oppgitte indikatorene er det bare de for pålitelighet som ansees som relevant på et operasjonelt nivå. Pålitelighet måles for eksempel på i hvilken grad de går når de skal (mål om 95 prosent) dvs. at forsinkelsen ikke er større enn 5 minutter i normal trafikk, noe som for buss måles ved stasjonen og ved et midtpunkt langs ruten, og andelen for tidlige avganger (mål om 0 prosent). I tillegg ser man på antall mekaniske feil som kunne vært unngått gjennom vanlig vedlikehold, og antall busser som trenger å skiftes ut per 100 000 km (mål om 98 prosent pålitelighet for teknisk feil).

5.5 Viktige aspekter for bussveien i Stavanger

Det er store variasjoner i hvilke ytelsesindikatorer de ulike EU-landene benytter for ITS i dag, og de er også varierende kvalitet da mange faktisk er uegnet som ytelsesindikatorer (Payne, 2015). Det kan skyldes at de benyttes til å måle forhold som er viktig lokalt. Dhingra (2012) påpeker for eksempel at det er et viktig navigasjonsinstrument for myndigheter og politikere

da det skal gjøre det lettere å indentifisere problemer og skape optimale løsninger, samt følge opp strategiske planer over tid. Det gjør det utfordrende å gjøre «tommelfinger-sammenligninger» uten å kjenne de lokale forholdene og forutsetningene for den gitte kollektivløsningen. Det er fordi en god kollektivløsning er utformet på en måte som er mest mulig hensiktsmessig med tanke på nettopp de lokale forhold som for eksempel politiske målsetninger, målpunktlokasjoner og markedssegment. Løsningen i Almere viser hvordan ytelsesparameterne henger sammen med de politiske målsetningene, mens metroløsningen i København er utformet med tanke på det trafikkgrunnlaget som er i området. Løsningen vil for eksempel ha langt flere målpunkt underveis, et større trafikkgrunnlag og også flere kundesegmenter underveis for eksempel flyplassreiser som har en annen verdsetting enn for eksempel arbeidsreiser. Referanseprosjektene gir derfor innspill på hvilke ytelsesparametere som er viktig for folk, men akkurat hvor viktig de er vil avhenge av lokale forhold i Stavanger. Det er derfor viktig å utforme nivået på løsningen på en måte som er forankret i politiske målsetninger, og samtidig passer Stavangers trafikkgrunnlag og kundesegment. Kaparias og Bell (2011) sier for eksempel at det er viktig at ytelsesindikatorer svarer på politiske prioriteringer. Det er viktig fordi hvordan de ulike bestanddelene av reisen vektet, vil i stor grad påvirke hvilken strategi som anbefales.

DEL 2: METODE



Foto: Elisabeth Tønnesen

6 Metodedel A: Modellering av bussvegsystemet

I de foregående kapitlene har vi diskutert hvordan vi måler og forbedrer trafikantopplevelsen. Dette kapitlet er det første av to som viser hvordan vi går fra overordnede strategier praktisk implementering. I første steg (Metodedel A) ser vi på modeller som beskriver bussvegsystemet. I andre steg (Metodedel B), ser vi på hvordan strategiene kan implementeres ved hjelp av modellene i del A.

Dette kapitlet gjennomgår modellering av bussvegsystemet og setter formler som kan benyttes til å beregne reisetid mellom to holdeplasser. I de tilfellene hvor det eksisterer forskjellige metoder for beregning, vil vi presentere dette og drøfte styrker og svakheter. Kapitlet bygger på et litteratursøk og presenterer metodikk fra de mest oppdaterte kildene vi har klart å finne. I flere tilfeller eksisterer det enklere og mer komplekse fremgangsmåter.

For å vurdere hvilke av de ulike komponentene i reisetiden som bør modelleres, og hvordan de bør modelleres, gjennomfører vi en empirisk test som gir en anbefalt modell. Denne modellen vil ikke nødvendigvis benytte de mest kompliserte og nyeste bidragene fra litteraturen, men gir etter vår mening veldig gode resultater med lav grad av kompleksitet.

Som nevnt består reisetiden av ulike komponenter. De vi har undersøkt i denne rapporten er følgende:

- Tid ved holdeplass
- Tid i kjørebanelen
- Tid i lyskryss/rundkjøringer

Vi gjennomgår nå modellering av de enkelte delene, samt beregning av kapasitet som et tillegg.

6.1 Tid ved holdeplass

Tiden ved holdeplass er en viktig del av den totale reisetiden langs en busstrasé. Man kaller gjerne tidskomponenten «oppholdstid». Oppholdstid avhenger av en rekke variabler:

- Tid for av- og påstigning
- Tid for åpning og lukking av dører
- Tid for å finne ledig busslomme
- Tid for å kjøre ut fra busslommen

Hver av disse komponentene påvirker den totale oppholdstiden, men ikke alle er like relevante. I den påfølgende teksten er det sett bort ifra delen «tid for å kjøre ut fra

busslommen» ettersom det bare gjelder hvis det er kø på veien, slik at man venter på en ledig luke, og bussveien i stor grad vil gå i en separat trasé.

Tid for av- og påstigning

Modeller

Tid for av- og påstigning er trolig den største delen av oppholdstiden i de fleste tilfeller. Tidsbruken og modellene som benyttes avhenger i stor grad av bussenes fysiske utforming. Det vanligste er å skille mellom én eller flere dører og hvilke dører man kan benytte ettersom man stiger av eller går på.

Litteraturen innen transportanalyse inneholder en rekke modeller. Sun et. Al. (2014) oppsummerer de vanligste modellene, samt utvikler det som etter vårt syn «state of the art» innen modellering av tid brukt for av- og påstigning ved holdeplass. Vår gjennomgang bygger derfor i stor grad på denne artikkelen.

De aller fleste studier skiller mellom to hovedprinsipper for av- og påstigning:

- Sekvensiell påstigning: Alle dører benyttes samtidig av de som stiger av og på.
- Simultan påstigning: Enkeltdører en kun forbehold enten av- eller påstigning

De to prinsippene gir ulike funksjonsformer som beskriver den totale tidsbruken. For sekvensielle modeller, bruker man gjerne følgende uttrykk

$$T_{Sek} = p \times P + a \times A$$

Her er p tid per påstigende, P antall påstigende, a tid per avstigende og A antall avstigende. Simultan påstigning benytter vanligvis følgende formel:

$$T_{Sim} = \max(p \times P; a \times A)$$

Her styres totaltiden av hvilken dør som benyttes av flest passasjerer. Den underliggende antagelsen i begge modeller er at ingen passasjerer kan gå av og på samtidig i samme dør, eller at flere kan gå av eller på samme dør samtidig. Det vil si, dersom en passasjer er på vei til å gå om bord, men en annen passasjer skal gå av, må førstnevnte vente på sistnevnte. Videre, dersom to passasjerer ønsker å gå på, må den ene vente til den andre har gått på.



Figur 6.1. Typisk buss med sekvensiell påstigning.
Foto: Evenes buss AS



Figur 6.2. Typisk buss med simultan påstigning. Foto: Vestfold Fylkeskommune

Realiteten er trolig noe mer kompleks enn det modellene fanger opp. For eksempel vil en buss med doble dører, gjerne en typisk bybuss med lavt dekk, kunne gi plass til to passasjerer i bredden. Hvis man har tilgjengelig flere dører, går trolig av- og påstigningstiden noe ned. En modifisert utgave som tar hensyn hvordan antall dører kan påvirke tidsbruken kan være:

$$T_{Sek}(A, P; D) = \frac{1}{D} (p \times P + a \times A)$$

Hvor D er antall dører. Eksempelvis vil bussen i figur 5 ha $D = 1$, mens bussen i figur 4 opp mot $D = 4$, gitt at to passasjerer kan benytte hver hoveddør samtidig.

Valg av parametere

Valg av parametere er viktig for å gjenskape tiden brukt på opphold ved holdeplassen på en best mulig måte. Det finnes i hovedsak to metoder for å parametrisere modellene man benytter:

1. Anslag fra litteraturen
2. Egne estimeringer

Det finnes en rekke anslag på av- og påstigningstid fra litteraturen. Det anslås at den nyeste og mest omfattende analysen er Sun et. al. (2014). Her beregnes av- og påstigningstid basert på et stort datagrunnlag med APC-tellinger og reisekort-valideringer på 8 ulike busstyper²⁰. Fordelen med denne studien, er at den undersøker hvordan ulike bussløsninger påvirker av- og påstigningstiden. Denne studien er derfor lagt som et utgangspunkt for parametrisering.

Studien tester effekten på av- og påstigningstid gjennom fire variabler:

- Antall bevegelser (antall på/avstigninger)
- Hvorvidt bussen er en dobbeltdekker
- Hvorvidt bussen har en «step entrance»
- Trengsel (antall passasjerer dividert med bussens kapasitet)

I studien estimerer det modeller både for sekvensiell og simultan påstigning. For å holde gjennomgangen konsistent med modellene som er vist ovenfor, er begge modellene vist.

Sekvensiell modell

Modellen for sekvensiell påstigning er gitt ved følgende ligning:

$$T_B = (B - 1) \times b = (B - 1)(\beta_B + \beta_{BS} \times (B - 1) + \beta_D D + \beta_S S + \beta_T \text{Trengsel})$$

Hvor B er antall påstigende og b er tid per påstigning. Sistnevnte er styrt av en minimumstid for påstigning β_B , effekten av antall påstigninger på tiden per påstigning β_{BS} , effekten av dobbeltdekker β_D , effekten av «step entrance» β_S og effekten av trengsel β_T . Modellen for

²⁰ Disse var (blant annet): Volvo B9, Scania K230 IV, Scania K230 V, Volvo B10, Mercedes Benz O405, Mercedes Benz, OC500 og MB O405 G.

avstigningstid er helt lik, foruten at man bytter ut T_B med T_A (total avstigningstid per stopp) og antall påstigende byttes ut med antall avstigende (B byttes ut med «A»).

Resultater fra modellen viste at:

- Ombordstigningstid:
 - Den gjennomsnittlige ombordstigningstiden per passasjer var på 1.95 sekunder
 - Antall påstigende reduserer påstigningstiden per passasjer med -0.017 sekunder per påstigende
 - «Step entrance», altså høy buss, økte påstigningstiden med 0.156 sekunder per passasjer i gjennomsnitt
 - Belegg hadde en negativ effekt; en prosent økning i belegget ga i gjennomsnitt 0.34 sekunder økt påstigningstid per passasjer.
- Avstigningstid
 - Den gjennomsnittlige avstigningstiden per passasjer var på 1.69 sekunder.
 - «Step entrance», altså høy buss, økte avstigningstiden med 0.016 sekunder per passasjer i gjennomsnitt. Altså vesentlig lavere enn effekt ved påstigning.
 - Antall avstigende reduserer avstigningstiden med -0.014 sekunder per avstigende
 - Belegg hadde en positiv effekt på avstigningstiden; en prosent økning i belegget ga i gjennomsnitt 0.082 sekunder lavere tid per passasjer.
- Forklaringskraft:
 - Modellene traff begge veldig godt med en forklart varians på 91 % for påstigningstid og 88 % for avstigningstid.

Man finner også at dobbeltdekkere øker både av- og påstigningstid, men dette er trolig ikke like relevant for norske forhold.

Simultan modell

For simultan påstigning, benyttes følgende modell:

$$T_{Sim} = \max(b \times B; a \times A)$$

Hvor b og a er definert likt som i den sekvensielle modellen. Den eneste forskjellen er dermed at man kombinerer denne modellen for på- og avstigningstid i én.

Resultater fra modellen viste at:

- Ombordstigningstid:
 - Den gjennomsnittlige ombordstigningstiden per passasjer var på 2 sekunder
 - Antall påstigende reduserer påstigningstiden per passasjer med -0.016 sekunder per påstigende
 - «Step entrance», altså høy buss, økte påstigningstiden med 0.186 sekunder per passasjer i gjennomsnitt

- Belegg hadde en negativ effekt; en prosent økning i belegget ga i gjennomsnitt 0.359 sekunder økt påstigningstid per passasjer.
- Avstigningstid
 - Den gjennomsnittlige avstigningstiden per passasjer var på 1.88 sekunder.
 - «Step entrance», altså høy buss, økte avstigningstiden med 0.016 sekunder per passasjer i gjennomsnitt. Altså vesentlig lavere enn effekt ved påstigning.
 - Antall avstigende reduserer avstigningstiden med -0.023 sekunder per avstigende
 - Belegg hadde en positiv effekt på avstigningstiden; en prosent økning i belegget ga i gjennomsnitt 0.329 sekunder lavere tid per passasjer.
- Forklaringskraft:
 - Modellen treffer veldig godt med en forklart varians på 84 %.

Det er noen ulikheter i parameterne mellom modellene, men de fleste er relativt like. Unntaket gjelder effekten av trengsel for avstigningstid. Med den simultane modellen øker trengselen avstigningstiden, som er motsatt resultat sammenlignet med den sekvensielle modellen.

I tillegg til den simultane og sekvensielle utvikler Sun et. al. (2014) en helt ny modell, som tar hensyn til sammensetningen av passasjerene om bord. Sagt på en enkel, måte lager de en modell som gir høyere totaltid dersom mange skal av bussen, slik at de påstigende må vente til det er ledig plass før noen i det hele tatt kan gå på. Modellen er imidlertid vesentlig mer kompleks enn de relativt enkle modellene som er vist til nå, og gir ikke noe bedre empirisk treff. Denne modellen har derfor ikke blitt tatt videre.

Egne estimeringer

Anslag fra litteraturen har den fordel at man kan bruke dem uten å måtte gjennomføre egne estimeringer. Ulempen kan være at parameterne ikke er godt nok tilpasset det materiellet og rammebetingelsene man står overfor. Dersom man har tilgang til gode data på oppholdstid, samt av- og påstigning, kan det være gunstig å gjøre egne estimeringer. Det anbefales derfor å vurdere hvorvidt dette lar seg gjøre.

Tid for åpning og lukking av dører

Tid for åpning og lukking av dører er en parameter som kan variere etter ulike busstyper. Parameteren bør være relativt enkel å måle, slik at man raskt kan oppdatere parameterne ved behov. Et startpunkt er Tirachini (2014), hvor det benyttes 6.1 sekunder totaltid for åpning og lukking av dører.

Tid for å finne ledig busslomme

Tid brukt å finne en ledig busslomme kan være en viktig komponent i kollektivsystemer med høy frekvens. I tilfeller hvor avgangsfrekvensen er høy, vil det potensielt oppstå kø ved bussholdeplassen, der en eller flere busser må vente til en busslomme/holdplass blir ledig. Modelleringen av fenomenet er imidlertid relativt kompleks. Det er viktig å være klar over at

dette fenomenet ikke er akkurat det samme som «klumping», hvor flere busser ankommer holdeplassen samtidig. Det kan for eksempel være fravær av ventetid for å finne ledig holdeplass, men fortsatt klumping, i det alle bussene kjører inn på en ledig oppstillingplass samtidig.

Ifølge Gran (2013) er det i hovedsak fire ulike metoder som benyttes til å vurdere kapasitet og tidsbruk ved holdeplass:

- Simulering
- Køteori (statistisk modellering)
- Gjennomsnittsbetrakning (kun for kapasitetsvurdering)
- Empirisk metode

Simuleringsmetoden vil kunne benyttes til å si noe om forsinkelsen til ett spesifikt kjøretøy, som en del av en helhetlig simuleringsmodell. Den statistiske modelleringen (køteori) vil imidlertid si noe om konsekvenser et gjennomsnittlig kjøretøy. Hvilken metode som er best egnet, avhenger dermed litt av hvilken metode man bruker for øvrig, og formålet. Kort sagt vil den simuleringen være av interesse dersom man forventer at forsinkelsen per kjøretøy varierer en god del, og at man er interessert i detaljert simulering av hvert kjøretøy. I flere tilfeller bruker imidlertid simulering som et grunnlag for statistisk modellering. Det kan derfor uansett være nyttig å kjenne til konseptene som ligger bak.

Videre vil gjennomsnittsberegningen i hovedsak si noe om kapasiteten ved holdeplass og lite om selve ventetiden, og er derfor mindre interessant. Det finnes anslåtte parametere for sammenhengen mellom bussfrekvens, kapasitet og sannsynlighet for at alle holdeplasser er opptatte. Denne informasjonen gir imidlertid ikke noen direkte mulighet for å regne på ventetiden, siden den ikke eksplisitt tar hensyn til lengden på køen inn til holdeplass.

Den empiriske metoden bruker statistisk estimering sammen med observasjoner på faktisk tidsbruk og antall busser til å anslå sannsynlighet for å måtte vente. Etter vårt syn, gir ikke denne metoden slik den er dokumentert i Gran (2013) noe grunnlag for å beregne faktisk ventetid på holdeplass. Videre er det ikke et datagrunnlag tilgjengelig for å estimere funksjonen empirisk. Hovedvekt legges derfor på å forklare den køteoretiske og simuleringsbaserte metoden.

Både statistisk modellering og simulering benytter begge konseptet holdeplasskapasitet. Dette sier noe om hvor mange busser en gitt holdeplass kan betjene per tidsenhet. Kapasiteten er definert i U.S. Highway Capacity Manual (HCM) ved følgende likning:

$$Q = \frac{\frac{g}{c} + 3600}{t_r + t_p \left(\frac{g}{c}\right)}$$

Her er g grøntid ved neste lyskryss, c er syklusens lengde, t_r er den tiden bussen bruker på å kjøre bort fra holdeplassen, mens t_p er oppholdstiden i gjennomsnitt per buss. Dette er også

metodikken vegvesenet benytter i sine kapasitetsberegninger. Kapasiteten på en holdeplass er avgjørende for eventuell kødannelse blant bussene.



Figur 6.3: Eksempel på busser i kø. Foto: Alarmy stock photo

Statistisk modellering (køteori)

Innen statistisk modellering av tid på holdeplass, er det flere som har benyttet såkalt «køteoretiske» modeller (Gu et. al., 2011; Yang et. al., 2009; Zhao et. al., 2006). Disse modellene gjør visse antagelser om mønstret bussene ankommer holdeplassen, og oppholdstiden. Slike modeller kan ofte bli relativt kompliserte (Gibson et. al., 1989), og det er derfor laget en noe forenklet variant av metodikken, som kan gi god utsagnskraft for tiden brukt å finne holdeplass. Køteori er også brukt i mange andre anvendelser, for eksempel kapasitet i datanettverk eller ved telefonsentraler.

Modellen benytter to sentrale antagelser:

- Oppholdstidene er eksponentialfordelt.
- Man kjører med faste og like intervaller; dvs. at man holder stiv frekvens.
- Bussene når en ledig oppstillingsplass uten å bli hindret eller hindre andre busser.

Den første antagelsen er svært vanlig i køteoretiske modeller. At man antar eksponentialfordelt oppholdstid er kun et teknisk punkt, som i praksis betyr at kortere oppholdstider er mer sannsynlig enn lange, og at oppholdstiden for én buss ikke påvirkes av en annens.

Den andre antagelsen representerer den største forenklingen som gjøres. I praksis vil man ikke få helt faste intervaller. Både fordi planleggingen kan forhindre dette, samt at operative forhold gir variasjoner i intervallene. Så lenge man i hovedsak holder stiv frekvens, og kombinerer dette med noen form for motvirking av «klumping» blant bussene, bør modellen kunne fungere godt.

Modellen har følgende variabler:

- O : Oppholdstid i sekunder

- $H(f)$: Headway, eller tidsintervall mellom avgangene i sekunder. I praksis lik $3600/f$ hvor f er antall avganger per time.
- n : antall oppstillingsplasser.
- $\pi(O, H(f), n)$: Sannsynligheten for å ikke finne ledig holdeplass ved ankomst (alle holdeplasser opptatt) som en funksjon av gjennomsnittlig oppholdstid (O), avgangsintervall (H) og antall oppstillingsplasser (n).

