



Transportøkonomisk institutt
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning



Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by

Stefan Flügel, Christian Weber, Tom N. Hamre

2035/2024



Tittel:	Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by
Tittel engelsk:	Possibilities for improved modelling of transport measures in cities
Forfatter:	Stefan Flügel, Christian Weber, Tom N. Hamre
Dato:	08.2024
TØI-rapport:	2035/2024
Antall sider:	91
ISSN elektronisk:	2535-5104
ISBN elektronisk:	978-82-480-2205-3
Finansieringskilder:	NTP transportanalyse og samfunnsøkonomi
TØIs p.nr.:	5161 – Forbedrete modeller for 10 tiltak i by
Prosjektleder:	Stefan Flügel
Kvalitetsansvarlig:	Anne Madslie
Ferdigstilling:	Trude Kvalsvik
Fagfelt:	Maskinlæring og Avansert Databehandling
Emneord:	Transportmodeller, RTM, agent-basert modellering, robotaxi

Kort sammendrag

Rapporten kartlegger behovet for videreutvikling av det eksisterende modellsystemet (RTM) og andre metoder for transportanalyser i by. Av de 10 tiltakene som diskuteres i rapporten, er det spesielt modellering av mikromobilitet og robotaxier som utpeker seg som vanskelig å fange opp i RTM-systemet på en god måte. Rapporten demonstrerer videre hvordan agent-baserte simuleringmodeller kan anvendes til å analysere endringer i avreisetidspunkt, fleksible bompenger og innføring robotaxier.

Summary

The report identifies the need for further development of the existing model system (RTM) and other methods for transport analysis in cities. Among the 10 measures discussed in the report, the modeling of micromobility and robotaxis particularly stands out as difficult to adequately capture within the RTM system. The report further demonstrates how agent-based simulation models can be used to analyze changes in departure times, flexible tolls, and the introduction of robotaxis.

Transportøkonomisk institutt (TØI) har opphavsrett til hele rapporten og dens enkelte deler. Innholdet kan brukes som underlagsmateriale. Når rapporten siteres eller omtales, skal TØI oppgis som kilde med navn og rapportnummer. Rapporten kan ikke endres. Ved eventuell annen bruk må forhåndssamtykke fra TØI innhentes. For øvrig gjelder [Åndsverklovens](#) bestemmelser.



Forord

Transportmodeller er et sentralt verktøy i planlegging av transport og er bestandig under videreutvikling. Trender som urbanisering, mikromobilitet og automatisert transport, samt politiske ordninger som byvekstavgiftene og økt behov for scenariometodikk, øker behovet for mer dynamiske, detaljerte og mer fleksible transportmodeller i byer.

I den foreliggende rapporten foretar vi en systematisk gjennomgang av 10 transporttiltak og peker på konkrete muligheter for videreutvikling av RTM-systemet, samt muligheter som ligger i andre modelleringstilnærminger, deriblant agent-baserte transportsimuleringsmodeller.

Stefan Flügel har vært prosjektleder for prosjektet. Christian Weber har bidratt med analyser (spesielt i avsnitt 4) og Tom N. Hamre (Numerika) har bidratt med tekst til enkelte tiltak om rundt implementering og videreutvikling av RTM-systemet. Vi takker Harald Støen Høyem (Asplan Viak) som har bidratt med tekstavsnittet om takstsystemer.

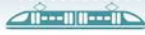
Oppdragsgiveren for prosjektet var NTP transportanalyse og samfunnsøkonomi med Oskar Kleven som kontaktperson. Vi takker for godt samarbeid og tålmodighet med ferdigstilling av rapporten.

Rapporten er kvalitetssikret av forskningsleder Anne Madslie. Vi vil også takke Tonje Lysø for gjennomlesning av rapportutkast og mange nyttige kommentarer og korreksjoner.

Oslo, juli 2024
Transportøkonomisk institutt

Bjørne Grimsrud
Administrerende direktør

Frants Gundersen
Avdelingsleder



Innhold

Sammendrag

Summary

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Avgrensning og metodisk tilnærming	1
1.3	Rapportstruktur	2
1.4	Ordforklaring.....	2
2	Innledende diskusjon om tiltak og modellutviklingskrav.....	5
2.1	Arbeidsdefinisjon av tiltakene	5
2.2	Tematisk avhengighet mellom tiltakene.....	7
2.3	Perspektiver for modellutvikling i by	7
2.4	Vurderte modelltyper	9
3	Systematisk gjennomgang av 10 tiltak / modelleringsgrep.....	15
3.1	Elbil som egen mode.....	15
3.2	Endring av avreisetidspunkt.....	20
3.3	Fleksible bompenger/veiprisning.....	26
3.4	Parameterjustering etter korona.....	30
3.5	Parkering og nullutslippssoner.....	34
3.6	Bildeling/robotaxier	37
3.7	Mikromobilitet	42
3.8	Takstsystemer i kollektivtransport.....	46
3.9	Framkommelighet for (super)buss	56
3.10	Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling.....	59
4	Illustrasjon av noen tiltak i MATSim.....	64
4.1	Oppsett for uttesting	64
4.2	Valg av avreisetidspunkt	66
4.3	Simulering av bompenger	72
4.4	Modellering av robotaxi.....	74
5	Oppsummering, diskusjon og anbefaling.....	77
5.1	Oppsummering av mulighetsstudien med utgangspunkt i RTM	77
5.2	Vurdering av behov for nye modeller	79
5.3	Bymodeller og regionale/nasjonale modeller	81
5.4	Diskusjon og anbefaling rundt modellutvikling	83
	Referanser	86
	Vedlegg A: Liste over trafikksimuleringsmodeller	88
	Vedlegg B: ridesharing as a cooperative game with agent-based models.....	89

Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by

TØI rapport 2035/2024 • Forfattere: Stefan Flügel, Christian Weber, Tom N. Hamre • Oslo 2024 • 91 sider

Transportmodeller er et sentralt verktøy i planlegging av transport og er bestandig under videreutvikling. Trender som urbanisering, mikromobilitet og automatisert transport, samt politiske ordninger som byvekstavgiftene og økt behov for scenariometodikk, øker behovet for mer dynamiske, detaljerte og mer fleksible transportmodeller i byer.

I den foreliggende rapporten foretar vi en systematisk gjennomgang av 10 transporttiltak og peker på konkrete muligheter for videreutvikling av RTM-systemet, samt muligheter som ligger i andre modelleringstilnærminger, deriblant agent-baserte transportsimuleringsmodeller.

Rapporten oppsummerer funnene fra et prosjekt på oppdrag fra NTP Transportanalyse og samfunnsøkonomi. Prosjektet hadde som oppgave å kartlegge behov for videreutvikling av eksisterende modellsystem (RTM) og andre metoder for transportanalyser i by.

Rapporten er et ledd i en prosess om vurdering og utvikling av framtidens transportmodeller og kan anses som en oppfølging av TØI rapport 1819/2021 «*Transportmodeller mot fremtiden. Muligheter for forbedrede modeller med fokus på reiser i byområder*». I foreliggende rapport gjør vi en mer systematisk gjennomgang av 10 tiltak og peker på konkrete muligheter for videreutvikling i RTM-modellsystemet, samt hvilke muligheter som ligger i andre modelleringstilnærminger.

Rapporten er begrenset til 10 analysebehov. Etter innspill fra oppdragsgiver har vi valgt følgende 10 tiltak/utviklingsdimensjoner:

1. Elbil som egen mode (reisemiddel)
2. Endre/forskyve avreisetid
3. Fleksible bompenger/veiprisering
4. Parameterjustering etter korona
5. Parkering og nullutslippssoner
6. Bildeling/Robotaxier
7. Mikromobilitet
8. Takstsystemer for kollektivtransport
9. Framkommelighet for (super)buss
10. Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling

For en systematisk gjennomgang har vi definert 7 spørsmål som vi skal svare ut for hvert av de 10 tiltakene:

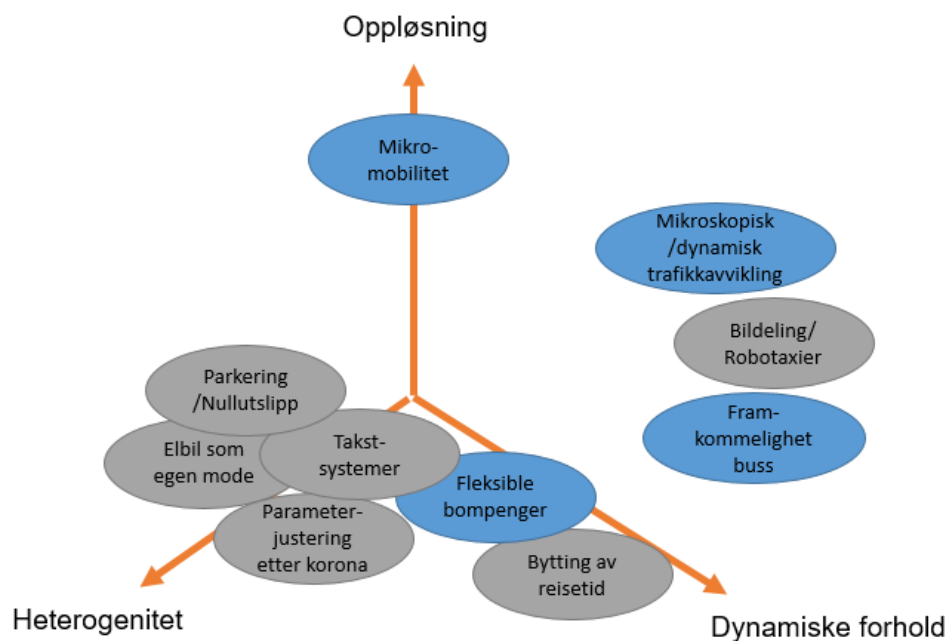
1. Hva går tiltaket ut på?
2. Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?
3. Hvilke data trengs?
4. Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM, og hva er begrensningene?
5. Hvilke muligheter finnes for videreutvikling av RTM-systemet?
6. Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?
7. Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Metodetilnærmingen har vært:

1. Å samle erfaringer blant prosjektmedarbeidere og andre forskere/konsulenter
2. Litteraturgjennomgang
3. Følge opp aktuelle og pågående prosjekter rundt modellutvikling
4. Uttesting av utvalgte tiltak i et modellrammeverk for agent-basert simulering (MATSim)

Rapporten inneholder ingen detaljerte beskrivelser av metodikken bak transportmodeller, og den forutsetter kjennskap til modellsystemet RTM. For en mer dekkende beskrivelse av agent-baserte modeller henviser vi til TØI rapport 1358/2014 og 1819/2021. RTM-systemet er nærmere beskrevet blant annet i Tørset et al. (2022).

Som beskrevet i TØI rapport 1819/2021 kan man systematisere behov for modellutvikling i by langs tre dimensjoner: a) heterogenitet b) oppløsning og c) dynamiske forhold. Figur S1 gjør et forsøk på en innledningsvis kartlegging av tiltakene etter disse tre dimensjoner.



Figur S1: Illustrasjon av ti tiltak i lys av tre modellutviklingsdimensjoner.

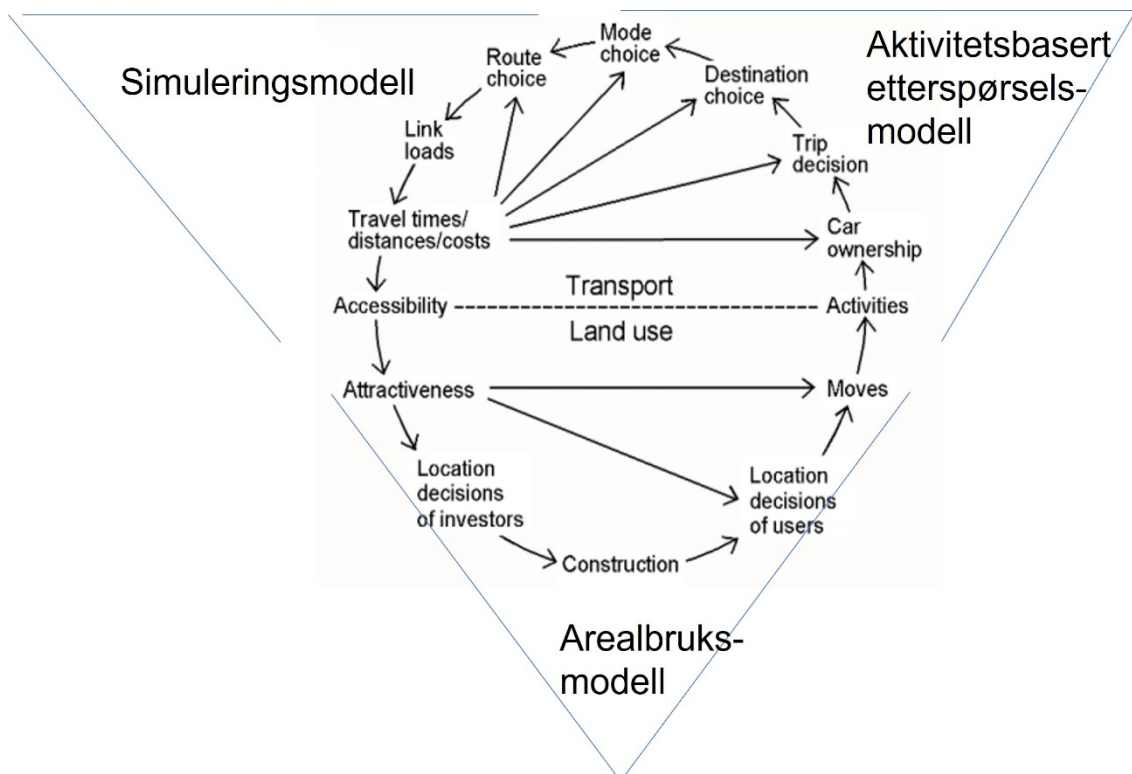
Ved siden av disse fundamentale begrensningene (forhåndsbestemte befolkningssegmenter sone-struktur, og statisk modellering innenfor gitte tidsperioder) kan det argumenteres for at RTM-modellsystemet har en grunnleggende svakhet ved at modellsystemet er forholdsvis

ufleksibelt. Dette gjelder både i anvendelse (utover funksjonaliteten som ligger i Cube-grensesnittet) og i modellutviklingen.

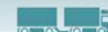
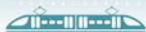
I den systematiske gjennomgangen diskuterer vi sentrale behov for å fange opp ulike adferdsdimensjoner og mekanismer. Behovene vil variere betydelig mellom de 10 tiltakene. Vurdering av behovene vil være nødvendig for å finne ut av hvilke modelltyper som kan forventes å gi de beste svarene på fremtidige problemstillinger og hvilke modelltyper det er verdt å satse på i transportplanleggingen fremover.

Vi ser på fire typer modeller/modellsystemer som er relevante for bytransport; tre modeller som er i bruk i Norge i dag (riktignok i sterkt varierende grad) og ett mulig modellsystem for fremtiden.

- Modelltype 1 (M1) er en klassisk trafikksimuleringsmodell med eksogen etterspørsel. Et eksempel på dette er Aimsun som anvendes av SVV for å modellere detaljert trafikkflyt i byer.
- Modelltype 2 (M2) er dagens RTM-system med TraMod_by som etterspørselsmodell og trafikkavviklingsmodell kodet i Cube Voyager.
- Modelltype 3 (M3) er agent-baserte trafikksimuleringsmodeller. MATSim og POLARIS er de mest brukte rammeverkene for agent-baserte modeller, men det finnes mange flere alternativer.
- Modelltype 4 (M4) er et modellsystem bestående av en LUTI-modell, en aktivitetsbasert etterspørselsmodell (ABDM) og en trafikksimuleringsmodell. Et slik modellsystem ansees å være det mest omfattende og mest detaljerte system som man kan bygge sammen ut fra kjente modeller. Figur S2 illustrerer hvordan en slik modell kan være sammensatt.



Figur S2: Strukturen i et mulig "state-of-the-art" transportmodellsystem. Figur er tilpasset basert på Wegener (2014).



Tabell S1 viser hvordan ulike adferdsdimensjoner er håndtert i ulike modelltyper. Vi inndeler i:

- «Ikke inkludert»: adferdsdimensjonen fanges ikke opp eller spiller ingen rolle i modellsystemet
- «Eksogent»: adferdsdimensjonen er representert ved faste inndata og predikeres ikke av selve modellen
- «Endogent»: adferdsdimensjonen predikeres innad i modellsystemet. I noen tilfeller legger vi til «detaljert» eller «forenklet» for å indikere detaljeringsgraden i hvordan adferdsdimensjonen modelleres.

Tabell S1: Adferdsdimensjoner og mekanismer i de fire ulike modelltypene.