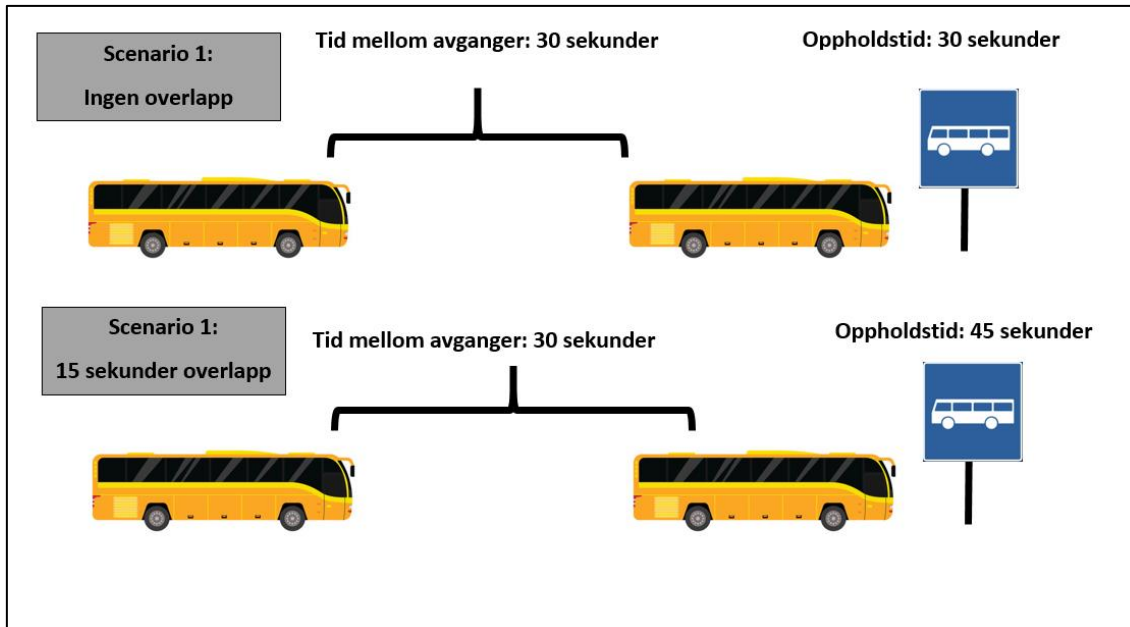
I tillegg til variablene ovenfor er parameteren ρ svært viktig. Denne viser direkte til kapasitetsutnyttelsen på holdeplassen og er definert som:

$$\rho = \frac{O}{H(f)} = \frac{\text{Oppholdstid per buss}}{\text{Tid mellom hver buss}} < 1$$

Parameteren sier helt enkelt at kapasitetsutnyttelsen er lik forholdet mellom tiden hver buss bruker på holdeplassen og tiden mellom hver buss. Hvis det er slik at oppholdstiden er lenger enn tidsintervallet mellom hver buss, vil man ikke klarer å få unna alle bussene, og det vil danne seg en «uendelig» kø bak holdeplassene som aldri løses opp (i modellen).

Figuren under illustrerer hvordan modellen fungerer i tegnings form. Det antas stiv frekvens og variabel oppholdstid, slik at bussene ankommer med faste intervaller, men det er noe variasjon i hvor lang tid de bruker på holdeplassen. I eksemplet er det antatt 30 sekunder mellom avgangene (120 busser per time) som er urealistisk for enkeltlinjer, men viser poenget. Beregningen er derfor trolig viktigst på de delene av bussveien hvor flere ruter går samtidig.

I første scenario (øverste panel) er oppholdstiden for bussen som ankommer holdeplassen først på 30 sekunder. Siden tiden mellom avgangene er 30 sekunder, blir det ingen overlapp og ingen venting for neste buss. I det andre scenariet, er oppholdstiden for første buss noe lengre, for eksempel fordi flere går av eller på. Med stiv frekvens er det fortsatt 30 sekunder til neste buss ankommer, men oppholdstiden er nå 45 sekunder, slik at neste buss må vente i 15 sekunder før holdeplassen blir ledig. I modellen oppstår altså variasjonen i oppholdstid, og ikke i tiden mellom hver avgang. Modellens ligninger beskriver hvordan variasjonen i oppholdstid virker sammen med den stive frekvensen, og påvirker ventetiden i gjennomsnittlig forstand.



Figur 6.4. Illustrasjon av modellen for beregning av ventetid for ledig oppstillingsplass. Ulikheter i oppholdstid gir overlapp mellom avgangene og skaper ventetid for bussene for å finne ledig oppstillingsplass hvis kapasiteten er for lav.

Beregningen av gjennomsnittlig ventetid per buss, per holdeplass er gitt som en funksjon av gjennomsnittlig oppholdstid (O), frekvens (f) (som påvirker intervallet mellom avgangene) og antall oppstillingsplasser (n) gjennom likningen:

$$E(O, f, n) = \frac{O \times \pi(O, H(f), n)}{2(n - \rho)}$$

De tekniske detaljene rundt modellen, er lagt til vedlegget. Der redegjøres det også for hvordan man beregner sannsynligheten for å ikke finne ledig plass, $\pi(O, H(f), n)$, som først og fremst er en teknisk del uten vesentlig bidrag til den intuitive forståelsen. Formelverket er litt kronglete for «håndregning», men det er helt uproblematisk å legge det inn i et dataprogram.

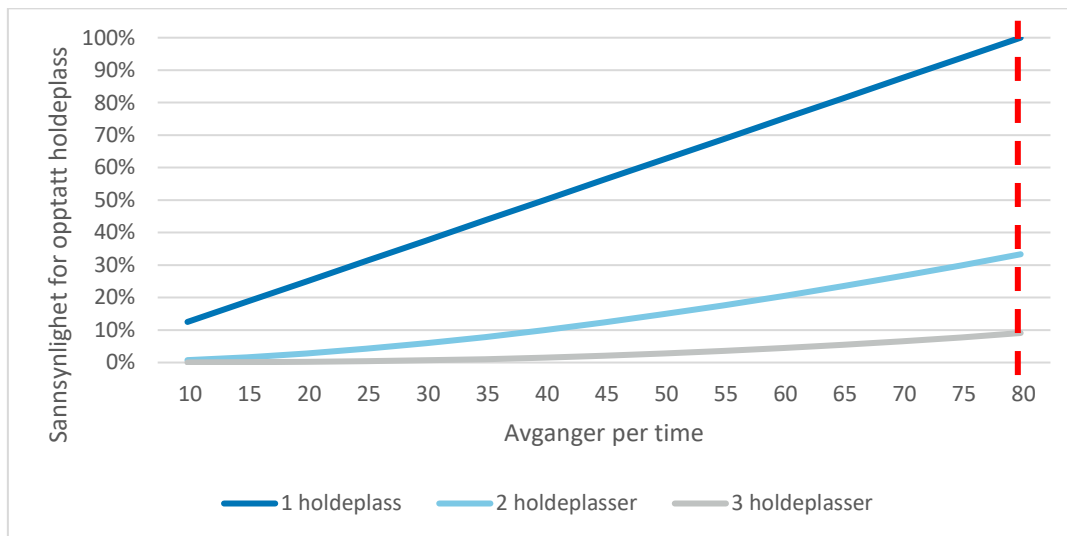
Figuren under illustrerer modellen under forutsetning av at kapasiteten er på 80 busser per time, med en gjennomsnittlig oppholdstid på 45 sekunder. Videre er modellen beregnet under antagelse om én, to og tre oppstillingsplasser.

Linjene representerer sannsynligheten for å måtte vente, gitt kapasitetsutnyttelse og antall oppstillingsplasser. Sannsynligheten øker lineært gitt én oppstillingsplass. Den når 100 % (helt sikkert at man må vente) når antallet avganger per time når den teoretiske kapasiteten på 80 avganger per time, markert med rød, stiplet linje.

Når man er ved kapasitetsgrensen vil oppholdstiden være større enn tiden mellom hver ankomst, slik at det blir fysisk umulig å ikke måtte vente på oppstillingsplass²¹. Legger man til

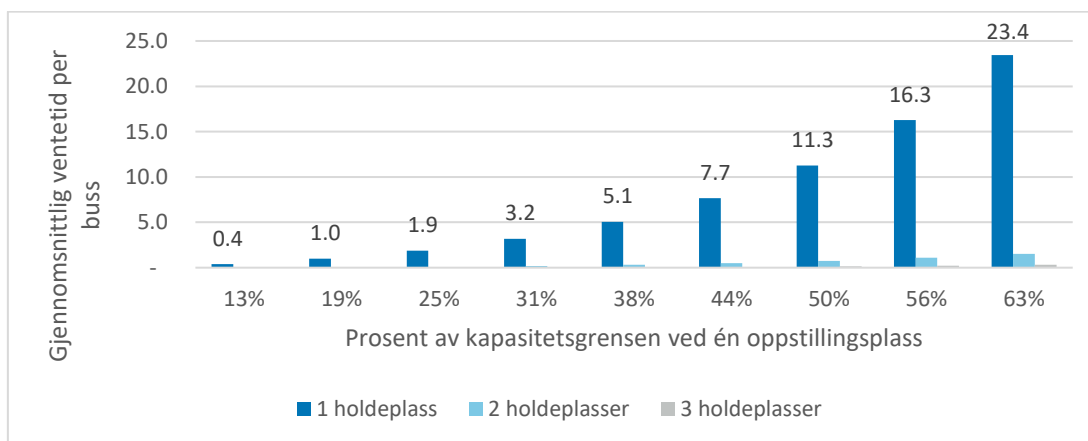
²¹ I modellen tilsier dette at $\rho \geq 1$, som gjør at hele formelverket bryter sammen og man får en negativ ventetid fra formlene. Dette gir en uendelig høy ventetid, som i praksis vil knele modellen.

en oppstillingsplass, faller sannsynligheten drastisk. En tredje holdeplass reduserer sannsynligheten enda mer, men ikke like mye som fra en til to oppstillingsplasser. Dette skyldes at hver ekstra oppstillingsholdeplass i praksis gir lavere kapasitetsøkning enn den forrige.



Figur 6.5. Sannsynlighet for opptatt holdeplass ved ankomst til holdeplass etter kapasitetsutnyttelse og antall holdeplasser.

Figuren under viser gjennomsnittlig ventetid i sekunder etter prosentvis utnyttelse av kapasiteten ved én oppstillingsplass. Ved 25 % utnyttelse venter man i gjennomsnitt 1.9 sekunder, mens det ved 50 % utnyttelse ventes 11 sekunder i gjennomsnitt. Ved 60 % er dette doblet til 23 sekunder.



Figur 6.6. Gjennomsnittlig ventetid per kjøretøy som en funksjon av kapasitetsutnyttelse og antall oppstillingsplasser.

Årsaken til den tiltagende økningen er at stadig flere busser øker sannsynligheten for et overlapp, som igjen øker sannsynligheten for et overlapp til neste buss. Ved færre avganger, vil ikke overlappet mellom to busser påvirke bussen bak. Jo flere avganger, jo større er

sannsynligheten for at dette skjer, som gir en økning i kurven. Man får altså en «tilbakeblokkeringseffekt», på samme måte som i biler opplever i lyskryss.

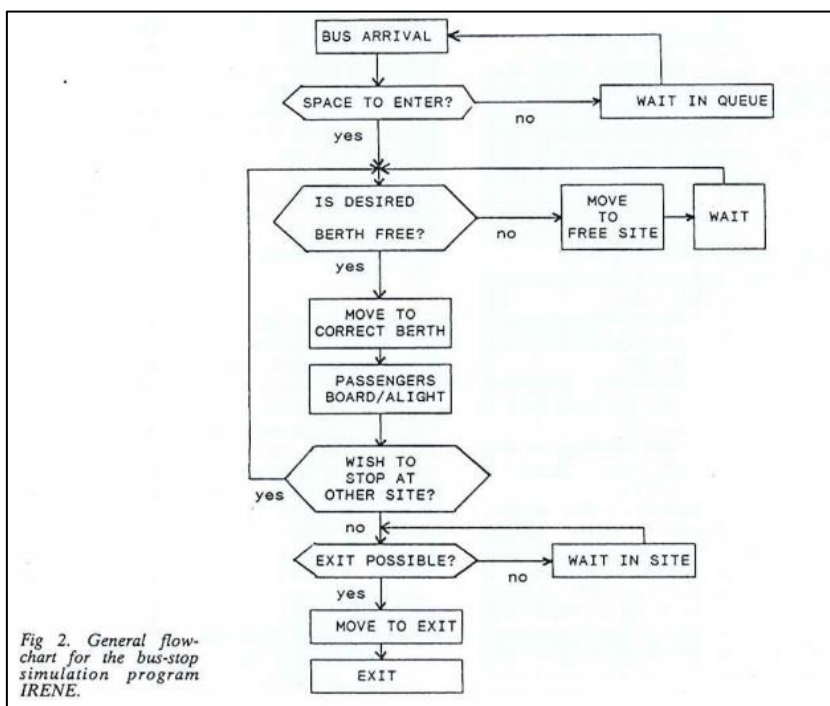
Dersom man legger til mer enn én oppstillingsplass reduserer dette den forventede ventetiden drastisk. Dette indikerer at godt dimensjonerte holdeplasser ikke bør oppleve vesentlige problemer med venting på oppstillingsplass.

Modellen beregner forsinkelsen for en gjennomsnittlig buss. Det vil si at hver enkelt buss kan ha en ventetid som skiller seg fra det modellen tilsier. Den kan imidlertid enkelt brukes for å gi en forventet ventetid per holdeplass, gitt at gjennomsnittlig oppholdstid og frekvens er beregnet først.

Simulering

Den andre metoden som benyttes får å beregne ventetid for ledig oppstillingsplass er simulering (Gibson et. al., 1989; Tirichani, 2014; Valencia & Fernandez, 2011). Programmet IRENE utviklet at Gibson et. al. (1989) har vært i bruk i forskjellige forskningsarbeider i snart 30 år, er trolig den mest fremtredende modellen.

IRENE er i seg selv et type trafikksimuleringsmodell, utviklet spesielt for å vurdere kapasitet ved holdeplasser. Den er en såkalt «Discrete event simulation» model, som betyr at simuleringen hopper frem i tid, hver gang det skjer noe nytt i systemet den beskriver.



Figur 6.7 Illustrasjon av simuleringsmodellen IRENE for kapasitet ved holdeplasser.

Modellen inneholder en forenklet modul for å beregne hastighet på vei og kryssforsinkelse, og en relativt komplisert kømodul per holdeplass. I motsetning til den statistiske modelleringen, er det ingen større ligninger direkte involvert. Figur xx viser flytskjema til simuleringen.

Når en buss ankommer, undersøker man først om det er ledig plass. Hvis de er ledig plass kjører man inn til riktig oppstillingsplass, og passasjerene går av- og på. Dersom det er opptatt, venter man til en ny plass er ledig. Systemet har antagelser om lengde på holdeplassopphold og avstand mellom holdeplassene. Hver buss simuleres separat, og man lagrer tidsbruken i kø for ledig holdeplass.

En slik tilnærming vil ikke kreve noen matematisk modell av kødannelse ved holdeplasser. Det kreves imidlertid at man programmerer en slik modell, og gjør den til en del av simulatormodulen.

6.2 Lyskryss og rundkjøringer

Forsinkelse i lyskryss oppstår når man ankommer krysset ved rødt lys og må vente på grønt lys. Forsinkelsen består av to komponenter: (1) Ventetiden ved selve krysset (2) tid tapt på akselerasjon og retardasjon.

Gibson et. al. (1989) og Valencia & Fernandez (2011) benytter begge følgende modell for å anslå tidstapet for en gjennomsnittstrafikant per kryss:

$$d_k = (\delta_k + l_k)h_k$$

Her er δ_k tidstap forbundet med å vente på grønt lys, l_k tid tapt på akselerasjon og retardasjon og h_k er antall stopp per kjøretøy. Under gjennomgårs modellering av de ulike komponentene ved tid tapt i lyskryss. Startpunktet er en gjennomgang av metodikken i Highway Capacity Manual. Senere vises det hvordan noen antagelser som trolig gjelder for bussveien kan (1) skrive modellen vesentlig enklere, og (2) modellere signalprioritering på en enkel måte. Sistnevnte faktor er det ikke funnet en etablert metodikk på og vi har derfor lagt til punktet selv.

Tid tapt ved rødt lys

HCM-modellen

Tidstapet ved venting på grønt lys kan ifølge Highway Capacity Manual estimeres som (enheten er sekunder):

$$\delta_k = \frac{c(1 - g/c)^2}{2(1 - \frac{xg}{c})}$$

Uttrykket gjelder for veger uten kødannelse. De ulike delene i ligningen er definert som følger:

- c: Signaltid i sekunder
- g: Grønntid i sekunder
- x: «saturation degree», eller forholdet mellom volum og kapasitet på veien. Slik formelen er satt opp, gjelder den for $x < 1.0$ (ingen tilbakeblokkering i køen)

Siden bussveien i stor grad skal benyttes av bussen alene, er det trolig at forholdet mellom volum og kapasitet (x) er ganske lavt. Det er dermed et spørsmål om man faktisk trenger å benytte HCM-modellen, eller om man kan benytte et enklere og mer tilpasningsdyktig uttrykk.

Forenkling av modellen ved antagelse om fravær av kø

En viktig faktor i HCM-modellen er x -variabelen som angir i hvilken grad man nærmer seg kapasitetsgrensen for veien, altså hvorvidt det eksisterer kø. Gitt at bussveien utelukkende trafikkeres av busser, vil trolig $x \approx 0$, som indikerer at man er et godt stykke under kapasitetsgrensen. Dersom en antar at bussene ikke skaper kø for hverandre i samme forstand som biler gjør det (høyere etterspørsel enn kapasiteten), kan modellen skrives på en langt enklere og mer intuitiv måte. En bonus er at man enkelt kan endre på modellen for å ta hensyn til signalprioritering.

Den gjennomsnittlige forsinkelsen per kjøretøy er lik sannsynligheten for å stoppe, ganger tidstapet per stopp. Dersom en antar en uniform sannsynlighet over ankomstfordelingen til bussene, vil sannsynligheten for å stoppe på grønt være gitt ved andel grøntid delt på syklusens lengde:

$$P(G) = g/c$$

Sannsynlighet for å stoppe for rødt er dermed det lik det motsatte tilfellet (det sees her bort fra gult lys, og tenker at man kun har rødt eller grønt lys). Sannsynligheten for å stoppe på rødt lys er dermed gitt fra:

$$P(R) = 1 - g/c$$

Videre er ventetiden når man faktisk stopper på rødt avhengig av hvor i syklusen man er. Dersom sykluslengden med rødt er konstant, vil antall sekunder rødt per syklus være $c - g$. Gitt at totalsyklusen er liten «nok», kan en som en forenkling anta en uniform sannsynlighetsfordeling på hvilket tidspunkt i rødt-syklusen man ankommer. Gjennomsnittlig ventetid per stopp blir da $1/2(c - g)$ ²² etter reglene for forventningsverdien til uniformt fordelte stokastiske variabler. Den regulære ventetiden (ikke signalprioritering) er dermed produktet av sannsynligheten for stopp, ganger ventetid per stopp [sekunder per buss i gjennomsnitt]:

$$V_{REGULÆR} = P(R)E(V) = \frac{(c - g) \left(1 - \frac{g}{c}\right)}{2}$$

Setter man $x = 0$ i HCM-formelen og tester de to formlene numerisk, gir de nøyaktig samme svar.

²² Denne metodikken er utbredt ved beregning av gjennomsnittlig ventetid på holdeplass for kollektivtrafikanter. Den eneste forskjellen er at en her har justert tiden for sannsynligheten for at man faktisk stopper på rødt. Analogien til kollektivtransport blir at man justerer for sannsynligheten for å velge kollektiv som reisemiddel.

Modellering av signalprioritering

Dersom en ønsker å modellere ventetiden ved signalprioritering er det nå svært enkelt å endre formelen tilsvarende. Dersom man antar at signalprioritering innebærer at kollektivtransporter blir gitt grønt lys når den ankommer krysset gjennom å avslutte grønt-syklusen til trafikk i kryssende felt, blir ventetiden per kjøretøy:

$$V_{PRIO} = \left(1 - \frac{g}{c}\right) t_0$$

Her er det antatt at det tar t_0 sekunder å avslutte grønt-syklusen til trafikk i kryssende felt. Denne tiden er uavhengig av hvor lang i syklusen trafikken i kryssende felt befinner seg.

Tidstap ved akselerasjon og retardasjon

Tidstapet forbundet med akselerasjon og retardasjon kan estimeres ved følgende ligning [sekunder per buss]:

$$l_k = \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

Hvor v marsjhastighet (m/s), a er akselerasjonsrate (m/s²) og b retardasjonsrate (m/s²). Dette er en helt standard ligning for beregning av tidsforbruk og måles i sekunder og må derfor konverteres til minutter ved å dividere på 60.

Samlet modell

En samlet modell for tid i lyskryss består som nevnt at tidstap ved ventetid for grønt lys og akselerasjon- og retardasjonstid. I tillegg justerer man for antall stopp per kjøretøy. Antall stopp per kjøretøy er lik sannsynligheten for at man må stopp (rødt lys) og er dermed innbakt i modellen for tidstap ved å vente på grønt.

Settes alle uttrykkene ovenfra sammen, får en følgende ligning for tidstap per lyskryss [sekunder per buss i gjennomsnitt]:

$$d_{REGULÆR} = \left(1 - \frac{g}{c}\right) \left[\frac{(c-g)}{2} + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right]$$

Her er $P(R) = h_k$ satt utenfor parenteser i uttrykket for $V_{REGULÆR}$. Ved signalprioritering blir uttrykket omformet til [sekunder per buss i gjennomsnitt]:

$$d_{PRIO} = \left(1 - \frac{g}{c}\right) \left[t_0 + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right]$$

Her er igjen t_0 den konstante tiden det tar å avslutte grøntsyklusen til trafikk i kryssende felt.

Dersom man skal modellere en rundkjøring, kan man gjøre dette ned samme formelverk, bare med andre definisjoner av parameterne. Hvis man definerer $g = T - t$ hvor T er lengden på en gitt syklus (f.eks. 60 sekunder) og t er antall sekunder i en slik syklus kjøretøy kommer inn fra venstre i rundkjøringen. Hvis man videre definerer $c = T$ hvor, blir modellen for en rundkjøring da:

$$d_{\text{Rundkjøring}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T-t}{T} \right) \left[t + \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right]$$

Parameterne T og t kan settes med utgangspunkt i en dummy-tall, og man kan videre kalibrere modellen mot data, siden man, i motsetning til lyskryss med faste intervaller, må kjenne antallet biler som kjører gjennom rundkjøringen.

Formelverk ved simulering av kryss

Dersom man skal simulere hvert enkelte kjøretøy endrer man helt enkelt formelverket ved å fjerne sannsynligheten for å stoppe, $1 - g/c$. I en simulering vil et kjøretøy enten stoppe eller ikke, slik at sannsynligheten blir unødvendig. Eventuelt kan man tilpasse ventetiden etter hvor lang tid det faktisk er igjen i syklusen med rødt lys og ikke bruke den uniforme modellen.

Man står dermed igjen med selve forsinkelsen når den oppstår. Det er altså veldig enkelt å omgjøre dette formelverket slik at det passer i en simuleringsmodell av hver enkelt buss.

6.3 Reell hastighet

Reell hastighet på en vegstrekning avhenger av flere faktorer som både knyttet til selve kjøretøyet og strekningen. Først og fremst vil akselerasjons- og retardasjonsraten påvirke hvilken hastighet man kan oppnå. Videre vil avstanden mellom holdeplassene og fartsgrensen spille inn på hvilke toppfart man kan oppnå. Urbanet analyse har tidligere benyttet en lignende modell for beregning av optimal holdeplassavstand (Betanzo & Haraldsen, 2017b).

En enkel modell antar at man klarer å oppnå fartsgrensen på strekningen man kjører. Modellen som vises under tar hensyn til at man kan være nødt til å begrense maksimumshastigheten for å klare å stoppe i tide før holdeplassene etter egenskaper ved trasé og kjøretøy. På lengre strekninger behøver man ikke ta hensyn til denne faktoren fordi akselerasjons- og retardasjonsratene som regel er tilstrekkelig for å oppnå fartsgrensen og at man klarer å stoppe i tide. Men en generell modell gir et mer realistisk beskrivelse av atferd på kortere strekninger og er viktig dersom man skal modellere kjøretidene i sanntid og under et fleksibelt opplegg som kan tilpasses ulike fysiske utforminger av bussvegen.

Modellering av sjåfør som minimerer reisetiden

Hastighetsmodellen forsøker å modellere atferden til en sjåfør som reiser mellom to punkter A og B. Man antar at sjåføren ønsker å minimere reisetiden, under to forutsetninger: (1) makshastigheten skal ikke overskride fartsgrensen og (2) distansen man bruker på opp og nedbremsing skal ikke overskrive den totale distansen (man klarer å stoppe i tide). Videre antar man at sjåføren bestemmer makshastigheten for å (v_{max}) for å minimere reisetiden $T(v_{max})$.

Videre gjøres det noen antagelser:

- Det er ikke kø på veiene (løses av en annen modell) eller andre forhold som begrenser hastigheten på bussen.

- Sjåføren holder en konstant akselerasjons- og retardasjonsrate.

Sjåføren løser da følgende minimeringsproblem:

$$\min T(v_{max})$$

gitt at

$$v_{max} \leq F_g$$

$$D_a(v_{max}) + D_r(v_{max}) \leq D_T$$

Her er F_g fartsgrense i km/t, D_a er distanse brukt på akselerasjon, D_r tilsvarende for retardasjon og D_T samlet distanse mellom A og B. For å kunne løse problemet, må man spesifisere likningene $T(v_{max})$ og $D_x(v_{max})$. Reisetiden mellom to punkter A og B som en funksjon av topphastighet (v_{max} i km/t) akselerasjonsrate (a m/s²), retardasjonsrate (b m/s²) og lengde (L km) er gitt ved;

$$T(v_{max}) = \frac{v_{max}}{2\beta^{-1}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + \frac{L}{\beta^{-1}v_{max}}$$

Her er $\beta = 3.6$, slik at regner fra m/s til km/t. Videre er distansen for akselerasjon og retardasjon $D_x(v_{max}) = \frac{v_{max}^2}{2x}$.

Løsningen av maksimeringsproblemet er lagt til et eget appendiks. Løsningen gir imidlertid maksimal oppnåelig hastighet som gitt av likningen:

$$v_{max} = \min \left\{ F_g, \beta \left[\frac{2D_T}{1/a + 1/b} \right]^{1/2} \right\}$$

Ved å sette denne likningen tilbake inn i $T(v_{max})$ finner man den minste reisetiden mellom to punkter.

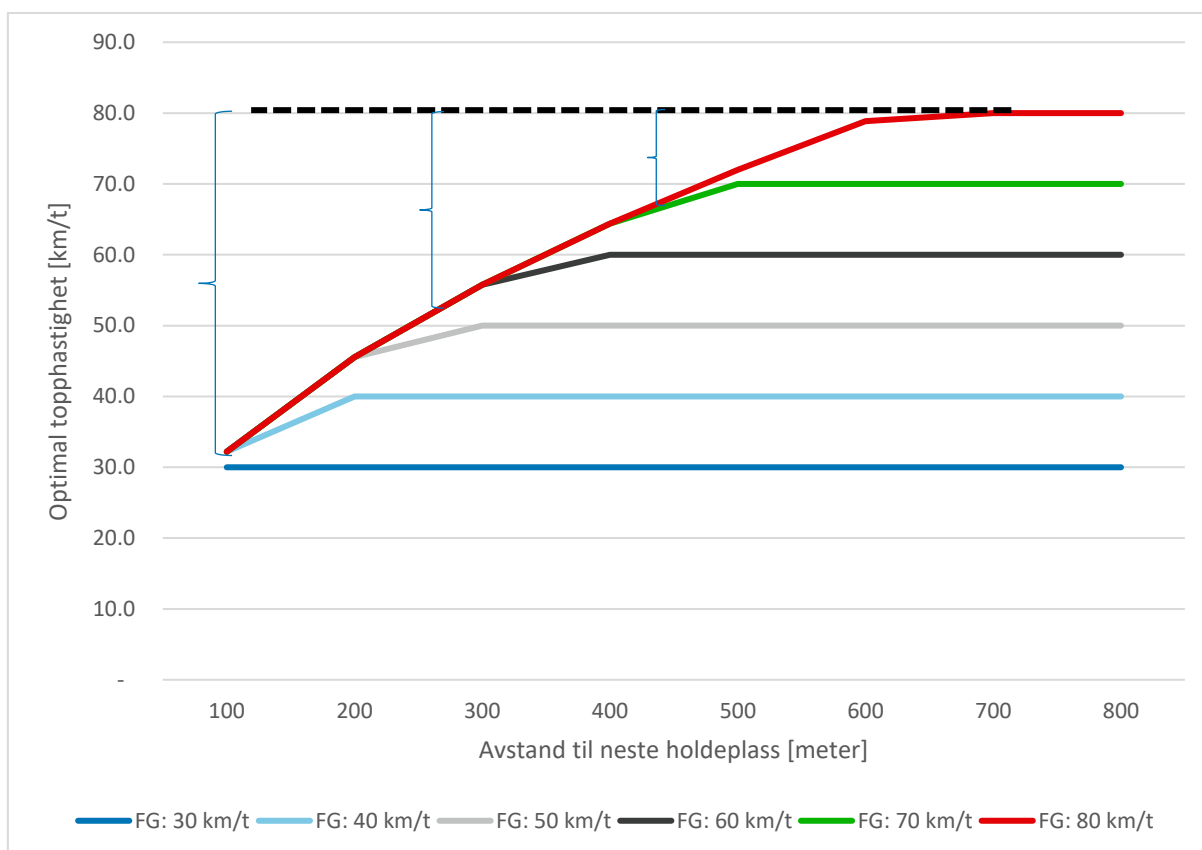
Illustrasjon av modellen

Modellen kan illustreres på en enkelt måte ved å beregne optimal topphastighet og reisetid etter reiselengde²³.

Modellen illustrerer hvordan man er nødt til å begrense maksimumshastigeten på kortere strekninger slik at man rekker å stoppe i tide. På lengre strekninger behøver man ikke ta hensyn til denne faktoren fordi akselerasjons- og retardasjonsratene som regel er tilstrekkelig for å oppnå fartsgrensen og at man klarer å stoppe i tide. På kortere strekninger må man imidlertid modellere atferden til bussjåføren slik at man også tar hensyn til nevnte hastighetsbegrensninger.

²³ I regneeksemplene benyttes akselerasjons- og retardasjonsrater på 0.8 m/s².

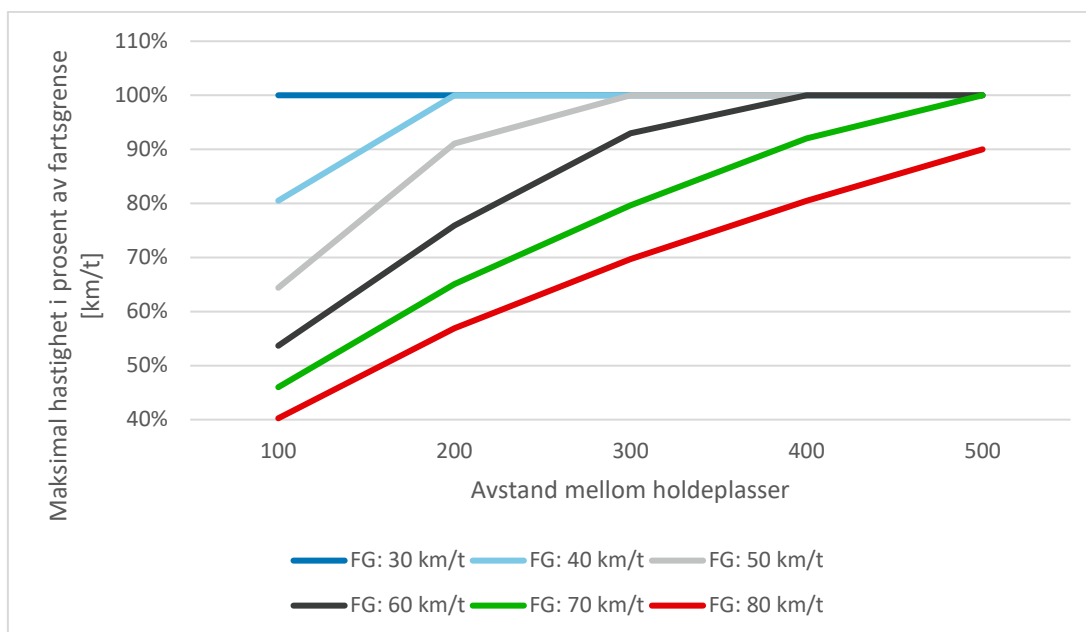
Figuren under viser optimal topphastighet beregnet med modellen ut fra avstand mellom holdeplassene. Optimal hastighet øker som en funksjon av fartsgrense og avstand mellom holdeplassene. Bidraget til modellen sett opp mot en modell der man antar at fartsgrensen kan nå uavhengig av holdeplassavstand, er differansen mellom høyde hvor linjene er «rette» og stigende. Dette er illustrert for 80 km/t med en svart stiplet linje. Avstanden mellom den svarte, stiplede linjen og den heltrukne røde viser avstanden mellom den makshastigheten man faktisk oppnår og fartsgrense.



Figur 6.8. Illustrasjon av optimal topphastighet etter fartsgrense og avstand til neste holdeplass.

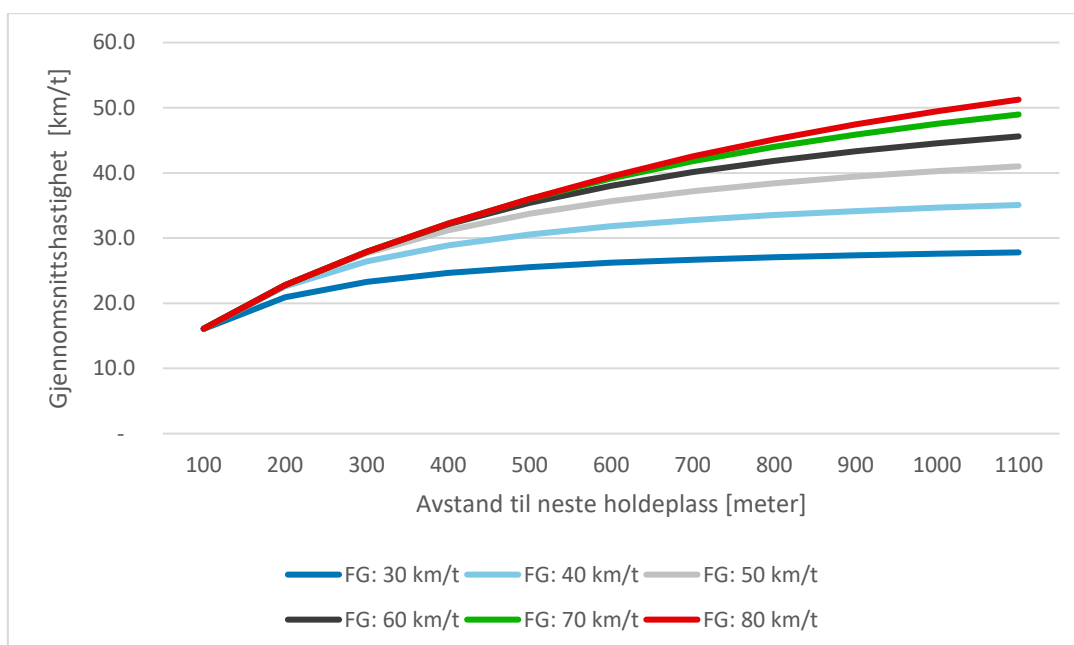
Figuren under viser i hvilken grad man oppnår på mer direkte måte enn figuren ovenfor. Her ser man maksimal hastighet man kan oppnå i prosent av fartsgrense etter fartsgrensen og avstand mellom holdeplassene.

Figuren viser at området hvor modellen gir andre prediksjoner enn en modell hvor man antar fartsgrense som makshastighet først og fremst er for avstander under 500 meter. Eksempelvis vil man med en fartsgrense på 60 km/t oppnå fartsgrensen ved 400 meter mellom holdeplassene. For 70 km/t er det tilsvarende tallet 500 meter. Modellen blir derfor viktigere å bruke i områder hvor avstanden mellom holdeplassene er lav. På den annen side vil områder med lav avstand mellom holdeplassene gjerne ha lavere fartsgrense, som gjør at man kommer nærmere makshastigheten. Samtidig vil man på slike strekninger bruke mindre tid i marsjert (maksimumshastigheten), slik at parameteren blir noe mindre avgjørende.



Figur 6.9. Maksimal, oppnådd hastighet i prosent av fartsgrense etter fartsgrense og avstand mellom holdeplasser.

Gjennomsnittshastigheten beregnes ved å sette estimert topphastighet inn i likningen for tid. Dermed kan man beregne gjennomsnittshastighet som en funksjon av avstand og tid. Gjennomsnittshastigheten vil bli lavere enn maksimumshastigheten fordi man taper tid på opp- og nedbremsing.



Figur 6.10. Oppnådd gjennomsnittshastighet etter fartsgrense og avstand mellom holdeplasser.

Figuren over viser predikert gjennomsnittshastighet som en funksjon av fartsgrense og avstand mellom holdeplassene. Selv om fartsgrensen er relativt høy, vil man fortsatt ligge et godt

stykke under denne selv på lengre strekninger. Årsaken er som sagt tid tapt på akselerasjon- og retardasjon. Urbanet analyse har utviklet en egen holdeplassmodell som også beregner gjennomsnittshastighet. Denne modellen regner imidlertid inn reisehastigheten, som innebærer at man også legger inn oppholdstiden. Dette gjør at anslagene på hastighet i modellen utviklet i denne rapporten blir noe høyere. I sum skal reisetiden bli den samme, siden oppholdstid regnes inn separat.

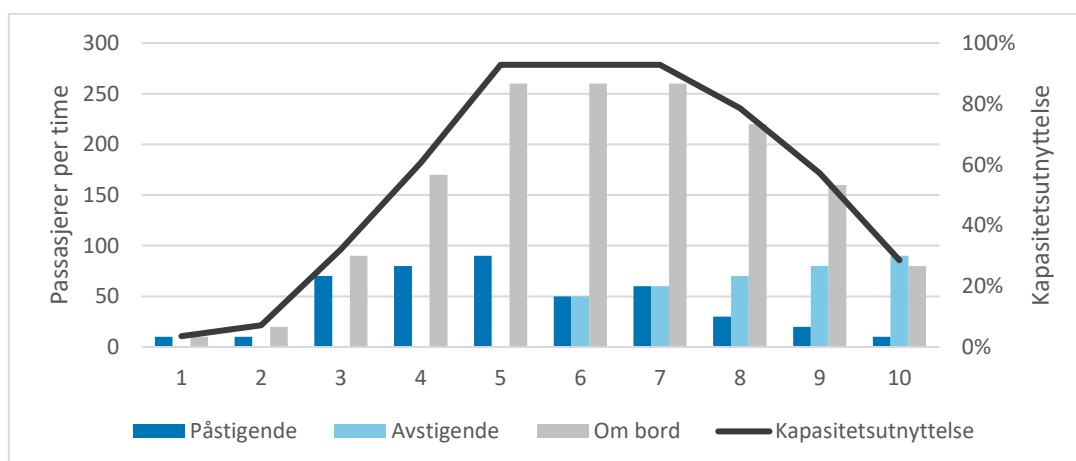
6.4 Kapasitet

Kapasiteten i et kollektivsystem avhenger av tilbudet som kjøres og vognmateriellet som benyttes. Kapasiteten per vogn og antall vogner per tidsenhet utgjør til sammen den samlede kapasiteten langs en bussrute.