Adferdsdimensjon	M1: Klassisk trafikksimulering med eksogen etterspørsel	M2: RTM-system (TradMod_by + Cube Voyager)	M3: Agent-baserte trafikkmoteller (f.eks. en standard MATSim-modell)	M4: LUTI+ABDM+ trafikksimulering
Bosettings-/arbeidsstedsvalg	Ikke inkludert	Eksogent (arbeidssted endogent, som del av destinasjonsvalg for arbeidsplasser)	Eksogent	Endogent
Biltilgang	Ikke inkludert	Endogent	Eksogent	Endogent
Valg av/kjøp av biltype	Ikke inkludert	Eksogent	Eksogent	Eksogent (muligens endogent)
Valg av periodekort	Ikke inkludert	Endogent (arbeidsreiser)	Eksogent	Endogent
Reisefrekvens	Eksogent	Endogent	Eksogent	Endogent
Destinasjonsvalg	Eksogent	Endogent	Eksogent	Endogent
Transportmiddelvalg	Eksogent	Endogent	Endogent (noe forenklet)	Endogent
Valg av avreisetidspunkt	Eksogent	Ikke inkludert	Endogent	Endogent
Valg av rute	Endogent	Endogent , noe forenklet	Endogent , detaljert	Endogent , detaljert
Kjøreadferd som påvirker trafikkflyt	Endogent	Ikke inkludert	Endogent (sterkt forenklet)	Endogent (noe forenklet)

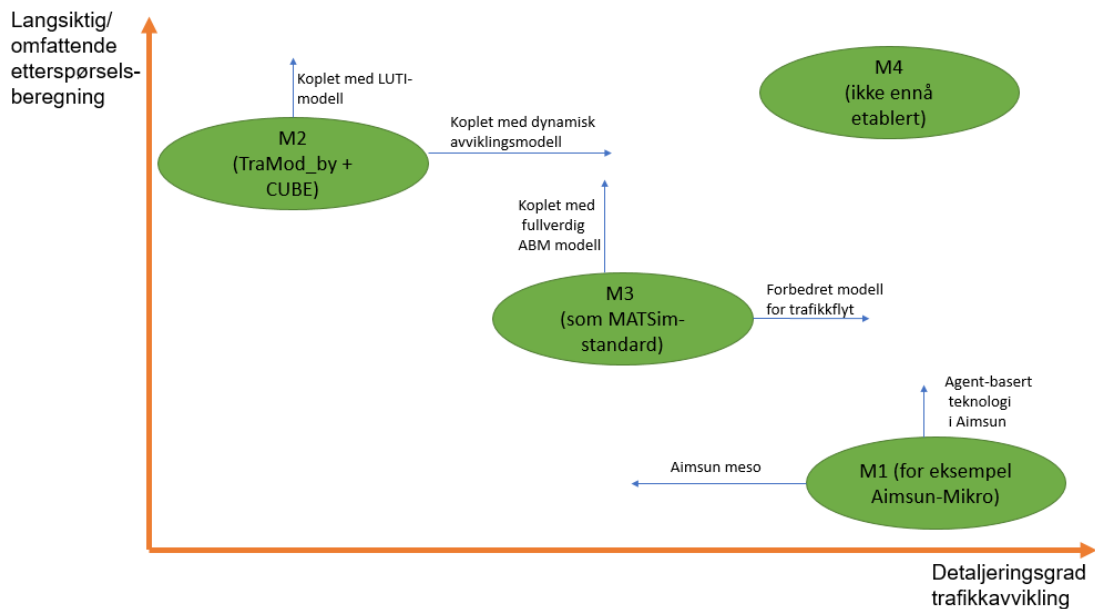
I M1 leses etterspørselen inn som eksogene data og det modelleres rutevalg og kjøreadferd i veinettet.

I M2 modelleres etterspørselen med en modell for biltilgang og klassiske modeller for reisefrekvens, transportmiddel- og destinasjonsvalg. Uten bruk av tilleggsmodeller ligger tidsperioden fast og etterspørselen leses inn «statisk» i en trafikkavviklingsmodul i Cube Voyager. I Cube Voyager legges trafikken ut på nettverket. Rutevalget modelleres på en makroskopisk og deterministisk måte og LoS-matriser oppdateres før disse sendes tilbake til etterspørselsmodellen.

I M3 tar man utgangspunkt i faste lister som representerer reiseplaner for en syntetisk befolkning. I M3 modelleres endringer i transportmiddelvalg, avreisetidspunkt og rutevalg for hver agent (enkeltperson) i den syntetiske befolkningen.

Ved M4 vil de fleste adferdsdimensjoner kunne modelleres endogent. Ideelt sett bør oppbygningen være modulær slik at man kun kjører modulene isolert ved behov. Samtidig skal modulene være integrerte og konsistente med hverandre. Den ideelle enheten for dette er agent-basert, evt. hushold-basert. Dette gjelder også den langsiktige modulen selv om agent-basert tilnærming virker mindre utbredt for arealbruksmodellering.

Figur S3 illustrerer to overordnede egenskaper ved modellene. Y-aksen viser langsiktig og omfattende etterspørselsberegning (bosettingsvalg, destinasjonsvalg, reisefrekvens), mens x-aksen viser detaljeringsgrad i trafikkavviklingen (dynamisk oppbygging av kø, mikroskopiske interaksjoner).



Figur S3: Modelltypenes kapabilitet.

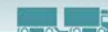
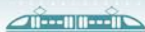
Blant «dagens» modeller (M1 til M3) har RTM (M2) størst omfang av langsiktig etterspørselsberegning, mens klassiske mikroskopiske simuleringsmodeller (M1) har høyest detaljeringsgrad i trafikkavvikling. En standard MATSim modell (M3) ligger et sted mellom disse. Et «state-of-the-art» transportmodellsystem (med en vellykket integrering av en LUTI-modell) vil score noe bedre enn RTM på omfattende etterspørselsmodellering og likt/noe dårligere enn klassiske trafikksimuleringsmodeller på detaljeringsgrad i trafikkavvikling (avhengig av detaljeringsnivå til den integrerte simuleringsmodellen).

Det er viktig å huske at dagens modeller kan bli utvidet slik at de vil forbedres i én eller begge dimensjoner. Dette er illustrert med pilene i Figur 2.7. En standardmodell i MATSim kan f.eks. score omtrent likt som RTM på langsiktig etterspørselsmodellering om den er koblet mot en fullverdig aktivitetsbasert etterspørselsmodell. På den andre siden kan dagens mesoskopiske trafikkflytmodeller bli erstattet av en mikroskopisk versjon. I dette tilfellet ville den få omtrent samme detaljeringsgrad som en mikroskopisk Aimsun-modell.

Som del av prosjektet har vi også uttestet følgende tiltak i MATSim: endring av avreisetidspunkt, fleksible bompenger og robotaxier. Vi gjør dette basert på et hypotetisk scenario med et veldig enkelt nettverk og fiktive og forenklede etterspørselsdata (reiseplaner). Valget om et stilisert case (framfor full implementering) er motivert av at det da er mye enklere å isolere og forstå effektene av de mekanismene man tester ut. Vi viser til kapittel 4 for dokumentasjon av tiltakene i MATSim.

Tabell S2 oppsummerer vurderingen våre basert på kartlegging i rapporten.

Kolonnen "mulig i RTM på lengre sikt" vil kreve ny estimering, og for flere tiltak også ny oppbygging av kildekoden i TraMod_By.



Tabell S2: Oppsummering av mulighetsstudien.

Tiltak	Mulig i RTM på kort sikt	Mulig i RTM på lengre sikt (ny estimering, større endring i kildekode)	Forbedringspotensial med dynamiske og agent-baserte modeller
Elbil som egen mode	Segmentering etter drivlinje; implementert i Hamre and Rekdal (2024)	Eget alternativ i MD-modellen* ved ny versjon; større endringer i segmenteringsmodellen (uklart utbytte)	Moderat (fordeler for elbiler mest mht. ladning)
Endre/forskyve reisetidspunkt	Tilleggsmodeller for forskyvning av reiseperiode; (pågående implementering av SINTEF i CUBE)	Større endringer i frekvensmodellen (tidsdifferensiert) (uklart utbytte)	Stort; gevinster fra modeller med eksplisitt representasjon av døgntid
Fleksible bompenger/veiprisering	Tilpasninger i rutevalgmodellen; finere fordeling av LoS (per time)	Noen forbedringsmuligheter i kombinasjon med elbil og forskyvning av tidsperiode	Moderat; noe større hvis bompenger kan forventes å ha betydelige dynamiske effekter
Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader)	Ulike muligheter for rekalkibrering, f.eks. reisehensikter i frekvensmodellen	Estimering av «post korona»-preferanser ved re-estimering basert på nye RVU data	Moderat; noen fordelinger med aktivitetsbasert tilnærming, spesielt med tanke på hjemmekontor
Endring i trengselskostnader etter korona (eller under ny pandemi)	Funksjonalitet i CUBE for å «balansere» rutevalget	Begrenset mulighet/nytte av å ta det med i etterspørselsmodell --> tilpasse (PROSAM rapport)	Begrenset (mye kan dekkes av Trenklin)
Parkering og nullutslippssoner	Scenario-analyser ved manipulering av eksisterende sonedata / tilpasning av destinasjonsmodell i kombinasjon med elbil	Helhetlig integrering i nystimert destinasjonsmodell	Lite, med mindre man vil modellere tilgjengelighet av parkeringsplasser på mer detaljert/dynamisk måte
Bildeling/Robotaxier	Muligheter for justeringer/kalibrering i segmenteringsmodellen for å approksimere økt biltilgang	Større forbedringer i segmenteringsmodellen rundt bildeling; Robotaxier vanskelig å fange opp i fullt omfang	Veldig stor pga. mulighet for å fange opp dynamikken mellom tilbud og etterspørsel (endogen tilgjengelighet/ ventetider)
Mikromobilitet	Virker vanskelig (justerte analyser samlet med sykkel) --> justere hastighet	Egen mode i etterspørselsmodellen ved nystimering, egen beregning av LoS; segmentering knyttet til tilbringertid (uklart utbytte)	Stort med tanke på mulig detaljeringsgrad og muligheten for å predikere tilgjengelighet endogent
Takstsystemer i kollektivtransport	Forbedringer innenfor eksisterende CUBE rammeverk	Utvidet funksjonalitet i spesifisering av takstsystemer; forbedret håndtering av periodekort i nystimert modell (noen begrensinger)	Lite (noe større for tidsdifferensierte billetter; kjøp av periodekort kan muligens bedre forklares innenfor aktivitetsbaserte modeller)
Framkommelighet (super)buss	Tilrettelegging på nettverkssiden (dedikert fil for superbuss)	Kapasitetsavhengige reisetider med kollektivt (inkl. superbuss)	Moderat hvis fokus på reisetider; stort for kømodellering i byområder
Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling	Ekstern kopling mot Aimsun eller MATSim (uklart utbytte)	Kopling/integrering med andre verktøy; innenfor Cube kan Avenue være en mulighet	Stort hvis vekt på samspill med etterspørselsiden

* MD-modellen refererer til nested logit-modellen for «mode» og «destinasjon» i TraMod_by.



Vår mulighetsstudie viser at følgende tiltak/modelldimensjoner kan håndteres godt innenfor RTM-systemet:

- Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader)
- Parkerings- og nullutslippssoner
- Elbil som egen mode
- Fleksible bompenger (hvis fleksibilitet er begrenset til faste tidsperioder og hvis endring av reisetidspunkt ikke forventes å spille en stor rolle).

Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader) og *Parkerings- og nullutslippssoner* kan i stor grad fanges opp med forbedret kalibrering og/eller manipulering av nyttefunksjoner og sonedata.

Langsiktige preferanseendringer etter korona vil man på lengre sikt kunne fange opp ved en reestimering av TraMod_By med post-korona reisevanedata. På kort sikt burde økt hjemme-kontor fanges opp via en kalibrering av frekvensmodellen (mindre arbeidsreiser).

I tilfellene *Elbil* og *Fleksible bompenger* har det blitt gjennomført videreutviklingsprosjekter etter oppstart av dette prosjektet. Disse har ført til forbedrede virkemåter i RTM, eller vil gjøre det i nær fremtid. Det kan argumenteres for at 1) de foreslåtte og delvis gjennomførte endringene i stor grad maksimerer potensialet i RTM og 2) at forslagene på lengre sikt har begrenset nytte innenfor statiske og makroskopiske modellsystemer.

For en god modellering av *Fleksible bompenger* og *Tidsdifferente takstsystemer* bør man fange opp bytting/forskyving av avreisetidspunkt. Forskyving av avreisetidspunkt kan implementeres i RTM til en viss grad, men det gjør modellen mye mer komplisert og beregningstung. Generelt vil tiltakene som har en mer dynamisk karakter bli bedre fanget opp i modeller som har en eksplisitt representasjon av tid.

Det samme gjelder tiltakene *Framkommelighet (super)buss* og *Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling*. Disse fanges bedre opp med andre typer modeller. Det er teknisk mulig å koble TraMod_By med en dynamisk og mikro-/mesoskopisk avviklingsmodell, men implementeringen vil nødvendigvis medføre transformasjoner av data for å håndtere ulike datastrukturer. Integrerte modeller som har samme datastruktur i etterspørselsmodellering og trafikkavvikling (som MATSim har) er foretrukket. *Framkommelighet (super)buss* kan muligens fanges opp greit nok i RTM/Cube Voyager hvis man er interessert i reisetider (og ikke romlig utbredelse av kø) og man legger ressurser i å kalibrere VDF-funksjoner og hastighetsmodeller.

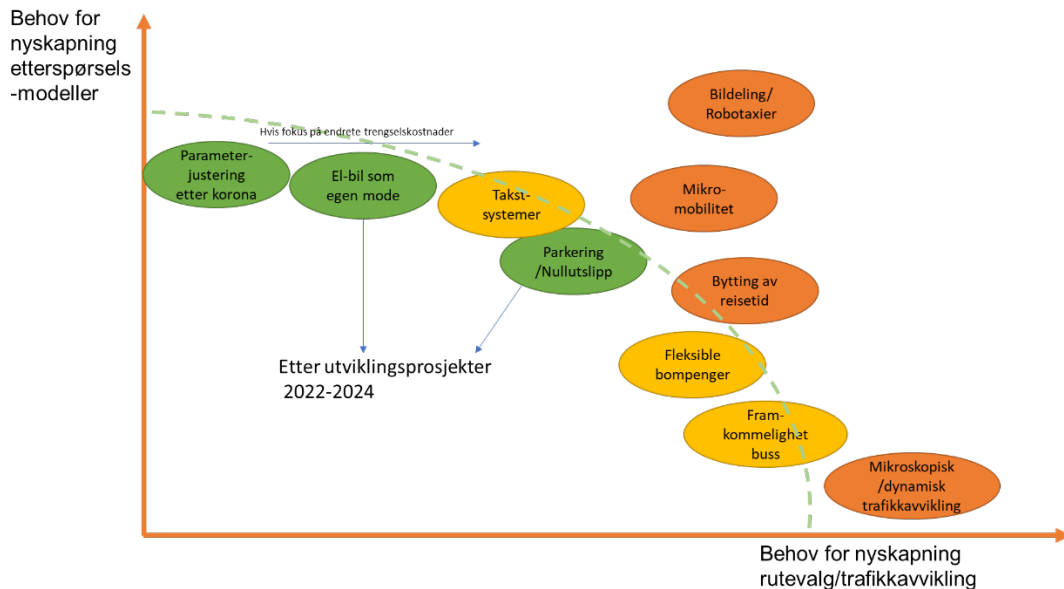
Modellering av *Robotaxier* (med endogen ventetid) og *Mikromobilitet* (med endogen tilgjengelighet) vil ikke kunne fanges opp i RTM-systemet på en god måte. Her vurderes behov for state-of-the-art modeller som nødvendig.

Innad i RTM-systemet kan man gjøre en videre oppdeling av behovene i 1) behov for nyskaping på etterspørselssiden (TraMod_By) og 2) på avviklingssiden (Cube-Voyager). Figur S4 prøver å illustrere dette.

Den grønne stiplede linjen indikerer vår vurdering av om tiltakene kan håndteres i RTM på en god måte. Tiltakene som ligger til høyre av den stiplede linjen håndteres best utenfor RTM.

Fargekodene indikerer hvor godt de ulike tiltakene i Figur S4 kan fanges opp i RTM. **Grønn** – kan fanges opp i RTM på en god måte, evt med forbedringer som kan iverksettes på kort sikt, **gul** – tiltakene kan analyseres i RTM på en tilfredsstillende måte, men det finnes noen fundamentale begrensninger som ikke lar seg løse godt i RTM og **rød** – vanskelig å fange opp i RTM på en god måte. Merk at «endring i avreisetid» og «mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling» kan delvis løses med eksterne modeller som kan kobles mot RTM.