Det er mulig å måle kapasitet på flere måter. For eksempel kan det måles på et overordnet nivå, der man ser på den totale kapasitetsutnyttelsen i systemet. Dette gjøres typisk ved å se på forholdet mellom antall plasskilometer som tilbys og antall passasjerkilometer som reises i en gitt tidsperiode. Et slikt mål kan fungere godt på et strategisk nivå, men på et mer operativt nivå kan det skjule viktige forskjeller i kapasitetsutnyttelsen. Dette skyldes at kapasitetsutnyttelsen kan variere mye langs en rute og et gjennomsnitt kan potensielt skjule dette. Dersom det er høy trengsel (= for lav kapasitet) noen steder, vil trafikantene kunne oppleve dette som en stor ulempe, uten at man klarer å måle det med aggregerte parametere.

Kapasitet langs bussruten

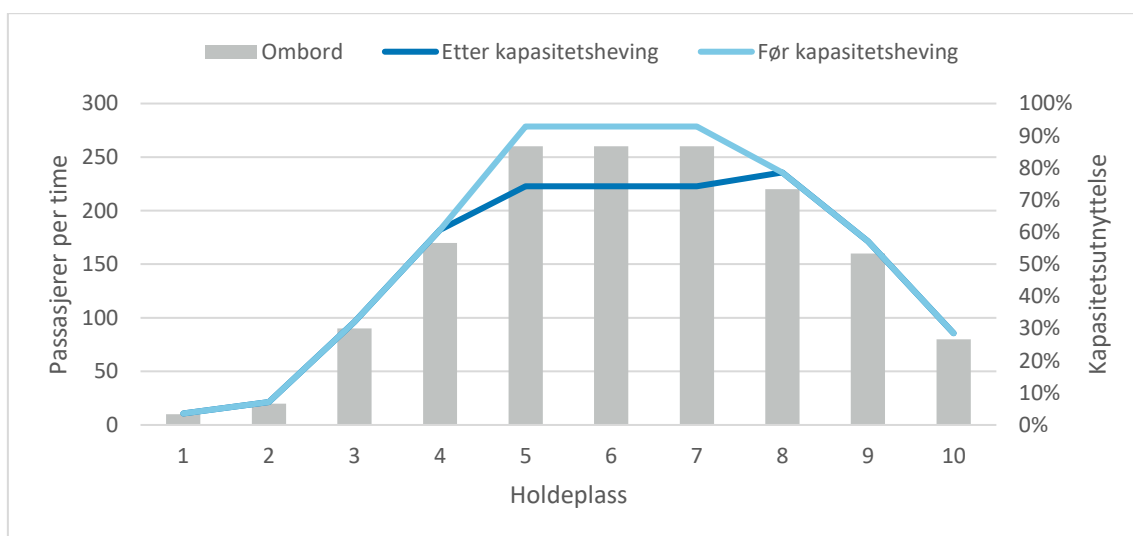
En måte som kan egne seg godt til å vurdere kapasitetsutnyttelsen, er å se på hvordan den varierer på de ulike delstrekningen av en bussrute. Dette vil kunne bidra til å identifisere sårbare punkter der det tilbys for lite kapasitet, og hvor man bør sette inn ytterligere avganger, eller områder der man kan redusere tilbudet.



Figur 6.11. Eksempel på kapasitetsutnyttelse langs en busslinje. **Kun eksempelberegning til illustrativ bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**

Figuren under viser et regneeksempel der en har laget en av- og påstigningsprofil for en busslinje som kan være typisk for mange byormåder i Norge. Man stiger på ruten og skal av et godt stykke dra der man skal på. Slike mønstre oppstår typisk for pendlere med jobb i bysentrum. På denne busslinjen stiger kapasitetsutnyttelsen på midten. Grafen viser tydelig at dette er et område hvor det eksisterer problemer, og det er nesten fullt. Kapasitetsproblemet kan da avbøtes ved å enten sette inn flere avganger, eller kjøre større busser.

I figuren under vises to forskjellige kapasitetsprofiler. Profilen markert «før kapasitetsheving» er den samme som i figuren ovenfor. «Etter kapasitetsheving» viser situasjonen med ekstra avganger mellom holdeplass 5-7, som gjør at trengselen faller. Et viktig poeng med denne fremgangsmåten er at man identifiserer akkurat hvilke områder som har kapasitetsproblemer.



Figur 6.12. Eksempel på kapasitetsutnyttelse langs en busslinje med forsterkning. **Kun eksempelberegning til illustrativ bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**

I eksemplet over er ikke kapasiteten økt for de delene av traseen der trengselen ikke er betydelig. Dette gjør at man slipper å kjøre hele rutelengden, noe som ville resultert i betydelig overkapasitet på flere av strekningene. Samtidig kan innsetting av busser på deler av strekningen føre til at flere passasjerer må bytte og et mer uoversiktlig tilbud. En alternativ løsning er dermed å kjøre dubleringsbusser langs hele strekningen, hvor ulempen er at noen av dem kan gå med lav kapasitetsutnyttelse.

Tilbakeslagseffekter

Det er imidlertid viktig å være klar over at endringer i tilbudet kan påvirke etterspørselen, som igjen påvirker kapasitetsutnyttelsen. For eksempel kan en økning i antall avganger gi redusert ventetid som slik at man tiltrekker seg flere reisende. Dersom kapasitetsutnyttelsen faller, vil samtidig trengselen falle, som også kan ha en positiv etterspørselseffekt.

Tiltak for å bedre kapasiteten vil dermed normalt bestå av to motstridende krefter:

- Øker man kapasiteten fører dette til en lavere kapasitetsutnyttelse som igjen kan gi økt kapasitetsutnyttelse gjennom økt etterspørsel.
- Reduserer man kapasiteten fører dette til en høyere kapasitetsutnyttelse som igjen kan gi lavere kapasitetsutnyttelse gjennom redusert etterspørsel.

I hvert tilfelle der man forsøker å endre kapasiteten, vil man oppleve en «tilbakeslagseffekt». Man må derfor være forberedt på at trafikantene responderer på kapasitetsendringene på en måte som endrer selve kapasitetsutnyttelsen.

Hvordan man endrer kapasiteten vil trolig påvirke hvor stor tilbakeslagseffekten blir, se tabell under. Endringer i avgangsfrekvens vil normalt påvirke ventetidskostnadene for trafikantene, samtidig som kapasiteten øker (flere plasskilometer), som gir redusert trengsel. Økt vognstørrelse vil på den annen side kun påvirke selve trengselen, og vil dermed trolig få en lavere tilbakeslagseffekt.

Tabell 6.1. Påvirkningsfaktorer ved ulike grep for økt kapasitet. Hvilke tilbudsfaktorer som påvirkes av hvilke policy-variabler Kolumbus har til rådighet.

	Påvirker	
	Ventetid	Trengsel
Frekvens	X	X
Vognstørrelse	X	

Tilbakeslagseffekten vil trolig ikke være like sterk i alle tilfeller. Dersom det i utgangspunktet er lav trengsel og/eller et godt tilbud (høy avgangsfrekvens), vil trolig effekten være liten. Dersom en linje har en kapasitetsutnyttelse nært kapasitetsgrensen, vil tilbakeslagseffekten trolig være større. Siden det nettopp er i slike tilfeller det er mest interessant å endre kapasiteten, kan tilbakeslagseffekten redusere effekten av tiltak som ikke tar hensyn til den.

6.5 Eksempel på bruk: Dimensjonering av holdeplasser

Vi har ikke benyttet modellen for ventetidskostnader forbundet med å finne ledig oppstillingsplass i den anbefalte reisetidsmodellen. Dette skyldes at i tilfeller der tilstrekkelig holdeplasskapasitet er gjort tilgjengelig, bør ventetiden være relativt lav.

For å illustrere den potensielle nytten av modellen, har vi laget et eksempel på hvordan den kan benyttes til å beregne optimalt antall oppstillingsplasser. En slik analyse kan gjennomføres før den fysiske utformingen bestemmes, som sikrer at man har tilstrekkelig med kapasitet til å ta unna antall busser.

Kriterier for optimal størrelse på et busstopp

I vår modell påvirkes trafikantenes reisekostnader ved ulik innretting på antall bussholdeplasser. Ved et lavt antall oppstillingsplasser i forhold til tilbudet den holdeplassen skal betjene vil forsinkelseskostnadene øke siden passasjerene må vente i bussen til den kan kjøre inn til holdeplassen. Dette er trafikantkostnadene forbundet med en spesifikk utforming.

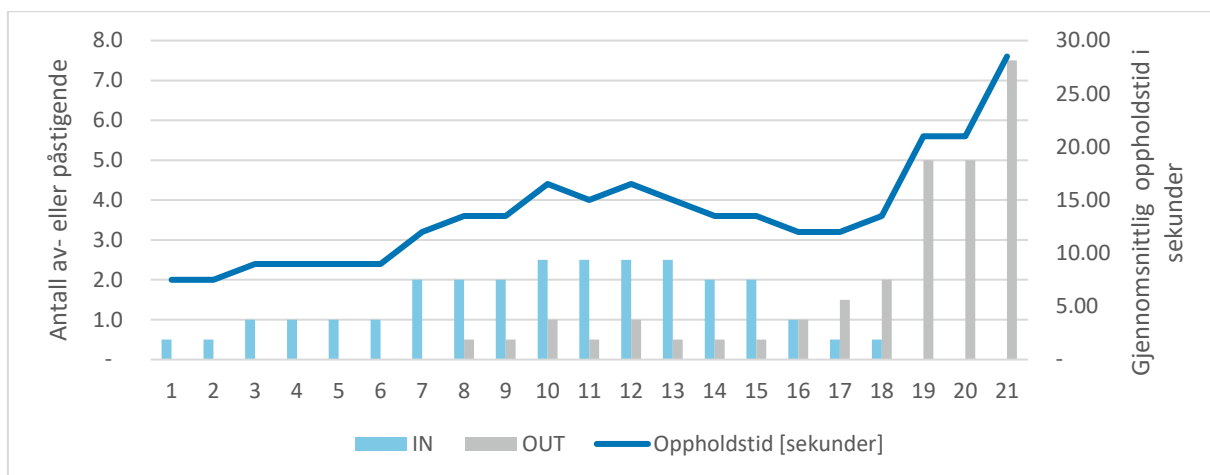
Samtidig er kostnadene for samfunnet gitt ved merkostnaden av å utvide holdeplassen med flere oppstillingsplasser.

Tradisjonelle metoder for å dimensjonere holdeplasser, som vist i modelleringskapitlet, beregner nødvendig kapasitet ut fra en gitt forsinkelse. I praksis, vil det imidlertid være mer korrekt å bestemme hvor stor forsinkelse man kan tolerere, gitt kostnaden ved å fjerne den, altså utvide kapasiteten.

Eksempel på bruk av modellen

Vi har laget et enkelt regneeksempel som viser hvordan kømodellen ved holdeplass kan benyttes til å fastslå den samfunnsøkonomisk riktige kapasiteten per holdeplass.

Figuren under viser hvordan en tenkt fordeling av på- og avstigninger langs en busslinje og den registrerte oppholdstiden. Vi ser her for oss en busslinje inn mot sentrum, hvor mange går på i starten og de fleste går av ved de siste holdeplassene, som også gjør at oppholdstiden øker inn mot siste stopp.



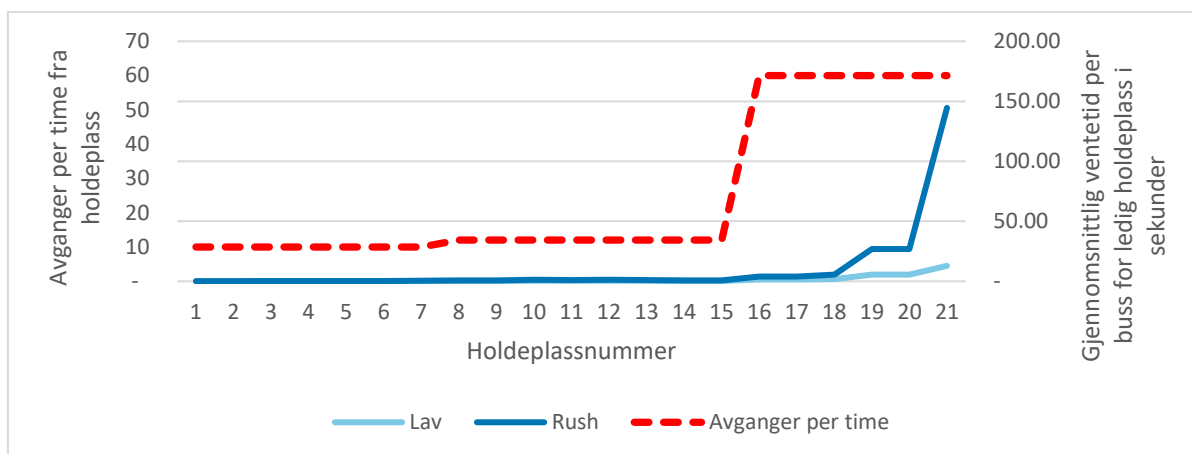
Figur 6.15. Passasjerprofil etter holdeplass med oppholdstid beregnet ut fra antall av- og påstigende. **Kun eksempelberegning til illustrativ bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**

I neste figur har vi benyttet den statistiske modellen vi satte opp i forrige kapittel. Vi har gjort følgende antagelser i dette eksemplet:

- Vi har gjort ulike antagelser om antall busser som benytter holdeplassen vi ser på. På de første delene av linje, er det kun noen få ruter som benytter seg av holdeplassene. Jo nærmere endeholdeplassen man kommer, jo flere busser benytter samme trase, og antallet stiger.
- Vi har videre antatt at alle busser har den samme oppholdstiden i gjennomsnitt.
- Vi har antatt at alle holdeplasser er planlagt med en oppstillingsplass

Når man nærmer seg endeholdeplassen stiger den gjennomsnittlige ventetiden for å komme inn på ledig oppstillingsplass. Dette skyldes at oppholdstiden per buss øker, og at man er nært kapasitetsgrensen siden mange ruter benytter de samme holdeplassene. En økning i

holdeplasstiden per buss, gir dermed en mer dramatisk utslag enn på holdeplassene der det er færre avganger.



Figur 6.16. Antall avganger per time og forventet ventetid for å finne ledig oppstillingsplass etter holdeplass. **Kun eksempelberegning til illustrativ bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**

Mønstret som vises her er trolig typisk for en del byområder hvor mange reiser inn til sentrum over korridorer med blanding av lokal og regional busstransport.

Vi har delt inn forsinkelsen etter rush- og lavperiode, hvor vi har antatt at rushet har dobbelt så mange reisende som lavperioden. Modellen viser altså at med kun en oppstillingsplass forventer man sterke forsinkelser på endeholdeplassen i rush. Dette skyldes først og fremst antallet som skal av og på denne holdeplassen, som driver oppholdstiden høyere. I lavperioden er forsinkelsene mye lavere, fordi man har et lavere passasjertall som gir lavere oppholdstid per buss.

Ved den siste holdeplassen er forsinkelsene 1000 % høyere i rush enn i lav, mens det ved den nest siste er 380 % høyere. Antallet av- og påstigninger ved den siste holdeplassen gjør at man er mye nærmere kapasitetsgrensen enn ved den nest siste. Dette illustrerer at effekten av økt etterspørsel på forsinkelsene øker jo nærmere kapasitetsgrensen man opererer gjennom å drive oppholdstiden høyere opp.

Beregning av samfunnsøkonomisk nytte

Jo høyere forsinkelsene er, jo større er kostnaden for trafikantene og operatøren. Dette innebærer at økt kapasitet på holdeplassen er en positiv effekt for disse gruppene. Samtidig vil økte kostnader ved bygging av flere oppstillingsplasser påføre samfunnet en finansierings- og skattekostnad.

Ved å sammenligne reduksjon i forsinkelseskostnader for passasjerene med merkostnaden av å bytte en ekstra oppstillingsplass, kan man anslå om det er riktig, sett fra et samfunnsøkonomisk ståsted, å bygge en eller flere oppstillingsplasser.

Vi gjennomført en illustrerende beregning for eksempellinjen ovenfor, der samfunnsøkonomisk lønnsomhet ved en eller to oppstillingsplasser er beregnet per busstopp.

Vi har lagt til grunn en tidsverdi på 5.4 kr/min forsinkelse, en kostnad per ekstra oppstillingsplass på ca. 80 000 kr hentet fra Tirichanin (2014)²⁴, varighet per busstopp på 10 år og en diskonteringsrente på 4 %.

Tabell 6.2. Forutsetninger i den samfunnsøkonomiske beregningen.

Tidsverdi [kr/min]	kr	5.40
Kostnad per ekstra oppstillingsplass	kr	78 400.00
Varighet av busstopp [år]		10
Diskonteringsrente		4 %

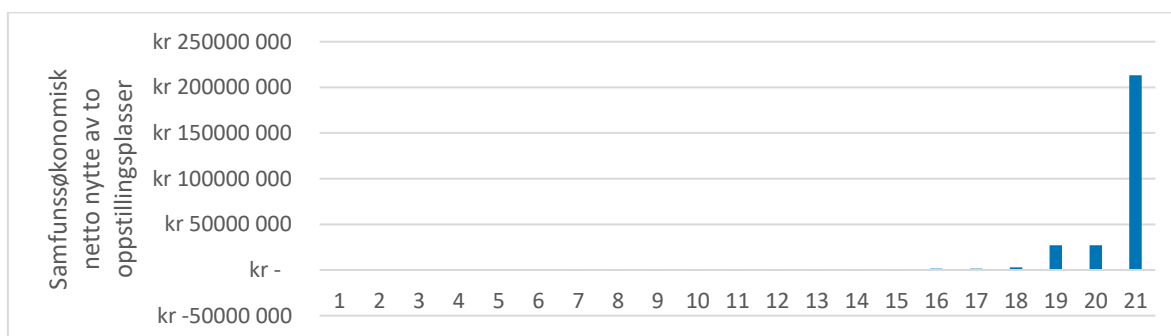
Den samfunnsøkonomiske nettonytten av å utvide med en ekstra oppstillingsplass ved holdeplass i , NN_i , er gitt ved følgende uttrykk:

$$NN_i = -K + \frac{\sum [R(E(O_i, f_i, 1) - E(O_i, f_i, 2))]}{(1 + r)^t}$$

Her er K kostnaden ved å legge til en ekstra oppstillingsplass, R antall reiser per år $E(O_i, f_i, 1)$ gjennomsnittlig forsinkelse ved en oppstillingsplass per passasjer og $E(O_i, f_i, 2)$ ved to oppstillingsplasser, O_i er gjennomsnittlig oppholdstid ved holdeplassen og f_i er antall avganger. Til sist er r diskonteringsrenta.

Beregner man dette uttrykket per holdeplass, får man følgende netto nytte per holdeplass som vist i figuren under. Der ser man at det er tre holdeplasser hvor det er positiv nåverdi av betydning. Dette stemmer godt overens med mønstret for forsinkelser per holdeplass.

Metoden kan altså vise hvilke områder det kan være samfunnsøkonomisk riktig å bygge ut flere oppstillingsplasser. I vårt enkle regneksempel ser vi at holdeplassestene nærmest «sentrum» hvor flere linjer møtes og benytter samme holdeplasser, er steder det kan være mest fornuftig å oppgradere, som virker rimelig.



Figur 6.17. Beregnet samfunnsøkonomisk lønnsomhet av å gå fra én til to oppstillingsplasser. **Kun eksempleregning til illustrativ bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**

²⁴ Opprinnelig oppgitt som dollar, men omregnet til NOK med en kurs på 7.84 NOK/\$.

Resultatene man får avhenger av hvor gode inndata på kostnader, trafikanter og tilbud man kan legge inn i beregningen. I den virkelige verden vil det være usikkerhet knyttet til slike inndata, og dette gjør at man må være varsom med å fortolke resultatene fra en slik beregning for bokstavelig. For eksempel er det en rekke holdeplasser som har en liten, men positiv nåverdi. Dette indikerer ikke nødvendigvis at man skal utvide kapasiteten, men kan ligge innenfor et usikkerhetsintervall.

Regneeksemplet viser imidlertid hvordan «kømodellen» kan benyttes i praksis, og at den med overordnede og forenklete forutsetninger gir relativt fornuftige svar på de spørsmålene vi stiller den.