I forhold til arbeidsdokumentet 51874 som ble publisert i 2022 har vi tilført noen piler som indikerer status i 2024. I 2024 er behovet for nyskaping knyttet til «elbil som egen mode» mindre siden implementering av segmenter fanger opp mye av funksjonaliteten til dette tiltaket (se avsnitt 3.1.4).



Figur S4: Forenklet illustrering av behov for nyskaping i forhold til dagens RTM-system (den grønne striplete buen).

Figur S4 viser at de fleste tiltakene som man vanskelig kan fange opp i RTM krever nyskaping både i etterspørselsmodellen og i trafikkavviklingsmodellen. Unntaket er *Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling*, der primært trafikkavviklingsmodellen trengs å forbedres. For robotaxier, mikromobilitet og endring i avreisetidspunkt vil det ikke være nok med justeringer i modellen eller å utvide eller erstatte enkelte deler av modellsystemet. For slike analyser er det behov for andre modellsystemer. Dette omtales nærmere i neste avsnitt.

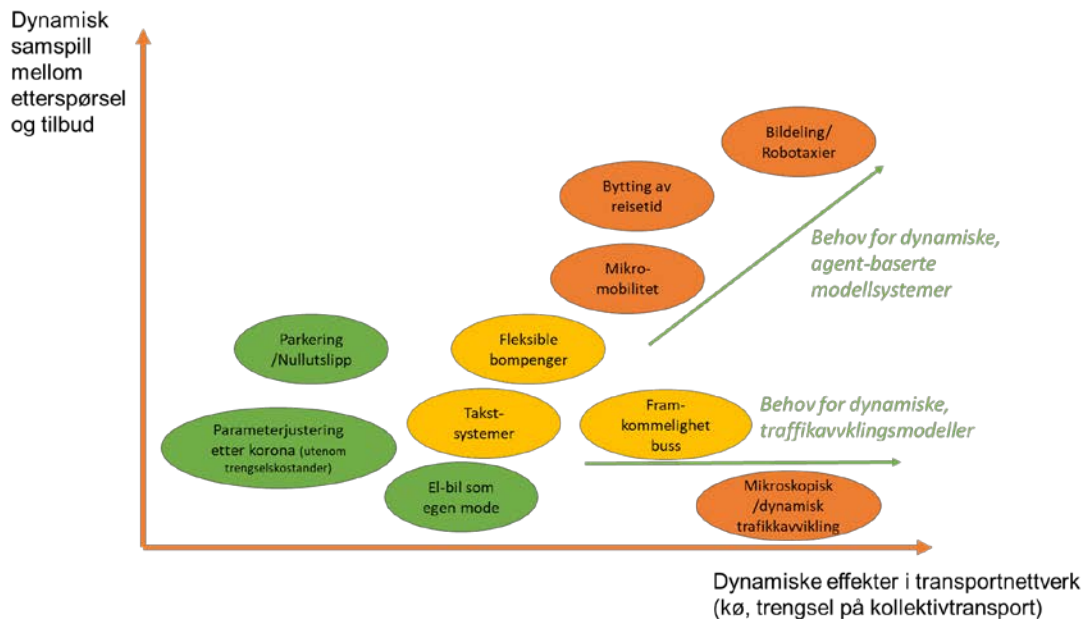
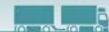
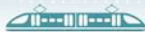
Som beskrevet i forrige avsnitt finnes det et behov for nye modeller for flere av de 10 analyserte tiltakene i denne rapporten. I dette avsnittet vurderer vi hvilke andre modeller som egner seg best til å fange opp tiltakene på sikt.

Vi tar utgangspunkt i modellene som er beskrevet i kapittel 2.4:

1. Dynamiske avviklingsmodeller (diskutert her i kombinasjon med TraMod_By)
2. Agent-baserte trafikksimuleringsmodeller
3. State-of-the-art-modell bestående av arealbruksmodell, aktivitetsbasert etterspørselsmodell og trafikksimuleringsmodell .

Tilnærming 1 prøver å koble TraMod_by opp mot dynamiske avviklingsmodeller (som Aimsun, evt. Trenklin for tognettverket). Ulempen er at etterspørselsmodelleringen fortsatt vil være statisk og at endring i avreisetidspunkt ikke kan fanges opp uten tilleggsmoduler.

Denne utfordringen kan løses med agent-baserte trafikksimuleringsmodeller som MATSim. Her har man mulighet til å fange opp dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud. Som beskrevet i vår gjennomgang av tiltakene er dette mest sentralt for tiltakene *robotaxier*, endring i *avreisetidspunkt* og *mikromobilitet*. Figur S5 illustrerer dette.



Figur S5: Behov for dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud og behov for interaksjon mellom enkeltkjøretøy og/eller personer; fargekoder: **grønn** – kan fanges opp i RTM på en god måte, evt. med forbedringer som kan fullføres på kort sikt; **gul** – tiltakene kan analyseres i RTM på en tilfredsstillende måte, men det finnes; **rød** – vanskelig å fange opp i RTM på en god måte.

Rapporten diskuterer hvordan mulighetsstudien vår kan bidra til å formulere anbefalinger rundt fremtidens transportmodeller.

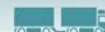
Et krav til transportmodeller som har fått mye medvind de senere år, er behovet for å fange opp effekter av ulike komplekse framtidsscenarioer og at man synliggjør usikkerheten i det som ligger i implisitte og eksplisitte antakelser.

Dette medfører to overordnede mål: 1) å kunne analysere mange ulike framtidsscenarioer inkludert effekter av ny teknologi, 2) raskere beregningstid slik at mange scenarioer/kombinasjoner av scenarioer kan testes.

Målene setter ulike – og til dels motstridende – krav til transportmodellene. Første mål krever fleksible transportmodeller, og for noen typer analyser detaljerte og dynamiske modeller. Andre mål krever forenklede transportmodeller for å redusere beregningstiden.

I denne sammenheng er det igjen interessant å se på forskjeller i analysebehov mellom byområder og på regionalt/nasjonalt nivå. Noen av framtidsscenarioene vil trolig være mer sentrale i byer og vil derfor kreve god representasjon i bymodeller, mens andre tiltak vil være mer relevant for regionale analyser, f.eks. motorveiprosjekter. Et annet eksempel er mikromobilitet som vil kreve eksplisitt representasjon i byanalyser, mens tiltaket kan forsøkes fanget opp på en forenklet måte ved regionale analyser/i regionale modeller, f.eks. ved å justere ned tilbringertiden til tog og langdistansebusser.

På grunn av høyere oppløsning og krav om å beregne nettverksavhengige reisetider, vil bymodeller ofte innebære lange beregningstider. Det er vanskelig å unngå uten at man kaster ut nødvendige detaljer fra modellen. En mulig løsning på sikt kan være at man lager meta-modeller basert på maskinlæring eller andre teknikker. Spesialmodeller som selvstendige etterspørselsmodeller (som MPM23 eller ADA) kan være egnet for noen typer analyser (disse tar forholdsvis lite tid å kjøre gjennom siden de ikke nettutlegger reisene). Et annet eksempel på en spesialmodell er Trenklin, som har forholdsvis kort beregningstid og kan brukes for noen typer analyser.



Som diskutert i rapporten er RTM/NTM6-modellsystemet godt egnet for regionale/nasjonale analyser med strategisk karakter. For målsetting 1 kan det tenkes at TraMod_by kan gjøres enda mer fleksibel. For mål 2 bør man vurdere å forenkle RTM-modellen (f.eks. færre soner, færre segmenter, ingen/færre iterasjoner). Noe av dette er allerede mulig å styre gjennom opsjoner som er programmert i brukergrensesnittet i Cube.

Denne diskusjon er oppsummert i tabell S3.

Tabell S3: Vurdering av utfordringer/muligheter knyttet til krav om å synliggjøre flere framtidsscenarioer.

Mål	Bymodeller	Regionale/Nasjonale modeller (utenom byer)
Å kunne analysere en større bredde av framtidsscenarioer	Fleksible transportmodeller; en del framtidsscenarioer vil kreve mer dynamiske og detaljerte modeller	Mulig å fange opp noen framtidsscenarioer i RTM på en mer overordnet måte (ved justering av forutsetninger/inndata)
Raske beregningstider slik at mange scenarioer kan testes	Detaljerte modeller er nødvendigvis beregningsintensive, men bruk av «meta»-modeller kan være en løsning	Behov for å forenkle RTM (f.eks. færre soner, færre segmenter, ingen/færre iterasjoner). Det ligger en del funksjonalitet for dette allerede i CUBE

I tillegg til målene om stor variasjon i framtidsscenarioer og raskere beregningstid, er det også identifisert noen flere generelle mål rundt transportmodellutvikling:

- Mer intuitive transportmodeller
- Bedre visualisering av resultater
- Etterprøvbare og robuste beregninger (spesielt for NKA)

Agent-baserte og aktivitetsbaserte modeller kan oppfattes som mer intuitive for transportplanleggere og folk flest siden disse modellene prøver å etterligne faktiske prosesser (enkeltpersoner som reiser for å gjennomføre aktiviteter). RTM-modellen krever mye innsikt i de underliggende mekanismene og konseptene for å «forstå» hva som skjer i modellen. Et eksempel er «soneattraktivitet» (som styrer destinasjonsvalg i RTM), som er et mye mer abstrakt konsept enn plassering av aktiviteter (som styrer destinasjonsvalg i aktivitetsbaserte modeller).

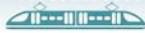
Simuleringsbaserte modeller har trolig et bedre utgangspunkt for visualisering av resultater. Siden resultater kommer mer disaggregert og med eksplisitt tidsdimensjon, finnes det for eksempel bedre muligheter for å bruke videosnutter til å illustrere effektene i nettverk.

Simuleringsbaserte modeller er typisk stokastiske modeller. Det har en fordel ved at modellene kan synliggjøre ulike likevektssituasjoner. For å få robuste resultater som inndata i NKA, innebærer dette at man bør kjøre modellen flere ganger med samme inndata. Dette vil – andre ting likt – innebære lengre beregningstider og er en ulempe fra et praktisk perspektiv. På den andre siden er den metodiske framgangsmåten mer realistisk siden den fanger opp at det vil finnes mange ulike fremtidige likevektssituasjoner i virkeligheten.

Ved siden av spesifikke modellkrav knyttet til egenskaper ved selve tiltakene som skal analyseres, henger spørsmål om best egnet modell også sammen med det konkrete formålet ved analysen. Formålet med analyser varierer ofte mellom

1. steg i planleggingsprosessen (tidlig planleggingsfase, konseptutredning, nytte-kostnadsanalyse, følsomhetsanalyser)
2. overordnet prosess (analyser for Nasjonal transportplan, ruteplanlegging, detaljerte spesialanalyser for utslipp, effekter av nye transportformer osv.).

Merk også at personene som utfører analysene kan være forskjellige (transport-/ruteplanlegger, «modelleksperter», akademiker).



Krav til modellene som brukervennlighet, beregningstid, detaljgrad, presisjonsnivå og robusthet kan være veldig forskjellige for ulike sammenhenger/formål (i tillegg til selve tiltaket). Dette taler egentlig for å ha en stor «verktøykasse», dvs. tilgang til mange ulike transportmodeller. Det finnes imidlertid begrenset med midler til modellutvikling og noen typer analyser krever også etterprøvnbarhet i beregningene og forutsetningene. Dette kan fort bli vanskelig/umulig å opprettholde ved bruk av mange forskjellige modeller.

Med tanke på langsiktig modellutvikling er det derfor viktig å se videre på behovene som finnes, dvs. hvilke tiltak og framtidsscenarioer vi ønsker å kunne fange opp og hvilke brukerkrav som finnes til modellene. Deretter kan vi velge hvilke modelltyper vi bør satse på basert på hvordan ulike modeller kan møte disse behovene.

For detaljerte analyser i by anbefaler vi videreutvikling av agent-baserte modeller og – på sikt – integrering med aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller og arealbruksmodeller.

Dette står også i sammenheng med argumentet om at TraMod_By på mange måter har tatt ut sitt potensial, og at det ikke er hensiktsmessig å presse inn flere elementer i modellkonseptet og kildekode.

Det finnes muligheter for å ta i bruk og utvikle mer funksjonalitet i Cube. Videre bruk av *Cube Voyager* har i midlertidig noen fundamentale begrensinger fordi modellen er statisk og makroskopisk. Innenfor Cube-rammeverket kan man vurdere å ta i bruk en mesoskopisk avviklingsmodell i form av *Cube Avenue*. Å ta i bruk et slikt system vil kreve at man øker (norsk) kompetanse på disse modellene, og at man på sikt utvikler dynamiske etterspørselsmodeller som kan koples opp mot slike typer modeller uten at det krever uheldige datatransformasjoner og informasjonstap.

For dynamiske etterspørselsmodeller anbefales det å utvikle modeller som er mikroskopiske (agent-baserte) og aktivitetsbaserte. Disse modellene har en rik, realitetsnær og intuitiv datastruktur. MATSim kan være et egnet rammeverk for å komme i gang med slike nye typer modeller. At rammeverket er åpen kildekode og har moduler som bygger på koder og erfaringer fra internasjonale miljøer gjør det mulig å ta i bruk modellen forholdsvis raskt. Nye datatyper (som «stordata RVU») vil på sikt også gi bedre og større datagrunnlag for å etablere og estimere aktivitetsplaner og underliggende adferdsparametere for agent-baserte og aktivitetsbaserte modeller.

Possibilities for improved modelling of transport measures in cities

TØI Report 2035/2024 • Authors: Stefan Flügel, Christian Weber, Tom N. Hamre • Oslo 2024 • 91 pages

Transport models are a central tool in transport planning and are constantly being further developed. Trends such as urbanization, micromobility, and automated transport, as well as the increased need for scenario methodology, enhance the need for more dynamic, detailed, and flexible transport models in cities.

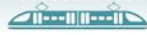
In the present report, we conduct a systematic review of 10 transport measures and highlight specific opportunities for further development of the RTM system, as well as possibilities found in other modeling approaches, including agent-based transport simulation models.

The report summarizes the findings from a project commissioned by NTP Transport Analysis and Economics. The project's task was to identify the needs for further development of the existing model system (RTM) and other methods for transport analysis in cities.

The report is part of a process of assessing and developing future transport models and can be considered a follow-up to TØI Report 1819/2021 "A forward-looking perspective on Norwegian transport models. Opportunities for improved models with a focus on travel in urban areas." In the present report, we conduct a more systematic review of 10 measures and highlight specific opportunities for further development in the RTM model system, as well as the possibilities offered by other modeling approaches.

The report is limited to 10 analysis needs. Based on input from the client, we have selected the following 10 measures/development dimensions:

1. Electric car as a separate mode (means of travel)
2. Change/shift in departure time
3. Flexible tolls/road pricing
4. Parameter adjustment after COVID-19
5. Parking and zero-emission zones
6. Car sharing/Robotaxis
7. Micromobility
8. Fare systems for public transport
9. Traffic flow for (super) buses
10. Microscopic/dynamic traffic management



For a systematic review, we have defined 7 questions to answer for each of the 10 measures:

1. What does the measure involve?
2. Which behavioural dimensions and mechanisms are important to capture?
3. What data is needed?
4. How is the measure or similar measures handled in the current RTM, and what are the limitations?
5. What are the possibilities for further development of the RTM system?
6. Which other methods/models can be used/developed to analyse the measure?
7. How can other models be specifically applied/developed further?

The methodological approach has been:

1. Gathering experiences from project team members and other researchers/consultants
2. Literature review
3. Following up on relevant and ongoing projects around model development
4. Testing selected measures in a model framework for agent-based simulation (MATSim)

In the systematic review, we discuss key needs for capturing various behavioral dimensions and mechanisms. These needs will vary significantly among the 10 measures. Assessing these needs is necessary to determine which model types are expected to provide the best answers to future issues and which model types are worth investing in for future transport planning.

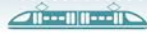
We consider four types of models/model systems relevant for urban transport; three models currently used in Norway (though to varying degrees) and one possible model system for the future.

- Model Type 1 (M1): A classic traffic simulation model with exogenous demand. An example is Aimsun, which is used by SVV to model detailed traffic flow in cities.
- Model Type 2 (M2): The current RTM system with TraMod_by as the demand model and a traffic management model coded in Cube Voyager.
- Model Type 3 (M3): Agent-based traffic simulation models. MATSim and POLARIS are the most commonly used frameworks for agent-based models, though many other options exist.
- Model Type 4 (M4): A model system consisting of a LUTI model (Land Use and Transport Interaction), an activity-based demand model (ABDM), and a traffic simulation model. Such a model system is considered the most comprehensive and detailed system that can be constructed from known models.