6.6 Test av reisetidsmodellen

Modellen har blitt testet på et utvalg av dagens linjer på bakgrunn av data fra Kolumbus for å teste og kalibrere parameterne. Dette er for å sikre at modellen klarer å gjenskape den faktiske reisetiden til en viss grad, og at den er fleksibel nok til å kunne tilpasses nye busslinjer. Dette innebærer at den er parametrisert på en måte som gjør at man kan tilpasse parameterne for å oppnå et tilstrekkelig godt treff på reisetiden.

Vi gjennomgår nå hvordan modellen kan kalibreres mot den fremtidige bussveien dersom man skal benytte den til forutsigelse av ankomsttid i den automatiske trafikklederen, og hvordan kalibreringen på noen eksempellinjer stemmer overens med virkeligheten.

Validering av modellen

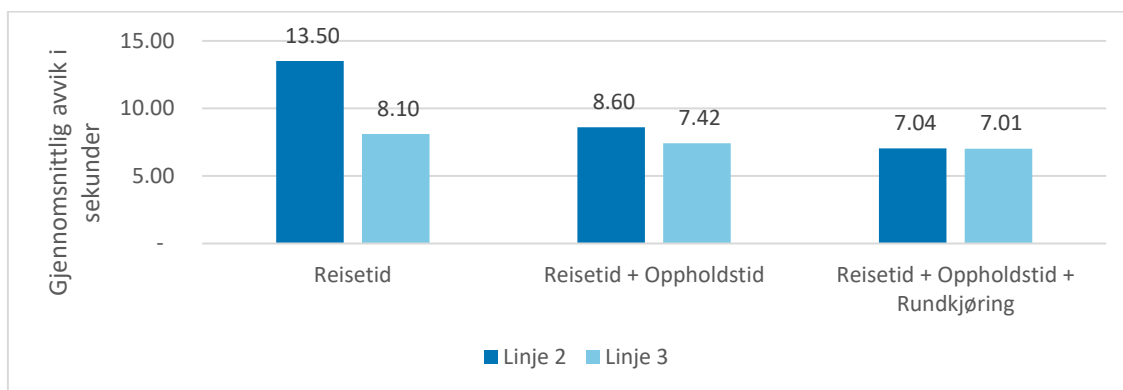
Modellen kalibreres mot faktiske data ved å endre på parameterne til de enkelte undermodellene. Vi bruker så en metode kalt ikke-lineær minste kvadraters metode for å tilpasse parameterne slik at den predikerte reisetiden passer så godt som mulig med den observerte. Selve kalibreringen er dokumentert nærmere i vedlegget.

Kalibrering av modellen har blitt gjennomført ved at vi tester effekten av å inkludere én og én undermodell i den samlede modellen. Dersom vi da finner at en klarer å beskrive tidsbruken ved et mindre antall modeller enn det som er vist ovenfor, vil man kunne benytte en mindre kompleks modell med samme nøyaktighet som en mer kompleks. Etter vår vurdering, er det tilstrekkelig med modellering av ren reisetid, oppholdstid og tid i spesielt belastede rundkjøringer/lyskryss for å oppnå en rimelig grad av nøyaktighet. Øvelsen nå er derfor både å sjekke hvor detaljert modellen bør være, og derigjennom hvilke av formlene ovenfor som man behøver å benytte.

Kalibreringen er gjort for linje 2 og 3 i morgen og ettermiddag i en retning. Vi har lagt til en og en undermodell, og beregnet det gjennomsnittlige avviket mellom modell og data i sekunder, vist i figuren under. I beregningene har vi lagt til grunn parameterne som er kalibrert felles for begge modeller. Dersom man velger å kalibrere parameterne for hver linje separat, får man et bedre treff. Vi har imidlertid forsøkt å finne parameterne som gir en viss grad av generaliserbarhet for å kunne benyttes i simuleringsmodellen.

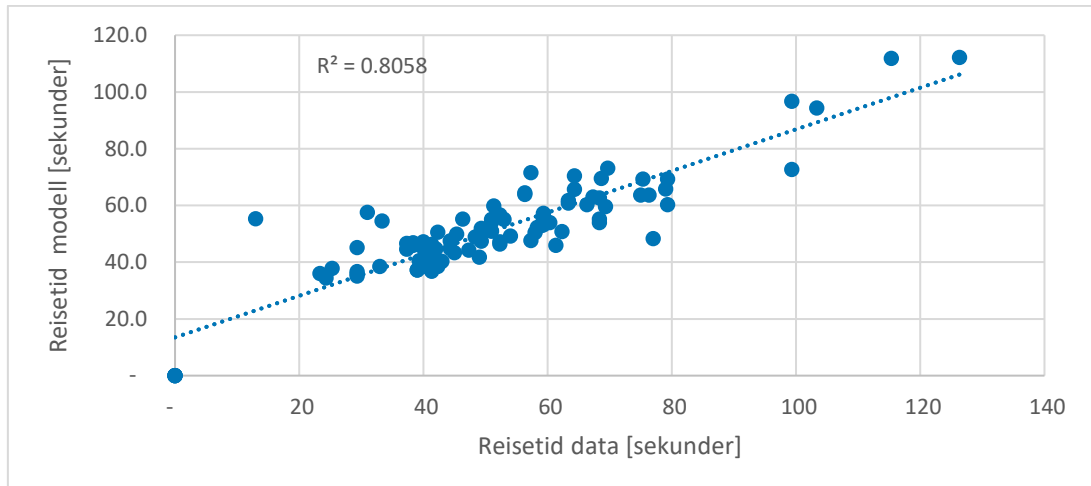
Med kun reisetid, har linje 2 et avvik på ca. 13 sekunder i gjennomsnitt, mens linje 3 har ca. 8.5 sekunder. Når vi legger til effekten av oppholdstid, har linje 2 et gjennomsnittsavvik på 8.6 sekunder, og linje 3 på 7.42. Dette vil si at man i gjennomsnitt har en usikkerhet på for avgangs- og ankomsttidspunktet på omtrent 8 sekunder for de to linjene. Etter at oppholdstiden er lagt til, undersøker vi hvor det fortsatt er større avvik og om det finnes større rundkjøringer eller lyskryss nært holdeplassene. Vi legger dermed til en rundkjøringsstraff for linje 2 på Mariero og Jåttåvågen, samt Madla- og Sundekrossen for linje 3. Dette gjør at avviket reduseres til omtrent 7 sekunder for begge linjer

Usikkerheten i modellen er dermed mellom 8 og 7 sekunder. Vi har ikke tatt med alle rundkjøringer som passerer, og det kan være vanskelig på forhånd å avgjøre hvilke områder som er spesielt utsatt for trafikk. Full kalibrering av reisetiden vil dermed trolig ikke være mulig før man har faktiske data fra bussveien.



Figur 6.13. Forskjell mellom faktisk og predikert tid mellom avganger på to holdeplasser for linje 2 og 3 målt i sekunder. **Beregningene er kun ment til å validere modellen, og øvrige konklusjoner kan ikke trekkes.**

Dersom vi ser på hvordan modellen treffer i gjennomsnitt for begge linjer både morgen og ettermiddag, ser vi at dette er relativt godt. Figuren under angir et kryssplott mellom faktisk og predikert reisetid i sekunder med en trendlinje trukket gjennom. I gjennomsnitt treffer modellen med 82 % nøyaktighet. Når man går ned på hver enkelt linje, vil nøyaktigheten variere noe, siden parameterne er fastsatt på gjennomsnittsnivå. Ved kalibrering mot reisetidsdata på den enkelte linje vil man dermed kunne oppnå en enda høyere forklaringskraft.



Figur 6.14. Kryssplott mellom faktisk og predikert reisetid for linje 2 og 3.

Videre har vi antatt at parameterne er like for alle deler av traseen. Det kan tenkes at disse varierer etter område. For eksempel benytter man kanskje en lavere akselerasjonsrate i områder med lavere fartsgrense enn områder med høy fartsgrense. Slike forhold får vi ikke modellert.

Det er viktig at man ikke overforklarer modellen og gir den så mange frihetsgrader at den får fullstendig tilpasningsmulighet mot datamaterialet. Da sier i prinsippet ikke modellen noe generelt, og er problematisk å benytte på øvrige linjer. Det viktigste er dermed at de parameterne vi har i modellen kan kalibreres slik at vi får en tilfredsstillende sammenheng mellom faktisk og modellert reisetid. Etter vår vurdering har vi oppnådd en slik tilstrekkelig nøyaktighet.

6.7 Anbefalt modell

På bakgrunn av validering og kalibrering av modellen legger vi nå frem en anbefalt modell. Vi har forsøkt å finne frem til en modell som ikke inneholder for mange elementer og som gir en god beskrivelse av reisetiden mellom to holdeplasser.

Det er viktig å understreke at formålet med dette kapitlet har vært å lage en modell som har parametere som er tilstrekkelig fleksible til for å tilpasses til å gi realistiske reisetider. Når Kolumbus eventuelt tar modellen i bruk, er det derfor viktig å vurdere om parametersettet vi har kalibrert gir realistiske reisetider på de konkrete strekningene som benyttes. I vedlegget gis det en mer detaljert beskrivelse av modellen, samt metodikk for å kalibrere den.

Vi anbefaler og bruk den kalibrerte modellen for å beregne reisetid. Etter vår vurdering, gir denne modellen en tilstrekkelig god beskrivelse av reisetiden gitt dens kompleksitet. Den kalibrerte modellen består av følgende deler:

5. Reisetidsmodellen (sjåførmodellen)
6. Den enkleste modellen for simultan oppholdstid

7. Tid for åpning og lukking av dører på seks sekunder
8. Tid i rundkjøring som angitt av relevant formel

Denne modellen gir en god beskrivelse av tidsbruken uten å benytte de mest avanserte formlene, som trolig gjør den enklere å benytte. Vår tanke har vært at det fordelaktig å bruke en relativt enkel modell som beskriver mye av det fenomenet man er interessert i på en tilstrekkelig måte gitt kompleksiteten, og at den er fleksibel nok i parametriseringen for å tilpasses enkeltlinjer.

Videre har vi ikke inkludert tid for å finne ledig oppstillingsplass i modellen. Dette skyldes at regneeksemplene i kapitlet som omhandler modellen viser at dersom man har plass til to busser samtidig, er forsinkelsen veldig liten, selv med et relativt høyt tilbud. For eksempel klarer man minst å ta unna 80 busser i timen med 30 sekunder oppholdstid med to holdeplasser. Denne modellen kan vurderes brukt av Kolumbus dersom superbussen kommer til å dele trase med flere andre busslinjer. I tillegg kan den være aktuell i områder hvor flere av superbusslinjene møtes. Trolig vil denne modellen være mer aktuell på noen enkelte holdeplasser, enn som den av en generell modell.

7 Metode del B: Implementering av strategier

Vi har nå gjennomgått prinsippene bak ulike strategier for trafikkregulering i tidligere kapitlet. En del av oppdraget er å skissere et regelverk som kan implementeres i trafikklederen. Vi skal nå gi en beskrivelse av regelverket som kan implementeres i trafikklederen.

Vi gjennomgår regelverk for følgende strategier:

- Ingen tiltak (referanse)
- Første buss bestemmer
- Intervallregulering
- Forbikjøring

Vi gjennomgår nå hvordan de ulike strategiene kan implementeres matematisk. Dette innebærer at vi definerer et regelverk eller en forenklet optimaliseringsalgoritme som benyttes til å fastslå i hvilken grad en strategi er gunstig å benytte seg av. For å kunne gjøre dette er vi avhengige av en sammensetning av metodikken i kapittel 4, hvor regnereglene for de ulike strategiene implementeres i reisetidsmodellen.

Gjennomføring av reisetidsberegningene vil avhenge av hvilke antagelser man gjør om hvor «lukket» bussvegssystemet er. Et fullstendig lukket system vil ikke ha noen forstyrrelser eller variasjon i reisetid mellom bussene, og er en såkalt **deterministisk** beregning. Her følger alle bussene rutetabellen og ingen avvik eller klumping oppstår. For å kunne vise mer realistiske situasjoner, er det viktig å modellere at bussvegen ikke er fullstendig lukket som system. For eksempel vil noen busser stoppe i lyskryss, mens andre ikke, som gjør at de nærmer seg hverandre. Slike avbrudd kan modelleres som **stokastiske** (tilfeldige).

For å kunne få frem effekten av trafikkregulering, er det viktig å ha en tilstrekkelig god representasjon av problemet det skal løse. Første steg i kapitlet er dermed hvordan man kan modellere klumping og avvik, før man i neste steg kan regne på hvordan de negative effektene av disse kan modereres.

Vi starter med å vise hvordan den deterministiske beregningen kan gjennomføres, før vi går videre til den stokastiske. Til slutt viser vi hvordan de ulike strategiene kan implementeres i rammeverket gjennom å modifisere det.

7.1 Deterministisk reisetid: Ingen forstyrrelser eller variasjon

En viktig del av prosjektet er å utforme funksjoner som beskriver tidsbruk og dynamikken på bussvegen. Samtidig har vi presentert ulike strategier som kan benyttes for å redusere trafikantens belastning. I dette kapitlet gjennomgår vi hvordan man kan sy sammen modellene

og vise hvordan anbefalt modell for tidsbruk på bussveien kan brukes til å beregne reisetidsmålinger ved de ulike strategiene.

Vi har i dette prosjektet antatt at man benytter diskret tid i simuleringsmodulen. For å beskrive dynamikken på bussvegen benytter vi dermed to funksjoner til å beregne ulike hendelser. Begge funksjonene er rekursivt definert.

Avgangstidsfunksjonen angir et tidspunkt $t_1(k)$ for holdeplass k for når bussen kjører fra angitt holdeplass. Dette er en funksjon av ankomsttiden $t_0(k)$ og oppholdstiden $O(A_k, P_k)$, hvor A_k, P_k er henholdsvis avstigende og påstigende, beregnet etter en passende modell. Hele funksjonen er dermed definert som:

$$t_1(k) = t_0(k) + O(A_k, P_k)$$

Ankomsttidsfunksjonen $t_0(k)$ er definert som avgangstiden ved forrige holdeplass, $t_1(k-1)$, pluss reisetiden mellom holdeplass k og $k-1$:

$$t_0(k) = t_1(k-1) + rt(k, k-1)$$

I denne implementasjonen deles anbefalt modell opp i to deler: Oppholdstiden regnes inn i funksjonen for avgangstid, mens kjøretid og tid brukt i rundkjøring/lyskryss regnes inn som en del av ankomsttidsfunksjonen. Siden begge ligningene er gjensidig avhengig av hverandre, er denne «oppdelingen» kun et bokførings spørsmål.

Begge funksjonene er altså rekursivt definert av hverandre. Basistilfellet er gitt ved første holdeplass $k=1$, hvor ankomsttidsfunksjonen gir startpunktet, definert som $t_0(1) = 0$. Da blir $t_1(1) = t_0(1) + O(A_1, P_1) = O(A_1, P_1)$.

Avgangs- og ankomsttidsfunksjonene danner grunnlag for å beskrive dynamikken i bussvegssystemet. Uten noen tillegg, vil de beskrive utviklingen under strategien «ingen tiltak». Man kan så modifisere dem for å modellere/implementere ulike trafikkstyringsstrategier.

7.2 Stokastisk reisetid: Modelling av «klumping» i en simulering

Vi har nå etablert hvilke ligninger man kan bruke til å modellere utviklingen av reisetid på bussveien.

Som nevnt i kapitlet om modellering på bussveien er tid for å finne ledig oppstillingsplass ikke det samme som klumping av busser. Klumping kan oppstå selv om det er tilstrekkelig holdeplasskapasitet fordi klumping oppstår når avgangstidspunktetene til bussene nærmer seg hverandre. For å kunne modellere klumping i en simuleringsmodell, må man derfor benytte en metodikk som reflekterer hvorfor bussene vil nærme seg hverandre. Som vist i kapitlet om intervallreguleringsstrategier, skjer dette fordi det oppstår tilfeldige forstyrrelser langs bussveien. I vår modell har vi inkludert to slike effekter som kan modelleres for å gjenskape klumping i simulatoren: (1) Ulike oppholdstid (2) Stopp i lyskryss/rundkjøring.

Vi starter med å redegjøre for modellering av de to komponentene, før vi beskriver hvordan de kan inkluderes i selve simulatoren.

Ulik oppholdstid

En viktig grunn til at klumping oppstår er ulik oppholdstid på holdeplassene. Dette kan enten skjer fordi ekstra mange personer ankommer, eller påstigningstiden per passasjerer varierer, som angitt av påstigningsmodellen under:

$$T_{Sek} = p \times P + a \times A$$

Når antallet personer som stiger på eller er fast, vil en enkel metode for å modellere klumping være ulikheter i påstigningstid per passasjerer. Dette kan modelleres som en tilfeldig variabel som utgår fra en gjennomsnittlig på/avstigningstid per passasjer \bar{p} , og skalerer denne opp eller ned basert på tilfeldige trekk av tall.

Vi bruker påstigningstid som et eksempel og skriver en realisasjon av påstigningstid per passasjer på en gitt holdeplass \tilde{p}_k . Denne er gitt av følgende ligning:

$$\tilde{p}_k = \bar{p} * q$$

Her er \bar{p} gjennomsnittlig påstigningstid per passasjer. Vi antar at dette snittet er likt per holdeplass, men med mer data kan man også parametrisere denne eller estimere egne parametere for hver holdeplass. Variabelen q er en uniformt fordelt stokastisk variabel, som har en nedre grense q_{min} og en øvre q_{max} :

$$q \sim U(q_{min}, q_{max})$$

q_{min} og q_{max} er parametere som kan settes i simuleringen. Variansen til oppholdstiden er gitt ved $\frac{1}{12}(q_{max} - q_{min})^2$, slik at for å modellere sterkere klumping grunnet ulik oppholdstid, kan man skru differansen opp for å få mer variasjon, som vil være tiltagende i styrke. Man kan så implementere variasjonene direkte i avgangstidsfunksjonen:

$$t_1(k) = t_0(k) + O(A_k, P_k; \tilde{p}_k, \tilde{a}_k)$$

Man modifierer da oppholdstidsfunksjonen slik at den kan oppdatere sine parametere. Man vil da få litt ulike oppholdstid per holdeplass, som gjør at bussene vil nærme seg hverandre, i det en står litt lenger og en annen litt kortere²⁵.

Tid brukt i lyskryss/rundkjøring

Tid brukt i rundkjøringer er lyskryss representerer tilfeldige avbrudd i fremkommeligheten for kollektivtrafikken. Vi regner nå med utgangspunkt i lyskryss som eksempel, men det er relativt

²⁵ Vi anbefaler at man setter $q_{min} = 1/2$ og $q_{max} = 1.5 = 3/2$ som startverdi. Da forblir gjennomsnittlig tidsbruk per passasjer likt som gjennomsnittet i forventning etter reglene for $E(\tilde{p}_k) = \bar{p} * E(q) = \bar{p} \frac{1}{2}(q_{min} + q_{max}) = \bar{p} \frac{1}{2}(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}) = \bar{p}$. I det minste er det fordelaktig at man velger $q_{min} = \alpha \bar{p}$ og $q_{max} = \bar{p} \alpha^{-1}$, $\alpha \in (0,1)$ slik at gjennomsnittet bevares.

enkelt å tilpasse metodikken til rundkjøringer også. Vi tar utgangspunkt i modellene fra metodedel A og skriver sannsynligheten for stopp likt det motsatte av sannsynligheten for ikke stopp:

$$\pi(\text{Stopp}) = 1 - \pi(\text{Ikke Stopp}) = 1 - g/c$$

Her er c sykluslengde og g grøntid målt i sekunder. For å gjøre stoppene tilfeldige, tar vi utgangspunkt i sannsynligheten for å stoppe og trekker en tilfeldig variabel m , uniformt fordelt mellom 0 og 1:

$$m \sim U(0,1)$$

Vi benytter nå m til å avgjøre om man skal stoppe eller ikke. Dersom $m \leq 1 - g/c$, skal man stoppe. Jo høyere g er i forhold til c , jo mindre sannsynlig blir det at dette er tilfellet. Man kan derfor variere forholdet g/c for å endre hvor sannsynlig det er at man foretar et stopp i lyskryss. Dersom $f(m; g, c) = \mathbf{1}_{m \leq 1 - g/c}$ er en såkalt «indikatorfunksjon» lik 1, dersom $m \leq 1 - g/c$ og null hvis ikke, kan vi definere et tillegg til ankomsttidsfunksjonen $\lambda_{kryss}(k)$:

$$\lambda_{kryss}(k) = \sum_{\forall i} \left(f(m_i; g_i, c_i) * \left[\frac{(c_i - g_i)}{2} + \frac{v_k}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right] \right)$$

Her tolkes alle variabler med underskrift « k » som gjeldende mellom $k-1$ og k , og summert over alle kryss i mellom de to holdeplassene. Til sist må man endre ankomsttidsfunksjonen for å at endringene skal trå i kraft. Dette gjøres ved å legge til $\lambda_{kryss}(k)$:

$$t_0(k) = t_1(k - 1) + rt(k, k - 1) + \lambda_{kryss}(k)$$

Et viktig spørsmål er når i simuleringen man regner ut ankomstiden. Normal vil man beregne ankomstiden for k når man forlater $k-1$.