Our feasibility study shows that the following measures/model dimensions can be effectively handled within the RTM system:

- Parameter adjustments post-COVID (excluding congestion costs)
- Parking and zero-emission zones
- Electric car as a separate mode
- Flexible tolls (if flexibility is limited to fixed time periods and if changes in departure times are not expected to play a significant role)

Parameter adjustments post-COVID (excluding congestion costs) and parking and zero-emission zones can largely be captured with improved calibration and/or manipulation of utility functions and zone data. Long-term preference changes post-COVID can be captured in the longer term by re-estimating TraMod_By with post-COVID travel data. In the short term, increased remote work should be captured via calibration of the frequency model (fewer work trips).



For electric cars and flexible tolls, further development projects have been conducted since the start of this project. These have led to improved functionality in the RTM or will do so in the near future. It can be argued that 1) the proposed and partially implemented changes largely maximize the potential in the RTM, and 2) the proposals will have limited utility in the long term within static and macroscopic model systems.

For effective modeling of flexible tolls and time-differentiated fare systems, capturing shifts in departure times is crucial. Shifting departure times can be implemented in the RTM to some extent, but it makes the model significantly more complex and computation-intensive. Generally, measures with a more dynamic character are better captured in models with an explicit representation of time.

The same applies to measures like accessibility for (super) buses and microscopic/dynamic traffic management. These are better captured with other types of models. It is technically possible to link TraMod_By with a dynamic and micro-/mesoscopic traffic management model, but the implementation will necessarily involve data transformations to handle different data structures. Integrated models with the same data structure in demand modeling and traffic management (as MATSim has) are preferred. Accessibility for (super) buses can potentially be adequately captured in RTM/Cube Voyager if the interest is in travel times (and not the spatial distribution of congestion) and if resources are allocated to calibrate VDF functions and speed models.

Modeling robotaxis (with endogenous waiting times) and micromobility (with endogenous availability) cannot be effectively captured in the RTM system. Here, state-of-the-art models are considered necessary.

The report discusses how our feasibility study can contribute to formulating recommendations for future transport models. One requirement for transport models that has gained significant traction in recent years is the need to capture the effects of various complex future scenarios and to make the uncertainties in implicit and explicit assumptions transparent.

This leads to two overarching goals:

- To be able to analyze many different future scenarios, including the effects of new technology.
- Faster computation times so that many scenarios/combinations of scenarios can be tested.

These goals place different—and somewhat conflicting—requirements on transport models. The first goal requires flexible transport models, and for some types of analyses, detailed and dynamic models. The second goal requires simplified transport models to reduce computation time.

In this context, it is interesting to consider the differences in analysis needs between urban areas and the regional/national level. Some future scenarios will likely be more central in cities and will therefore require good representation in urban models, while other measures will be more relevant for regional analyses, such as motorway projects. Another example is micromobility, which will require explicit representation in urban analyses, while it can be captured more simply in regional analyses/models, for example, by adjusting down the access time to trains and long-distance buses.

As discussed in the report, the RTM/NTM6 model system is well-suited for regional/national analyses of a strategic nature. For goal 1, it is possible that TraMod_by could be made even more flexible. For goal 2, consideration should be given to simplifying the RTM model (e.g., fewer zones, fewer segments, no/fewer iterations). Some of this is already manageable through options programmed into the Cube user interface.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Rapporten oppsummerer funnene fra et prosjekt på oppdrag fra NTP Transportanalyse og samfunnsøkonomi. Prosjektet hadde som oppgave å kartlegge behov for videreutvikling av eksisterende modellsystem (RTM) og andre metoder for transportanalyser i by.

Rapporten er et ledd i en prosess om vurdering og utvikling av framtidens transportmodeller og kan anses som en oppfølging av TØI rapport 1819/2021 «Transportmodeller mot fremtiden. Muligheter for forbedrede modeller med fokus på reiser i byområder». I foreliggende rapport gjør vi en mer systematisk gjennomgang av 10 tiltak og peker på konkrete muligheter for videreutvikling i RTM-modellsystemet, samt hvilke muligheter som ligger i andre modelleringstilnærminger.

Vi ser både på kortsiktig modellutvikling og modellutvikling lengre frem i tid. Dette er i samsvar med konklusjoner på seminaret om framtidens transportmodeller som fant sted 22.06.21. Referatet fra seminaret konkluderer:

«For fremtidig transportmodellutvikling er det et behov for å vurdere alternativer, muligheter og konsekvenser på kort og lang sikt. Det anbefales et todelt løp for utvikling og vedlikehold av transportmodellene. På kort sikt bør det gjøres tiltak på eksisterende modellsystem, slik at det kan benyttes til løpende analyse- og utredningsbehov. Samtidig bør det startes et langsiktig løp, der en stiller med blanke ark, og tar utgangspunkt i hva behovene er, hvilke drifts- og vedlikeholdskostnader som knytter seg til alternativene, og hvilke ressursrammer som er til rådighet ..».
(Meland 2021)

1.2 Avgrensning og metodisk tilnærming

Rapporten er en mulighetsstudie som beskriver blant annet hvilke forbedringer som *kan* tilføres RTM-systemet, men vi anbefaler ikke direkte hva som *bør* tilføres RTM-systemet. Rapporten peker derimot på forventede utfordringer med RTM-systemet i framtidens transportplanlegging, og viser til forbedringsmuligheter som kan ligge i RTM og andre modellsystemer.

Rapporten handler om tiltak og modelleringsgrep som er relevante for strategiske og taktiske analyseformål. Vi har derfor mindre fokus på veldig finkornede mekanismer og sanntidsmodellering som er mest relevant for operasjonelle analyser.

Rapporten konsentrerer seg om bymodeller. Utviklingsdimensjoner som ivaretar analysebehovet for de spesifiserte tiltakene (se under) vil i hovedsak være 1) mer detaljerte modeller og 2) mer fleksible modeller. Andre forbedringsmuligheter som modellforenkling, kortere beregningstid, bedre til rettelegging for følsomhetsanalyser, sikre konsistens og økt etterprøvnbarhet er ikke sentrale i denne rapporten, men blir kort omtalt i avsnitt 5.4.

Rapporten er begrenset til 10 analysebehov. Etter innspill fra oppdragsgiver har vi valgt følgende 10 tiltak/utviklingsdimensjoner:

1. Elbil som egen mode (reisemiddel)
2. Endre/forskyve avreisetid
3. Fleksible bompenger/veiprisering
4. Parameterjustering etter korona
5. Parkering og nullutslippssoner
6. Bildeling/Robotaxier

7. Mikromobilitet
8. Takstsystemer for kollektivtransport
9. Framkommelighet for (super)buss
10. Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling

For en systematisk gjennomgang har vi definert 7 spørsmål¹ som vi skal svare ut for hvert av de 10 tiltakene:

1. Hva går tiltaket ut på?
2. Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?
3. Hvilke data trengs?
4. Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensningene?
5. Hvilke muligheter finnes for videreutvikling av RTM-systemet?
6. Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?
7. Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Metodetilnærmingen har vært:

- 1) Å samle erfaringer blant prosjektmedarbeidere og andre forskere/konsulenter
- 2) Litteraturgjennomgang
- 3) Følge opp aktuelle og pågående prosjekter rundt modellutvikling
- 4) Uttesting av utvalgte tiltak i MATSim

ChatGPT-4 ble brukt som redigeringshjelp i noen av avsnittene og til oversettelse av den engelske sammendraget.

En viktig avgrensning er at vi først og fremst ser på persontransport. Noen adferdsdimensjoner (rutevalg) og mekanismer (dynamisk trafikkavvikling) vil også ha betydning for godstransport, og for relevante tiltak vil vi også diskutere godstransport. Mens denne rapporten ble skrevet foregikk det flere prosjekter parallelt. Flere utviklingsprosjekter er dokumentert i Hamre and Rekdal (2024).

1.3 Rapportstruktur

Kapittel 2 gir en oversikt over de ti tiltakene og aktuelle modeller.

Kapittel 3 er en systematisk gjennomgang av de 10 tiltakene. Vi besvarer alle 7 spørsmål for hvert tiltak, og kapittel 3 består derfor av 70 underavsnitt. Teksten for hvert av de 10 tiltakene er selvstendig, og man trenger ikke å ha lest tidligere delkapitler for å forstå konteksten.

Kapittel 4 oppsummerer de empiriske analysene som ble gjort i forbindelse med dette prosjektet. Kapittel 5 inneholder en diskusjon og konklusjon.

Rapporten inneholder ingen detaljerte beskrivelser av metodikken bak transportmodeller, og den forutsetter kjennskap til modellsystemet RTM. For en mer dekkende beskrivelse av agent-baserte modeller henviser vi til TØI rapport 1358/2014 og 1819/2021. RTM-systemet er nærmere beskrevet blant annet i Tørset et al. (2022).