Implementasjon

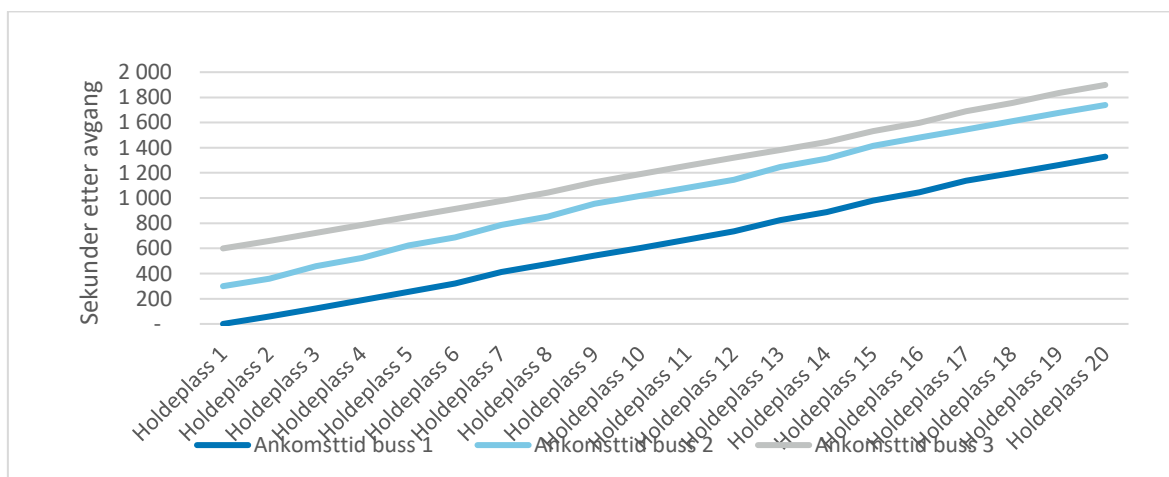
Vi har nå vist hvordan modellene kan settes beregnes på en konsistent måte i simulatoren. Nøkkelfaktoren er når man velger å oppdatere avgangs- og ankomstidene. Vi har antatt at hver buss har sin egen simulering og har satt opp følgende skisse til hvordan man kan implementere metodikken.

Algoritme 7.1: Simulering av «klumping»

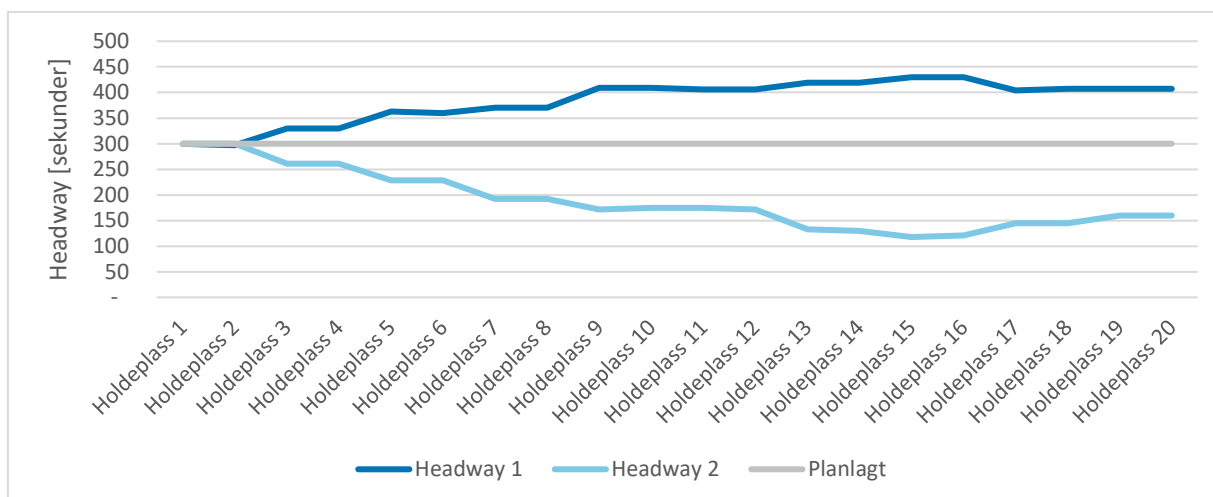
For en gitt buss, implementer følgende ved hendelsene **ankomst** og **avgang**:

1. Ved ankomst ($t_0(k)$):
 - a. Trekk \tilde{p}_k og \tilde{a}_k
 - b. Beregn $t_1(k)$ med oppdaterte parametere
 - c. Oppdater $t_1(k)$
2. Ved avgang ($t_1(k)$):
 - a. Beregn $\lambda_{kryss}(k)$
 - b. Beregn $t_0(k+1)$
 - c. Oppdater $t_0(k+1)$

Under vises to eksempler på bruk av modellen. Her har vi simulert avgangs- og ankomsttider ut fra metodikken ovenfor. Først figur viser et tid-rom-diagram over tre bussavganger som starter 5 minutter fra hverandre. Etter hvert som man fortsetter i ruten, vil buss 2 sakke av, og nærme seg buss 3. Neste figur viser hvordan dette påvirker tiden mellom avgangene. Headway 1 er tiden mellom buss 1 og buss 2, men headway 2 er tiden mellom buss 2 og buss 3. I grått er det tegnet inn den planlagte headwayen på 300 sekunder (5 minutter). Vi ser at når buss 2 sakker akterut, gir dette effekt på headway i begge retninger og øker ventetiden, altså såkalt klumping. I den konkrete simuleringen, er det mulig at man må tilpasse klumpingsparameterne g , c , q_{min} og q_{max} for å få frem effekten ved høyere eller lavere grad av klumping, men figuren under viser altså at modellen illustrerer effekten av klumping.



Figur 7.1. Tid-rom-diagram over busser etter holdeplass. Tre avganger med 5-minutters intervall som nærmer seg hverandre som en følge av tilfeldige variasjoner i oppholdstid og ventetid i lyskryss. **Kun eksempelberegning til illustrativ bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**



Figur 7.2 Faktisk headway mot planlagt headway i simuleringen av klumping. **Kun eksempelberegning til illustrativt bruk og ikke beskrivelse av en faktisk linje.**

7.3 Implementasjon av strategier

Ingen tiltak

Strategien ingen tiltak gjennomføres ved å benytte avgangs- og ankomsttidsfunksjonene uten noen endringer.

Første buss bestemmer

Første buss bestemmer implementeres ved at ingen buss får nærme seg bussen foran, og må opprettholde planlagt avstand til neste buss. For å implementere denne strategien, må man sikre at en gitt avgang aldri er mer enn h antall minutter til neste avgang (hvor h er intervall, eller «headway»). Dermed vil aldri en buss nærme seg mer en h minutter til neste buss, slik at konstante intervaller opprettholdes.

Samtidig kan det være slik at en buss bruker lenger tid på holdeplassen, slik at avstand til neste blir mer enn h minutter. I et slikt tilfelle, kan man enten kjøre fra passasjerer, eller vente. Vi har lagt til grunn at man venter til alle som ønsker det er kommet om bord. Dette skyldes vår tolkning av definisjonen knyttet til første buss bestemmer i utlysningen. Gitt at $t_1^i(k)$ er avgangstid for buss i fra holdeplass k , er denne definert ved følgende funksjon under strategien «første buss bestemmer»:

$$t_1^i(k) = \max(t_1^{i-1}(k) + h, t_0^i(k) + 0)$$

Her er $t_1^{i-1}(k)$ avgangstidspunkt for bussen før i trassen, $t_0^i(k)$ er ankomsttidspunktet for buss i til holdeplass k , og 0 er oppholdstiden. I første buss bestemmer, bytter man derfor ut $t_1(k)$ som angitt under strategien «Ingen tiltak» med uttrykket ovenfor.

Algoritmen er gjengitt i kortform i boksen under.

Algoritme 7.2: Første buss bestemmer

Sett avgangstiden til den største av forrige buss' avgangstid og headway og gjeldende buss' ankomst- pluss oppholdstid.

$$t_1^i(k) = \max(t_1^{i-1}(k) + h, t_0^i(k) + O)$$

Intervallregulering*Valg i implementering*

Intervallregulering er i utgangspunktet en mer kompleks strategi enn første buss bestemmer og ingen tiltak. Strategien kan imidlertid implementeres på flere måter, hvor det finnes en avveining mellom kompleksitet og optimalitet.

Metoden som er benyttet i kapittel 5 benytter en **optimal intervallreguleringstid**, hvor man forsøker å finne den beste intervallreguleringen for hver avgang og holdeplass. I denne implementasjonen beregner man et anslag på den best mulige reguleringen spesielt for hver holdeplass og avgang, slik at man skreddersyr strategien på høyest mulig oppløsningsnivå. Ulempen med implementasjonen er at den er mer kompleks. For de første må man kjøre gjennom en optimaliseringsalgoritme, for det andre må man beregne en del ekstra verdier (ventetidstap på hver den enkelte buss og holdeplass).

Ved enkel intervallregulering velger man en langt enklere implementasjon, men med mindre treffsikkerhet og mulig større avstand til det beste utfallet. I denne implementasjonen blir ikke intervallreguleringstiden skreddersydd hver avgang eller holdeplass. Man oppnår derfor potensielt sett en noe lavere forbedring enn det som er mulig.

Vi har valgt å presentere to ulike implementasjoner av strategien for å kunne gi Kolumbus' mulighetsrom for å tilpasse avveiningen mellom forbedring av systemets ytelse og kompleksitet. I dette prosjektet har vi ikke test forskjell i ytelse mellom de to strategiene, hvilket kan være et formål i det videre arbeidet for å avdekke hvor mye lavere ytelse man oppnår med en enklere strategi.

Enkel intervallregulering

Enkel intervallregulering ser på avgangstiden for en gitt buss i og sammenligner dette med avgangstiden til den forrige avgangen, $i-1$. Denne metoden er en forenklet versjon av metodikken presentert i (Fu & Yang, 2011). Dersom avstanden mellom de to avgangene er mindre enn et forhåndsdefinert andel av planlagt tid mellom avgangene, γ , må bussen vente, der β er en andel av planlagt intervall mellom avgangene.

I metoden definerer man en justert avgangstid $\tilde{t}_1^i(k)$, som fastsettes av algoritmen angitt under.

Algoritme 7.3: Enkel intervallregulering

Hvis $t_1(k)^i - t_1(k)^{i+1} < \gamma h$

$$\tilde{t}_1(k)^i = t_1(k)^i + \beta(t_1(k)^i - t_1(k)^{i+1} - \gamma h)$$

Hvis ikke

$$\tilde{t}_1(k)^i = t_1(k)^i$$

En viktig del av metoden er å velge parameterne β og γ . Det finnes ikke noe forhåndsdefinert gitt svar på hvor store disse størrelse skal være. I prinsippet vil man forvente at de er lavere jo høyere frekvens man har, siden ventetiden da allerede er lav.

En enkel metode for å tilpasse parameterne er å se på deres effekt på de ulike KPI-parameterne, og deretter justere dem for å oppnå en bedre ytelse av systemet. Sådanne passer den enkle intervallreguleringen godt inn i en setting hvor man benytter kunstig intelligens for å kontinuerlig oppdatere de parameterverdiene som gir best verdi på KPI.

I modellen som ble presentert i kapittel 5 gjorde vi en rekke tilleggsforsøk, hvor vi kom frem til at ved $h = 20$, er $\beta = 0.6$ og $\gamma = 7/8$ er god startverdi. Man kan her vurdere om γ skal settes noe lavere, slik at ikke alle busser reguleres.

Optimal intervallregulering

Vi gjennomgår nå hvordan modellen som beregner optimal intervallregulerings tid er bygd opp. Modellen er ment å fungere ved hjelp av inndata fra et sanntidssystem som oppdaterer den på posisjonen til de ulike bussene, antall passasjerer om bord og antall som venter på holdeplass (hvis tilgjengelig). På linje med modellen utviklet av (insert sør-amerika), antar vi at optimeringen gjennomføres hver gang en buss ankommer en holdeplass. Man beregner da optimal intervallregulerings tid for bussen, og gir instruksjoner til føreren.

Det er to typer kostnader i modellen: Ventetids- og forsinkelseskostnader. Vi starter med å utvikle modellen fra den første kostnaden.

Grunnlaget for ventetidskostnadene er tiden mellom hver avgang og hvordan denne påvirkes av forsinkede busser. La realisert, gjennomsnittlig tid mellom avgangene (headway) være definert ved:

$$\overline{E(H)} = \frac{E(H)}{2} (1 + cv^2)$$

Her er $E(H)$ gjennomsnittlig tid mellom avgangene ved faste intervaller. Det betyr at $E(H) = N^{-1} \sum H_{ij}$, hvor H_{ij} er tiden mellom avgang i og j, og N er totalt antall avganger.

Videre er cv^2 variasjonskoeffisienten til headway, definert som standardavviket til headway, delt på gjennomsnittet, kvadrert – dette blir da:

$$cv^2 = \left(\frac{SD(H)}{E(H)} \right)^2 = \frac{Var(H)}{E(H)^2}$$

Variansen til headway beregnes med den «vanlige» formelen for varians:

$$Var(H) = \frac{1}{N} \sum_{ij} (E(H) - H_{ij})^2$$

Hvor alle ledd har samme definisjon som tidligere. Formelen $\widehat{E(H)}$ viser dermed hvor mye man venter i gjennomsnitt per passasjer. Neste steg er å beregne totalt tidstap for alle passasjerer, som innebærer at vi må beregne hvor mange som påvirkes.

Dersom vi antar at antall passasjerer som ankommer en gitt holdeplass er konstant per tidsenhet og lik λ^k for holdeplass k , betyr dette at totalt antall passasjerer fra buss

$$P = \lambda^k(t_1 - t_2)$$

Hvor t_1 og t_2 er to tidspunkt. Hvis man forsinket en buss, vil dette påvirke alle passasjerer som ankommer i tidsrommet mellom avgangstiden til bussen som ankommer etter, og bussen foran i traseen. Dermed blir totalt antall passasjerer lik $\lambda^k(t^{i+i} - t^{i-i})$, hvor t^{i+i} er ankomsttiden for den påfølgende bussen, og t^{i-i} for bussen foran i traseen. Denne formelen tar hensyn til at en endring i avgangstid gir konsekvensen foran og bak. Med denne formelen er det viktig å unngå dobbelttelling av antall passasjerer. Vi kan nå sette inn elementene i samme ligning og forenkle. Det totale antallet minutter (T_k) for avgang i på holdeplass k blir nå²⁶:

$$T_k^i(t_r) = 2\lambda^k f(t_r)$$

Her er funksjonen $f(t_r)$ variansen til avgangstidene før og etter bussen som potensielt skal intervallreguleres. Den gjennomsnittlige minimumsventiden blir nå $\mu_i = \frac{1}{2}(t^{i+i} - t^{i-i})$.

Variansen blir da lik:

²⁶ Fremkommer ved å forenkle:

$$T_k = \lambda^k \widehat{E(H)}_k (t^{i+i} - t^{i-i}) = \frac{(t^{i+i} - t^{i-i})}{2} \left(1 + \frac{2f(t_r)}{(t^{i+i} - t^{i-i})^2} \right) \lambda^k (t^{i+i} - t^{i-i})$$

Man får da:

$$T_k^i(t_r) = \lambda^k \left(\frac{(t^{i+i} - t^{i-i})^2}{2} + 2f(t_r) \right)$$

Siden t^{i+i} og t^{i-i} er faste i hvert steg av optimeringen (=konstante, uten relevans for optimeringen), kan uttrykket forenkles til

$$T_k^i(t_r) = 2\lambda^k f(t_r)$$

$$f(t_r) = \frac{1}{2} \left([(t^{i+i} - t_k^i) - \mu_i]^2 + [(t_k^i - t^{i-i}) - \mu_i]^2 \right)$$

Dermed ender vi opp med det forenklete uttrykket:

$$T_k^i(t_r) = \lambda^k \left([(t^{i+i} - t_k^i) - \mu_i]^2 + [(t_k^i - t^{i-i}) - \mu_i]^2 \right)$$

Dette uttrykket er kun en omskriving av variansen til avgangstidene. Jo høyere varians, jo høyere ventetidskostnader. Formelen uttrykker helt enkelt at vi minimerer ventetiden ved å minimere den vektete variansen.

Kontrollvariabelen er nå hvor lenge buss i skal holde igjen på holdeplass k , t_r^i . Den faktiske avgangstiden (t_k^i) er sammensatt av planlagt (p_k^i) og intervallreguleringstid (t_r^i), slik at $t_k^i = p_k^i + t_r^i$.

For å vurdere om en forsinket buss m skal lede til at bussen bak skal holdes igjen, kan man nå minimere kontrollfunksjonen:

$$Z_k = (1 - \alpha) t_r^j O_k^j + \alpha \sum_k T_k^j(t_r^j)$$

Her er α den vekten man legger på ventetidskostnadene, og $1 - \alpha$ vekten til forsinkelse, hvor $\alpha \in [0,1]$. Forsinkelseskostnaden ved å vente på holdeplass k for buss j er lik antall minutter man venter t_r^j , ganger antall personer om bord O^j . Sistnevnte størrelse er lik differansen mellom antall som satt på ved ankomst, pluss antall påstigende, minus antall avstigende $O_k^j = O_{k-1}^j + P_k - A_k$. Ventetidskostnadene påvirkes for alle påstigende etter stasjonen hvor reguleringen foretas slik, at man må telle med alle leddene etter nåværende stasjon.

Dersom intervallet mellom bussene er likt på hver holdeplass, kan man forenkle beregningen. Med dette menes ikke at tiden mellom hver buss ankommer er lik, men at forskjellen er den samme på alle holdeplasser. Da blir $f(t_r)$ den samme på alle holdeplasser og man kan da erstatte $\sum_k T_k^j(t_r^j) = 2f(t_r) \sum_k \lambda^k$, slik at man får:

$$Z_k = (1 - \alpha) \times t_r^j O_k^j + \alpha \times 2f(t_r) \sum_k \lambda^k$$

Som er en mye enklere modell å beregne, og som vi har brukt i våre illustrerende beregninger. I vår modell har vi antatt at holdeplassen forsinkelsen oppstod på er reguleringsholdeplass. Det finnes litteratur som undersøker hva som er den optimale reguleringsholdeplassen, men for å gjøre modellen enklere å implementere, har vi valgt å bruke egen holdeplass som reguleringssted.

Til sist hører det også med noen bibetingelser. Først kan ikke avgangstiden for bussen som reguleres komme nærmere enn h_0 minutter for bussen bak som en sikkerhetsmargin for tid mellom avgangene:

$$t_k^{i+1} - h_0 \geq t_k^i$$

Implikasjonen av dette er at intervallreguleringstiden aldri kan overstige sikkerhetsmarginen. For det andre kan ikke optimal intervallreguleringstid være lavere enn den planlagte avgangstiden. Dette innebærer at bussen ikke forlater holdeplassen før rutetabellen tilsier det:

$$t_n \geq t_0$$

Her er t_0 planlagt avgangstid (som fastsatt i rutetabellen) og t_n er avgangstid for avgang n .

Modellen er et ikke-linært programmeringsproblem med en kontinuerlige beslutningsvariabel. Variansfunksjonen gjør en analytisk løsning av problem utfordrende, men et slikt problem kan enkelt løses ved hjelp av en numerisk algoritme. Her finnes det flere muligheter. Siden variansfunksjonen er konveks, blir Z_k også konveks. Funksjonen har dermed et globalt optimum slik at enkle teknikker kan brukes.

Den enkleste metoden er å bruke såkalt gradient-nedstigning. Med denne algoritmen, starter man med en gjetning på den optimale verdien t_S^0 . Videre fastsetter man en konvergenzkriterium, ϵ .

Algoritmen er som følger:

Algoritme 7.4: Gradient nedstigning med begrensning

1. Mens $|Z'_k(t_n)| \geq \epsilon$
 - a. Hvis $t_n \geq t_k^{i+1} - h_0$ (avstand til kjøretøy foran)
 - i. $t_n = t_k^{i+1} - h_0$
 - ii. Avslutt
 - b. Else if $t_n \leq t_0$ (Avvik fra rutetabellen)
 - i. $t_n = t_0$
 - ii. Avslutt
 - c. Else (Regner ny iterasjon)
 - i. $t_{n+1} = t_n - \beta Z'_k(t_n)$
 - d. $n = n + 1$
2. Returner t_{n+1}

Her er β en parameter som forteller hvor store steg man tar av gangen. Denne kan settes dynamisk, eller som en konstant. En for høy β vil kunne gjøre at man bommer på minimum, mens setter man den lavt, kan beregningstiden øke. I en såpass enkel modell som vår, kan det holde å sette β til et lavt tall, for å gjøre implementeringen enklere, uten å få stor økning i beregningstiden.

Uttesting av metoden viste at i praktiske situasjoner kan det være fordelaktig å beregne den deriverte med utgangspunkt i avvikstoleransen, ε . Hvis man setter lengdeparameteren i beregningen for høyt, kan dette gi gal verdi på del deriverte rundt punktet man ser på. Tester viste at følgende beregning av den deriverte ga robuste resultater:

$$Z'_k(t_S^{n+1}) = \frac{Z_k(t_r + \varepsilon) - Z_k(t_r)}{\varepsilon}$$

Denne metoden konvergerer raskt mot et optimum. I våre tester brukte vi $\beta = 0.1$, $\varepsilon = 0.01$.

Implementasjon

Strategien implementeres ved å legge til en et ekstra ledd på avgangstidenfunksjonen. Ved enkel intervallregulering, blir avgangstiden gitt direkte fra $\tilde{t}_1(k)^i$ i algoritme 2. Ved optimal intervallregulering, blir avgangstiden gitt av:

$$t_1(k) = t_0(k) + O(A_k, P_k) + t_r$$

Hvor t_r er optimal intervallreguleringstid som beregnet med algoritme 3.

Forbikjøring

Modell for optimal stasjonshopping tar utgangspunkt i samme rammeverk som modellen for intervallregulering. Hovedforskjellen er nå at vi ikke lenger benytter en kontinuerlig verdi på hvor mye ventetiden endres, men en «enten-eller» variabel. Vi har i denne rapporten valgt å holde oss til å vurdere forbikjøring av en holdeplass. Forbikjøring av flere holdeplasser samtidig er et noe mer komplekst problem, og vi anbefaler at man vurderer å implementere en slik strategi først etter et den noe enklere en utprøvd.

Grunnstein i modellen er hvor mye tid man kan spare ved å kjøre forbi en holdeplass. Det er to størrelser som er viktige. Tid til forrige avgang og tid til neste avgang, henholdsvis $h(x_k)^{i-1}$ og $h(x_S)^{i+1}$ som en funksjon av variabelen x_S , definert som:

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{hvis man kjører forbi holdeplass } k \\ 0 & \text{hvis man stopp på holdeplass } k \end{cases}$$

Dette er variabelen man benytter til å beregne om det er gunstig å kjøre forbi en holdeplass eller ikke. Headway til neste buss er nå definert som:

$$h(x_k)^{i-1} = (t_i^A - t_i^B)x_k - \beta P_k + h - d$$

Her er t_i^A tiden man bruker på å kjøre fra holdeplass $k-1$ til $k+1$ uten forbikjøring og t_i^B med forbikjøring (disse blir definert nærmere under) i minutter. P_k er antall påstigende på holdeplass k (som venter), mens β er antall minutter per påstigende. Videre er h planlagt headway og d er forsinkelse (som også kan være lik null, men er tatt med for å vise det generelle tilfellet).

Endring i headway til neste buss er gitt ved nesten samme ligning:

$$h(x_k)^{i+1} = (t_i^B - t_i^A)x_k + \beta P_k + h + d$$

Her er noen av fortegnene snudd siden avstanden øker, og ikke avtar, i motsetning til forrige avgang. Tidsbruk uten forbikjøring er lik tiden fra holdeplass $k-1$ til k , og deretter fra k til $k+1$. Mens tidsbruk med forbikjøring er tiden det tar **direkte** fra $k-1$ til $k+1$. Årsaken til at disse to er forskjellige ligger i at man unngår å starte og stopp ved holdeplass k , samt hente de påstigende.

Vi bruker her definisjonen av reisetidsfunksjonen t som en funksjon av avstand fra nåværende til neste holdeplass. Dette gir dermed den rene reisetiden, pluss eventuell tid brukt i lyskryss eller rundkjøringer. Tidsbruk uten forbikjøring kan beregnes rett ut med ligning:

$$t_i^A = t(M^{k-1,k}) + t(M^{k,k+1})$$

Tidsbruk med forbikjøring blir gitt av følgende ligning

$$t_i^B = t(M^{k-1,k} + M^{k,k+1})$$

Her er $M^{k-1,k}$ avstand fra $k-1$ til k , og $M^{k,k+1}$ fra k til $k+1$. Siden reisetidsfunksjonen t er konkav vil man alltid ha at tiden med forbikjøring er lavere enn uten:

$$t_i^A \geq t_i^B$$

Sagt på en annen måte vil vi aldri tape reisetid på en forbikjøring. Som i modellen for optimal intervallreguleringstid, regner vi inn antall passasjerer ved hjelp av avgangstid til foregående og påfølgende avgang ut fra påstigningsrate per minutt λ^k :

$$P_k = \lambda^k(t^{i+1} - t^{i-1})$$

Vi kan nå sette $h(x_k)^{i-1}$ og $h(x_k)^{i+1}$ inn i funksjonen for beregning av forventet ventetid som også tar høyde for ujevne intervaller fra kapitlet om optimal intervallreguleringstid:

$$f(x_k) = \frac{1}{2} \left([h(x_k)^{i-1} - \mu_i]^2 + [h(x_k)^{i+1} - \mu_i]^2 \right)$$

På akkurat samme måte som i modellen for optimal intervallreguleringstid blir nå kostnadene ved ujevne intervaller gitt ved ligningen:

$$2f(x_k) \sum_{i>S}^{N_S} \lambda^k$$

Der vi setter inn for $f(x_k)$. For å ta med effekten for de som sitter om bord på bussen og får reduserte forsinkelser ved forbikjøring må vi ta antall om bord ved holdeplass $k-1$ og trekke fra de som skal gå av på holdeplass k : $D_{k-1} = O_{k-1} - A_k$. Tidsgevinst for de om bord for denne gruppen er nå

$$g(x_k) = x_k D_i (t_i^A - t_i^B - \beta P_k)$$

Tidstapet for de som skal av og på er gitt ved:

$$q(x_k) = x_k(A_k + P_k)h$$

Hvor h er tid til neste avgang. Vi har her antatt at de som må gå av på holdeplassen før de forbikjørte tilsvarer antallet som vil gå av på den forbikjørte holdeplassen, k . Disse antas å vente på neste buss som kommer, og det samme gjelder for påstigende ved holdeplass k . Vi har her antatt at holdeplass $k-1$ og k har lik frekvens, slik at h er lik for begge holdeplasser.

Setter vi nå hele uttrykket sammen med vektor w får vi følgende kontrollfunksjon:

$$H(x_k)_{k-1} = w_1 q(x_k) + w_2 g(x_k) + w_3 2f(x_k) \sum_{i>k}^{N_S} \lambda^i$$

Denne funksjonen viser nytten av å kjøre forbi holdeplass k , sett fra holdeplass $k-1$. Vektene som er definert kan benyttes til å reflektere ulike trafikantpreferanser. I våre beregninger har vi satt dem lik 1.

Algoritme 7.5: Uttømmende søk av optimal forbikjøringsplass

Aktiveringshendelse: Klokketid er lik avgangstid for buss i ved holdeplass $k-1$ og vurderer om man skal kjøre forbi holdeplass k

Max = 0

Holdeplassnummer = Null

1. For alle stopp $h>k$:
 Hvis $H(0)_h - H(1)_h > Max$
 Max = $H(0)_h - H(1)_h$
 Holdeplassnummer = h
2. Returner Holdeplassnummer

Løsningsalgoritmen er veldig enkel, der man sjekker alle muligheter ut fra holdeplassen man står ved. Dette er også metoden som er brukt i Sun & Hickman (2005). I de fleste anvendelser vil ikke beregningstiden være spesielt stor. Så lenge man gjentar beregningen for hver enkelt buss for hver gang den skal til å kjøre fra en holdeplass, vil beregningen kunne gjennomføres i lineær tid. At man kun ser på en enkelt buss av gangen gjør problemet enklere. Samtidig kan dette føre til at man ikke ser muligheter for hvilken konkret buss som er best egnet til en eventuell forbikjøring.

Implementasjon

Uten forbikjøring, følger avgangs- og ankomsttidsfunksjonene samme mønster som under «ingen tiltak». Dersom man imidlertid gjennomfører en forbikjøring, må avgangs- og ankomsttidene oppdateres.

Ankomst- og avgangstid ved den forbigjorte holdeplassen blir nå satt til uendelig, slik at man aldri når den:

$$t_1(k) = t_0(k) = \infty$$

I praksis kan man sette tiden til slutten av hele perioden man gjennomfører simuleringen for +1 minutt. Videre blir ankomsttid for holdeplass k+1 gitt ved:

$$t_1(k + 1) = t(M^{k-1,k} + M^{k,k+1})$$

Etter disse to oppdateringene, fortsetter man å benytte hovedsystemet som normalt.

7.4 Oppsummering

Vi har nå gjennomgått hvordan de ulike strategiene kan implementeres i den automatiske trafikklederen.

Vi startet med å definere to viktige funksjoner kalt avgangs- og ankomstidsfunksjonen. Disse funksjonene er rekursivt definert og gjensidig avhengig av hverandre, og gjør at man kan benytte de ulike modellene fra metodedel A til å beregne tilstandsvariable for bussene i trafikkledersystemet i diskret tid.

Avgangs- og ankomstidsfunksjonene er inngangsporten for å integrere funksjonene som modelleres tidsbruk på bussveien med de ulike strategiene. Funksjonene fra metodedel A beskriver sammen med avgangs- og ankomstidsfunksjonen hvordan systemet utvikler seg uten inngripen. Vi har også vist hvordan tilfeldigheter kan modelleres for å gjenspeile såkalt «klumping» av avgangene. Deretter kan strategiene beregnes.

Det kreves en rekke data for å kunne gjennomføre beregningene. Under har vi satt opp en tabell som viser hvilke data man behøver for å beregne de ulike KPI-ene og modellene.

Videre behøver man å bestemme vekt for de ulike kostnadselementene. I tråd med diskusjonen i kapittel 3, anbefaler vi at man vekt både «vanlig» forsinkelse og ekstra ventetid som forsinkelse. Dette betyr i praksis at man benytter samme vekt i for alle leddene i kostnadsfunksjonene.

Tabell 7.1. Oversikt over nødvendig data til modellberegninger og KPI.

Data	KPI				MODELL		
	Ventetid	Forsinkelse	Trengsel	Reisetid	Oppholdstid	Kjøretid	Tid i lyskryss
Planlagt og faktisk ankomsttid		X		X			
Planlagt og faktisk avgangstid	X			X			

Distanse mellom holdeplasser					X	
Avstigende per holdeplass				X		
Påstigende per holdeplass				X		
Tid per påstigende				X		
Tid per avstigende				X		
Tid for åpning og lukking av dører				X		
Akselerasjon					X	X
Retardasjon					X	X
Sykluslengde						X
Grøntid						X
Fartsgrense					X	X
Kapasitet per buss			X			
Antall personer om bord			X			

8 Referanser

APTA BRT Operations Working Group (2010) *Operating a Bus Rapid Transit System*. APTA-BTS-BRT-RP-007-10. Washington DC, United States: American Public Transportation Association, p. 17.

AtB, 2016. Fremtidig rutestruktur med superbuss i Stor-Trondheim 2019-2029.

Sammendragsrapport med anbefalinger. Tilgjengelig fra:

https://www.atb.no/getfile.php/132275/Rapporter/AtB_Framtidig_rutestruktur_2019-2029_Sammendragsrapport_13.05.16.pdf (Oppsøkt 20.10.16)

APTA Bus Rapid Transit Working Group (2010) *Bus Rapid Transit Service Design*. APTA-BTS-BRT-RP-004-10. Washington DC, United States: American Public Transportation Association, p. 27.

APTA Bus Standards Program and APTA Bus Rapid Transit Working Group (2012) *Implementing BRT Intelligent Transportation Systems*. APTA-BTS-BRT-RP-005-10. Washington DC, United States: American Public Transportation Association, p. 34.

Barnett, A. (1974): On Controlling Randomness in Transit Operations, *Transportation Science*, Vol. 8, No.2, pp102-116

Bayle, R. (2012) 'Identifying the performance parameters of importance in the design of Bus Rapid Transit: an experimental framework using microscopic simulation', p. 49.

Breithaupt, M. *et al.* (2014) *The BRT Standard*. 2014 Edition. The Institute for Transportation and Development Policy (ITDP), p. 60.

Copenhagen Metro Service (2016) *Årsrapport 2015*. *Metroselskabet I/S*. Copenhagen: Copenhagen Metro Service, p. 59.

Dhingra, C. (2012) *Measuring Public Transport Performance. Lessons for Developing Cities*. Sustainable Urban Transport Technical Document 9. Berlin: GIZ på vegne av Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, p. 50.

Eberlein, X.J, N.H.M. Wilson, D. Bernstein (1999): *Modelling Real-Time Control Strategies In Public Transit Operations*. *Computer-Aided Transit Scheduling* (N H. M. Wilons (ed.)). Springer Verlag.

Gemeente Almere (2012a) *Mobiliteitsplan Almere. Veilig en gezond op weg. Deel I. De hoofdlijnen*. Almere: Bus public transport team Gemeente Almere, p. 16.

Gemeente Almere (2012b) *Mobiliteitsplan Almere. Veilig en gezond op weg. Deel II. Bundeling en onderboring*. Almere: Bus public transport team Gemeente Almere, p. 71.

Gemeente Almere (2017) 'Thermometer Concessies Stadsdienst Almere en Almere Streek', p. 53.

Gibson, J., L. Willumsen (1989): Bus-stops, congestion and congested bus-stops. Traffic engineering and control, 1989

Gran, K., A. Larsson (2013): Kapasitet på holdeplasser og i kollektivfelt. Sweco, rapportnr. 3.

Gu, W., Li, Y., Cassidy, M. J., & Griswold, J. B. (2011). On the capacity of isolated, curbside bus stops. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(4), 714-723.

Jernbaneverket (2012) *Slik fungerer jernbanen. En presentasjon av trafikksystemets infrastruktur*. Oslo: Jernbaneverket. Available at: http://www.jernbaneverket.no/contentassets/55a947e1337748beaee3839e8f34f806/slikfungerjernbanen_2012_web_oppsl.pdf (Accessed: 18 October 2016).

Kaparias, I. and Bell, M. G. H. (2011) *Key performance indicators for traffic management and Intelligent Transport Systems*. 3.5. London: Imperial College London for Coordination Of Network Descriptors for Urban Intelligent Transport Systems (CONDUITS), p. 73.

Kittelson & Associates, United States. Federal Transit Administration, Transit Cooperative Research Program, & Transit Development Corporation. (2003). *Transit capacity and quality of service manual* (No. 100). Transportation Research Board.

Manual, H. C. (2000). Highway capacity manual. *Washington, DC*, 11.

Metroselskabet (no date a) *Facts om metroen, Copenhagen Metro*. Available at: <http://www.m.dk/om+metroen/facts+om+metroen> (Accessed: 16 May 2017).

Metroselskabet (no date b) *Metro expansion, Copenhagen Metro*. Available at: <http://intl.m.dk/about+the+metro/metro+expansion> (Accessed: 30 August 2017).

Metroselskabet (no date c) *Metroen i tal, Copenhagen Metro*. Available at: <http://www.m.dk/om+metroen/facts+om+metroen/statistik> (Accessed: 30 August 2017).

Metroselskabet (u.d.). *Metroens styresystem*. Tilgjengelig fra: <http://www.m.dk/#!/om+metroen/facts+om+metroen/metroens+styresystem> (Oppsøkt 16.02.18).

Muñoz, J. C. (2017) 'Connected and automated buses. An opportunity to bring reliability to bus service.' Pontificia Universidad Católica de Chile, 8 December. Available at: <https://www.slideshare.net/BRTCoE/juan-carlos-muoz-connected-and-automated-buses-an-opportunity-to-bring-reliability-to-bus-service> (Accessed: 9 March 2018).

Norconsult (2009) *Fornebubanen. Sluttrapport trasé- og konsekvensutredning*. Ruterrapport 2009:17. Oslo: Ruter AS, p. 96. Available at: https://ruter.no/globalassets/dokumenter/ruterrapporter/2009/17-2009_fornebu_sluttrapport_des2009.pdf (Accessed: 21 October 2016).

Norheim, B. and Ruud, A. (2007) *Kollektivtransport. Utfordringer, muligheter og løsninger for byområder*. 1st edn. Oslo: Statens vegvesen Vegdirektoratet. Available at: https://www.vegvesen.no/_attachment/58564/binary/2159 (Accessed: 16 August 2017).

Payne, S. (2015) *Key Performance Indicators for Intelligent Transport Systems. Final Report*. Bristol, UK: AECOM på vegne av DG Mobility and Transport (MOVE), p. 185.

Ristesund, Øystein, Frøyland, P. and Simonsen, S. (2015) *Studierapport. Kollektivtrafikk-løsninger i Frankrike, Belgia og Nederland*. Oslo: Statens vegvesen Vegdirektoratet. Available at: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/302451/Studierapport-Frankrike-Belgia-Nederland%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed: 12 April 2018).

Ruter AS (2011) *K2012. Ruters strategiske kollektivtrafikkplan. 2012-2060*. 2011:10, versjon 2.0. Oslo: Ruter AS, p. 122.

Siemerink, E. (2018) 'Note on BRT and Traffic Management'. Gemeente Almere.

Sun, A., M. Hickman (2005): The Real-Time Stop Skipping Problem. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol 9., No. 2, pp 91-109.

Statens vegvesen (2014) *Konsekvensanalyser. 1.1*. Oslo: Statens vegvesen Vegdirektoratet (Håndbok, V712). Available at: http://www.vegvesen.no/_attachment/704540/binary/1132472?fast_title=H%C3%A5ndbok+V712+Konsekvensanalyser.pdf (Accessed: 2 November 2016).

Sztrik, J. (2012). Basic queueing theory. *University of Debrecen, Faculty of Informatics, 193*.

The CONDUITS European project (2013) 'The CONDUITS Key Performance Indicators', p. 4.

Transit Cooperative Highway Research Program, 2013. Kapittel 5: "Quality of Service Methods" i "Transit Capacity and Quality of Service Manual" (rapport). Washington DC (USA): Transport Research

Vuk, G. (2005) 'Transport impacts of the Copenhagen Metro', *Journal of Transport Geography*, 13(3), pp. 223–233. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2004.10.005.

Valencia, A., R., Fernandez (2011): Macroscopic simulation approach of public transport on exclusive lanes, European Transport Conference, 2011, Glasgow, Scotland, UK

Yang, X., Gao, Z., Zhao, X., & Si, B. (2009). Road capacity at bus stops with mixed traffic flow in China. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2111), 18-23.

Whitt, W. (1993): Approximations for the GI/G/m queue. *Production and operations management*, Vol. 2, No. 2, 1993

Zhao, J., Dessouky, M., & Bukkapatnam, S. (2006). Optimal slack time for schedule-based transit operations. *Transportation Science*, 40(4), 529-539.

Vedlegg

Definisjoner / ordbok

Intelligente transportsystemer (ITS)

Intelligente transportsystemer (ITS) omfatter alle løsninger som i en eller annen form benytter informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT) i et trafikk- eller transportsystem. ITS i kjøretøy består av ulike typer kjøretøyteknologi, førerstøttesystemer, informasjonstjenester og mobile løsninger, mens ITS langs vegen inkluderer i hovedsak variable skilt og signaler samt elektroniske systemer som har til hensikt å informere og varsle trafikanter, styre og overvåke trafikken. ITS kan benyttes til å påvirke trafikanten til å endre adferd slik at man oppnår en forbedring i trafikksituasjonen, og er dermed et viktig verktøy for å løse utfordringer i transportsystemet. Det gjør det også mulig for kollektive transportforvaltere å bytte fra en reaktiv til en proaktiv tilnærming når det kommer til styring av kollektivtransporten.

Automatisk trafikkleder eller automatisk trafikkstyring

Automatisk trafikkleder eller automatisk trafikkstyring betegner automatisk styring av trafikkstrømmer (personer, kjøretøy og gods). Dette gjøres gjennom trafikkinformasjon, etterspørselsstyring, trafikkregulering og andre tiltak. Hensikten er å holde transportsystemet tilgjengelig, fremkommelig, sikkert og miljømessig holdbart²⁷. I tabellen under beskrives enkelte automatiske trafikkstyringsmetoder og dets fordeler, samt eksempler på BRT-systemer som benytter dette i dag (APTA Bus Standards Program and APTA Bus Rapid Transit Working Group, 2012).

²⁷ Statens vegvesen (2010). «Trafikkstyring».

<https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/Forskning+og+utvikling/Avsluttede+FoU-program/ITS+pa+veg+mot+2020/Kunnskapsinnhenting/Trafikkstyring/trafikkstyring--100577>. Oppsøkt 04.01.18.

Oversikt over BRT-løsninger med kontrollrom

BRT-løsninger med kontrollrom

Tabell 3 Oversikt over BRT-løsninger med kontrollrom i Europa, Nord-Amerika og Oseania²⁸

Region	Country	City	Value	Year	Source
Europe	Finland	Helsinki	All	2013	www.hsl.fi
Europe	France	Belfort	All	2014	info.optymo.fr
Europe	France	Cannes	All	2014	www.silteplait.info
Europe	France	Châlon-sur-Saône	All	2014	www.buszoom.com
Europe	France	Evry	All	2014	www.bus-tice.com
Europe	France	Le Mans	All	2016	www.francebleu.fr
Europe	France	Metz	All	2013	lemet.fr
Europe	France	Nantes	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	France	Nîmes	All	2015	www.nimes-metropole.fr
Europe	France	Paris	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	France	Rouen	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	Germany	Essen	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	Germany	Oberhausen	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	Netherlands	Amsterdam	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	Sweden	Gothenburg	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	Switzerland	Zurich	All	2011	COST - European Cooperation in Science and Technology
Europe	Turkey	Istanbul	All	2012	www.worldbrt.net
Europe	United Kingdom	Cambridge	All	2015	www.thebusway.info
Europe	United Kingdom	Fareham - Gosport	All	2014	www3.hants.gov.uk
Northern America	Canada	Gatineau	All	2011	www.sto.ca
Northern America	Canada	Mississauga	All	2018	www.mississauga.ca
Northern America	Canada	Ottawa	All	2001	onlinepubs.trb.org
Northern America	United States	Cleveland	All	2013	RTA
Northern America	United States	Hartford County	All	2016	ctfastrak.com
Northern America	United States	Las Vegas	All	2005	www.nbrti.org
Northern America	United States	Los Angeles	All		
Northern America	United States	New York	All	2013	www.nbrti.org
Northern America	United States	San Bernardino	All	2014	www.omnitrans.org
Oceania	Australia	Adelaide	All	2014	Adelaide Metro
Oceania	Australia	Brisbane	All	2014	Translink
Oceania	New Zealand	Auckland	All	2014	www.aucklandtransport.govt.nz

Ahmedabad:	✔ For fleet management as well as fare collection and revenue management	Beijing:	✔	Bogota:	✔
Changde:	✔	Brisbane:	✔	Cali:	✔
Guangzhou:	✔	Changzhou:	✔	Chengdu:	✔
Islamabad:	✔	Hangzhou:	✘	Hefei:	✔
Jinan:	✔	Istanbul:	✔	Jakarta:	✘
Mexico City:	✔	Lanzhou:	✔	Lianyungang:	✔
Shaoxing:	✔	Pune:	✔	Seoul:	✘ Traffic control center not used for bus operational planning or control
Yinchuan:	✔	Xiamen:	✔	Yichang:	✔
Zhongshan:	✔	Zaozhuang:	✔	Zhengzhou:	✔
Bunous Aires:	✘	Zhoushan:	✔	Nanning:	✔

✘ No
✔ Yes
● Partial

Figur 2 BRT-løsninger med et system kontrollcenter²⁹

²⁸ Hentet fra nettstedet: https://brtdata.org/indicators/systems/operations_control_center

²⁹ Hentet fra ITDP (u.d.) sin nettside: http://www.itdp-china.org/brt/qual/?qual_id=32&lang=1

Eksempel på ytelsesindikatorer som benyttes av to utvalgte bussløsninger

Tabell 4 Eks. på løsning: Singapore (Dhingra, 2012)

A1. Singapore^[1]

Location	Singapore
Area	710 km ²
Population	5.1 million
Modes	Rail, bus
Total rail length	175 km
Stations	130
Total No. of buses	4 100
Bus routes	261
Total PT ridership	5.4 million passengers/day
Modal share of PT	59 %
Key agencies	Land Transport Authority (LTA) and Public Transport Council (PTC) (within the auspices of the Ministry of Transport)
Guiding policy/document	Land Transport Masterplan (2008) (see Figure 9)
Performance measures mandatory as per Government requirement	Yes
Performance measures and standards used	<ul style="list-style-type: none"> i. Reliability <ul style="list-style-type: none"> a. Headway adherence b. Bus breakdown c. Actual/scheduled bus trips operated on each route
BUS	<ul style="list-style-type: none"> ii. Passenger loading <ul style="list-style-type: none"> a. Peak-hour loading iii. Safety <ul style="list-style-type: none"> a. Accident rate iv. Availability of service <ul style="list-style-type: none"> a. Service coverage (within 400 m distance of any residence/employment area), direct connectivity b. Temporal availability – maximum headways, No. of hours of operation v. Integration of service between bus and train vi. Customer information <ul style="list-style-type: none"> a. Pre-trip and in-trip information, timetables
RAIL	<ul style="list-style-type: none"> i. Service quality <ul style="list-style-type: none"> a) On-time performance b) Train service availability c) Passenger loading d) Severity of service disruptions e) Train headways f) Frequency of occurrence of service disruption g) Information and communication <ul style="list-style-type: none"> 1. Information and communication 2. Equipment performance 3. Reliability of functioning of ticketing machines, gates, escalators lifts, etc.

Tabell 5 Eks. på løsning: Sydney, Australia (Dhingra, 2012)

A3. Sydney, Australia

Location	Sydney, Australia
Area	2 500 km ²
Population	2.5 million
Modes	Public bus, ferry, rail
Total No. of buses, ferries	1 900 buses, 2 ferries
Routes	300
Total No. of ferries	30
Total PT ridership	200 million passengers per year (in 2006)
Modal share of PT	14 %
Key agencies	State Transit (ST)
Guiding policy/document	<p>The Transport Administration Act defines the following objectives as having equal importance for State Transit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Operate efficient, safe, and reliable services, ■ Maximise the net worth of the State's investment in State Transit, ■ Be socially responsible, ■ Be environmentally responsible, and ■ Be responsible toward regional development and decentralisation. <p>This legislation required that an overall business management system be put in place, one that can be adequately assessed. At the corporate level, the main ST goal is to "contribute to the development of a sustainable urban environment by attracting travellers to public transport" (TCRP, 2003)</p>
PM mandatory as per Government requirement	Yes
Performance measures and standards used	<p>To achieve the main goal, a number of objectives have been defined. The level of detail and quantification of performance measures directly related to each objective varies depending on the objective. Some are quantified while others are given a qualitative treatment. Most of the objectives have measurable indicators to help monitor achievement levels. The objectives and related performance measures for State Transit, Sydney are as follows (TCRP, 2003):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. New and Innovative Services: <ol style="list-style-type: none"> a. Numbers and types of services introduced; b. Patronage by route; time of day, and day of week; c. Monthly and annual patronage. 2. Accessibility Levels/Convenience: <ol style="list-style-type: none"> a. Percent of population living within 400 metres and within 800 metres of a bus stop; b. All routes connect to regional centers (yes/no); c. Community consultation activities are held frequently (yes/no); d. Customer satisfaction (from regular attitudinal surveys); e. Customer complaints: number of complaints of each type; f. Bus fleet composition: targets are 25 % low floor; 20 % wheelchair, accessible; 35 % air-conditioned.

A3. Sydney, Australia (II)

Location	Sydney, Australia
	<p>3. Reliability:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. On-time running (no later than 5 minutes) in normal traffic conditions (target 95 %). On-time running is measured at route terminus (buses and ferries) and at mid-points along the route (buses). b. Early running (target: 0 %); c. Mechanical failures preventable through regular maintenance; d. Number of changeovers (buses that require in-service replacement) per 100 000 kilometres (target: 98 % mechanical reliability for buses).
	<p>4. Safety and Security of Passengers</p> <ul style="list-style-type: none"> a. All buses fitted with CCTV units (yes/no); b. All buses in radio contact with control center (yes/no); c. Non-slip floors on all buses (yes/no).
	<p>5. Comfort:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Average fleet age (12 years is the contractual obligation); b. Number of buses air-conditioned, accessible to people with disabilities, with quality seating, and low-floor; c. Percentage of buses cleaned internally daily; percent of buses washed every 3 days; d. Percentage of buses purchased that are environmentally friendly (target: 100 %).
	<p>6. Staff Training to Provide “Friendly” Service:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Standards set for customer service training; b. Help available for customers who do not understand the system; c. On-going communication of decisions.
	<p>7. Travel Information to Passengers:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Percentage of public timetables reviewed within a set period (target: 100 %); b. Number of transit shops; c. Numbers of agents selling tickets and providing information.
	<p>8. Efficiency to Keep Costs Down and Fares at Affordable Levels:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Average operating cost per passenger trip for buses; b. Average operating cost per passenger trip for ferries; c. Cost per vehicle-kilometre for each main cost center.

Modelltillegg: Formler

Kalibrering av reisetidsmodellen

Vi gjennomgår nå kalibrering av den anbefalte reisetidsmodellen som vist i kapittel 5. Denne modellen består av tre likninger: (1) Reisetid mellom to holdeplasser, (2) ventetid i kryss/rundkjøringer og (3) tid brukt på av- og påstigning:

$$v_{max}(D_i; a, b) = \min \left\{ F_G, \beta \left[\frac{2D_i}{1/a + 1/b} \right]^{1/2} \right\}$$

$$d(T, t) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T-t}{T} \right) \left[t + \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right]$$

$$T_{Sek}(P_i, A_i, p, a) = p \times P + av \times A + 6$$

Disse tre likningene har parameterene a (akselerasjonsrate), b (retardasjonsrate), t (tid i en gitt syklus der andre biler kommer inn fra venstre i rundkjøringen), T (sykluslengde), p (tid per påstigning) og av (tid per avstigning). Samlet tidsbruk er dermed summen av disse komponentene. Alle parameterne samles i den parametervektor β , som brukes i kalibreringen.

Den fulle modellen angir tid mellom avgang fra en holdeplass $i-1$ og holdeplass i som

$$\widehat{rt}(\beta)_i = T(v_{max}(D_i; a, b)) + d(T, t)X_i + T_{Sek}(P_i, A_i, p, a)$$

Her er X_i en indikatorvariabel som er lik 1 hvis det er en rundkjøring med vesentlig trafikkvolum mellom $i-1$ og i , og null hvis ikke.

For å kalibrere modellen, må man løse et minimeringsproblem hvor man gjør en kurvetilpasning mellom faktisk og predikert reisetid. Dette minimeringsproblemet løses med beskrankninger for å unngå at man velger parametere som ikke er mulige i en realistisk situasjon. Vi har summert de kvadrerte avvikene mellom faktisk (rt_i) og predikert ($\widehat{rt}(\beta)_i$) reisetid:

$$Z = \sum_{i=1}^n (\widehat{rt}(\beta)_i - rt_i)^2$$

Denne summen minimeres ved hjelp av en optimaliseringsrutine under begrensninger på parameterne. Tabellen under viser det opprinnelige parametersettet, det kalibrerte og begrensningene som er pålagt dem.

Tabell S.2. Kalibrerte parametere til reisetidsmodellen.

Parameter	Opprinnelig	Kalibrert	Min	Maks	Enhet	
Akselerasjonsrate		0.80	1.13	0.80	1.20	m/s ²
Retardasjonsrate		0.80	1.13	0.80	1.20	m/s ²
Avstigningstid		2.00	3.00	1.00	3.00	Sekunder
Påstigningstid		2.00	3.00	1.00	3.00	Sekunder
t		50.00	49.96	30.00	50.00	Sekunder
T		120.00	96.38	60.00	120.00	Sekunder

Etter kalibreringen anbefaler modellen en akselerasjons- og retardasjonsrate på 1.13 m/s², tre sekunder per av- og påstigning. Videre har sykluslengden (T) blitt skrudd noe ned, mens tid i en gitt syklus der andre biler kommer inn fra venstre i rundkjøringen er lik som betyr at sannsynligheten for å stoppe i en rundkjøring er økt fra 42 til 52 %. Den kalibrerte modellen angir dermed lavere reisetid i veibanen, men høyere på holdeplass og rundkjøringer enn det opprinnelige parameteresettet.

Køtid ved variabel oppholdstid og faste ankomstintervaller

Køtid ved variabel oppholdstid og faste ankomstintervaller kan beskrives ved hjelp av et formelverk som bygger på køteori. For å finne ventetid forbundet med å finne ledig busslomme, tar vi utgangspunkt i en såkalt M/M/k-kø. Dette er en kø med tilfeldig fordeling av både ankomst og oppholdstider og k busslommer. Etter å satt opp formlene for denne modellen (som er godt kjent), benytter vi en omskriving slik at ankomsttidene ikke er tilfeldige, men regulære.

Først definerer vi det gjennomsnittlige oppholdstiden som sammensatt av O :

$$\text{Oppholdstid} = O$$

Oppholdstiden kan beregnes med en passende formelverk, slik anvist i modelleringskapittelet. Variabelen vil angi gjennomsnittlig oppholdstid per ankomst, og ikke hvert enkelt kjøretøy. Den andre viktige komponenten er gjennomsnittlig tid mellom avgangene, også kalt headway. Denne vil være gitt ved formelen:

$$\text{Headway} = \frac{E(H)}{2} (1 + cv^2)$$

Her er $E(H)$ gjennomsnittlig tid mellom avgangene, og cv^2 er variasjonskoeffisienten for ankomsttidspunktene. Formelen tar hensyn til at ujevne avganger, øker tiden mellom dem over nivået fra det uvektede gjennomsnittet $E(H) = 60/\text{Frekvens}$. Oppholdstid og headway definerer sammen variabelen ρ som angir kapasitetsutnyttelsen:

$$\rho = \frac{O}{H(f)} = \frac{\text{Oppholdstid per buss}}{\text{Tid mellom hver buss}} < 1$$

Dette uttrykket er likt det vist i kapittel 4 om bussvegmodellering. Ifølge Sztrik (2012), kan ventetiden i en M/M/k-type kø skrives med følgende enkle formel:

$$E_{M/M/k} = \frac{O \times \pi(O, H, n)}{(n - \rho)}$$

Her er n antall oppstillingsplasser og $\pi(O, H, n)$ er sannsynligheten for å ikke finne en ledig busslomme som en funksjon av oppholdstid, headway og antall oppstillingsplasser.

Sannsynlighet for å ikke finne ledig plass er gitt av en veldig ufin formel. Så lenge man har en datamaskin tilgjengelig, bør det imidlertid være relativt rett frem å legge den inn i et program. Sannsynlighet for at alle holdeplassene er opptatt, gis ved formelen:

$$\pi(O, H, n) = P_0 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\rho^k}{k!} \frac{1}{n^{k-n}}$$

Her er P_0 sannsynligheten for at ingen holdeplasser er opptatt, gitt av formelen:

$$P_0 = \left(\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{n}} \right)^{-1}$$

Begge formlene er hentet fra Sztrik (2012), og er lite fine å se på, men mye brukt i andre anvendelser, godt kjent og akseptert. Vi har nå funnet ventetiden i en kø hvor både tiden mellom avgangene og oppholdstiden er tilfeldig. Vi ønsker imidlertid å anta at bussen ankommer på gitt tidspunkt fra en rutetabell, og ikke tilfeldig. For å anta dette, kan vi benytte en mye brukt formel som konverterer forventet ventetid fra en tilfeldig kø til en med hvilken som helst statistisk fordeling, angitt av Whitt (1993) som Kingmans formel. Denne formelen viser sammenhengen mellom ventetid i en M/M/k-type kø og en G/G/k-kø hvor «G» står for generell statistisk fordeling. Formelen gir følgende tilnærming:

$$E_{G/G/k} \approx \left(\frac{c_a^2 + c_s^2}{2} \right) E_{M/M/k}$$

I denne formelen er c_a^2 og c_s^2 definert som variasjonskoeffisienten til henholdsvis tid mellom avgangene og oppholdstiden. Dersom vi antar at avgangene kommer med faste intervaller, vil variasjonskoeffisienten bli 0, siden variansen blir null når headway er konstant. Dette kan man se av formelen under, der man antar at den faktiske tiden mellom avgangene H^F er lik gjennomsnittlig tid mellom avgangene $E(H)$, for alle avganger:

$$c_a^2 = \text{Var}(H)/E(H)^2 = \frac{1}{E(H)^2 N} \sum (H^F - E(H))^2 = 0$$

Dermed blir variasjonskoeffisienten lik null, da summen $H^F - E(H)$ blir null i alle tilfeller. En grei tilnærming til fordeling av oppholdstid er eksponentialfordelingen. Denne har standardavvik $\sigma = \sqrt{\lambda^{-2}}$ og gjennomsnitt $\sigma = \lambda^{-1}$. Settes dette inn i variasjonskoeffisienten, finner vi at den er lik 1:

$$c_s^2 = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\lambda^{-2}}}{\lambda^{-1}} = \frac{\lambda}{\lambda} = 1$$

Hvis vi nå setter $c_s^2 = 1$ og $c_a^2 = 0$ inn i formelen ovenfor finner vi:

$$E(O, H, n) \approx \left(\frac{0+1}{2}\right) E_{M/M/k} = \frac{O \times \pi(O, H, n)}{2(n-\rho)}$$

Med våre antagelser er altså forventet ventetid for å finne ledig oppstillingsplass ved faste intervaller halvparten av tiden ved tilfeldig tid mellom hver avgang.

Urbanet Analyse
EIET AV ASPLAN VIAK

Urbanet Analyse AS
Postboks 337 Sentrum
0101 Oslo

Tlf: [+47] 96 200 700
urbanet@urbanet.no