1.4 Ordforklaring

Det er noen sentrale begreper som går igjen i rapporten. Disse er kort definert i Tabell 1.1.

¹ Opprinnelig, vi definerte 10 spørsmål. Etter avklaring med oppdragsgiverne dette ble forenklet i seinere versjoner av rapporten.

Tabell 1.1: Begrepsforklaring.

Ord/Forkortelse	Kort definisjon
Modell	En forenklet representasjon av et fenomen eller system
Transportmodell	En forenklet og matematisk representasjon av (deler av) transportsystemer
Simuleringsmodell	En modell som imiterer oppførselen til et reelt system over tid (f.eks. sekund-for-sekund)
Transportsimuleringsmodell	En modell som imiterer oppførselen til (deler av) et transportsystem over tid
Reise / tur	En forflytning av en person fra A til B med en konkret hensikt (det utføres en aktivitet ved B)
Delreise /deltur	Et avsnitt av en reise som ikke nødvendigvis starter eller slutter ved en aktivitet (men f.eks. et nytt transportmiddel ved bytte)
Heldaglige aktivitetsplaner	En liste over alle aktiviteter og reiser en person gjør på en dag (kalles for reisedagbok hvis listen er observert eller rapportert)
Døgnfordeling (i forbindelse med adferdsmodellering)	Fordeling som viser variasjon av avreisetidspunkt (eller ønsket ankomsttidspunkt) over et døgn (kan være på time, minutt eller sekundnivå)
Adferdsdimensjon	Et valg en person kan ta (transportmiddelvalg, destinasjonsvalg, valg av avreisetidspunkt, rutevalg ...)
Eksogen adferdsdimensjon	Er representert ved faste inndata og predikeres ikke av selve modellen. I flytdiagrammene i denne rapporten er det elementer uten pil til seg.
Endogen adferdsdimensjon	Er beregnet/predikert innad i modellsystemet
Transportnettverk	Består av noder og lenker der noder representerer kryss og lenker representerer veier
Sonesystem	Romlig oppdeling av modellen, typisk på grunnkrets nivå
OD-matrise	Inneholder antall turer mellom hvert sonepar. (O=origin, D=destination)
LoS-matrise	Inneholder egenskaper ved reisen (kostnad, ombordtid, tilbringertid, ventetid osv.) mellom hvert sonepar.
Strategisk transportmodell	En modell med endogen etterspørsel som er implementert for mer langsiktige prognoser på minst et regionalt nivå.
Taktisk transportmodell	En modell med delvis endogen etterspørsel som er implementert for mer kortsiktige prognoser på minst et bydelsnivå.
Operasjonell transportmodell	En modell med eksogen etterspørsel som er implementert for kortsiktig og detaljert trafikkavviklingsanalyse, vanligvis på vegstreknings- eller kryssnivå.
Etterspørselsmodell	Et modellsystem som beskriver om, hvor og med hvilket transportmiddel folk reiser. Den tar vanligvis reisekostnader og reisetider fra nettverket som inndata, og predikerer antall reiser og deres opprinnelse/destinasjon.
Trafikkavviklingsmodell/nettverksmodell	Et modellsystem av rutevalg og trafikkflyt som tar opprinnelse/destinasjon av reiser som inndata, og predikerer trafikkavvikling og reisetider
Transportmodellsystem	Et gjensidig koblet system av en etterspørselsmodell og en trafikkavviklingsmodell.
Statisk transportmodell	En transportmodell som representerer stasjonære forhold innen en forhåndsbestemt tidsperiode
Dynamisk transportmodell	En transportmodell som eksplisitt tar med tidseffekter i alle transportprosesser den representerer.
Kvasi-dynamisk transportmodell	En mellomting mellom statiske og dynamiske modeller som bruker et sett av statiske modeller som er tidsmessig knyttet sammen på en forenklet måte
Makroskopisk transportmodell	Representerer etterspørsel og nettverksflyt i aggregerte tall og løses i et matematisk program.
Mikroskopisk transportmodell	Opprettholder integritet til alle individuelle enheter (dvs. uten aggregering) og løses ved eksplisitt simulering av prosessinteraksjoner.
Deterministisk transportmodell	En (typisk makroskopisk) modell som ikke tar hensyn til usikkerhet og forsøker å representere gjennomsnittsførhold
Stokastisk transportmodell	En modell som tar hensyn til usikkerhet og produserer en sannsynlighetsfordeling av predikasjoner
Soneattraksjonsbasert etterspørselsmodell	Reiser mellom soner er beregnet ut fra en funksjon av egenskaper i hver sone og generaliserte reisekostnader mellom soner; det grunnleggende konseptet i 4-trinnsmodeller.
Aktivitetsbasert etterspørselsmodell	En tilnærming til transportmodellering der reiser er avledet fra etterspørsel etter aktivitetene

Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by

Ord/Forkortelse	Kort definisjon
Reisebasert etterspørselsmodell	Opererer basert på uavhengige turer mellom opprinnelsessteder og destinasjoner.
Reisekjedebasert etterspørselsmodell	Opererer basert på tursekvenser som starter og ender på samme sted.
Heldagsbasert etterspørselsmodell	Opererer basert på heldaglige reisesekvenser og inkluderer en tidsdimensjon.
Segmenteringsmodeller	Representasjon av den reisende befolkningen ved hjelp av en begrenset mengde homogene undergrupper
Syntetisk befolkning	Et sett av syntetiske individer (agenter) som har statistiske egenskaper i samsvar med den virkelige befolkningen
Deterministisk rutevalg	Antar at den reisende velger ruten med lavest kostnad i modellen.
Stokastisk rutevalg	Antar at reisende velger ruten med lavest subjektiv kostnad. Usikkerheten rundt denne subjektive oppfatningen er representert ved å tillate valg av ruter som har noe høyere kostnad enn laveste kostnad i modellen.
Statisk rutevalg	Tar ikke hensyn til tid på døgnet, verken ved vurdering av rutekostnader eller når den predikere rutevalg.
Dynamisk rutevalg	Tar hensyn til tidsmessig avhengighet av reisekostnader og predikerer tidsavhengig rutevalg
Mikroskopisk rutevalg	Definerer diskrete valg av rute for enkelte reisende ellerkjøretøy
Makroskopisk rutevalg	Definerer valg av rute for grupper av reisende/kjøretøy
Statisk trafikkflytmodell	En modell som fordeler kjøretøyene på lenkene for en bestemt periode; kan tolkes som den representerer stillestående forhold.
Dynamisk trafikkavviklingsmodell	En modell som fordeler kjøretøyene på lenkene ved å eksplisitt ta hensyn til tidsdimensjonen, og som fanger opp tidsmessige forandringer og avhengigheter
Mikroskopisk trafikkavviklingsmodell	En modell som predikerer rutevalg og simulerer hvert enkelt kjøretøy for seg.
Mesoskopisk trafikkavviklingsmodell	En mikroskopisk modell med rutevalg og/eller kjøretøybevegelser på et mer aggregert nivå av kjøretøygrupper.
Makroskopisk trafikkavviklingsmodell	En modell hvor rutevalg og trafikkavvikling beregnes som strømmer av aggregerte kjøretøygrupper.
RTM	Regional transportmodell; norsk transportmodellssystem for daglige reiser under 70 km
RTM23+	Regional transportmodell for Oslo-regionen
TraMod_by	Strategisk etterspørselsmodell som er en del av RTM-systemet; statisk og makroskopisk
Cube Voyager	Et statisk og makroskopisk trafikkmodellerings-verktøy som RTM-systemet er programmert og tilrettelagt i.
MATSim	Åpen-kilde rammeverk for agent-basert trafikksimulering
Aimsun	Kommersielt verktøy for transportanalyser/trafikkavvikling
SIM-Mobility	State-of-the-art modell fra Singapore
TraModSim	En kobling mellom MATSim og RTM som beskrevet i TØI-rapport Flügel et al 2023
BIG	En bilkjøpsmodell utviklet av TØI (Fridstrøm og Østli 2018)

2 Innledende diskusjon om tiltak og modellutviklingskrav

2.1 Arbeidsdefinisjon av tiltakene

I den systematiske gjennomgangen i kapittel 3 beskriver vi mer detaljert hva de ulike tiltakene går ut på. For den innledende diskusjonen i dette kapittelet definerer vi alle de 10 tiltakene mest mulig kort og presist.

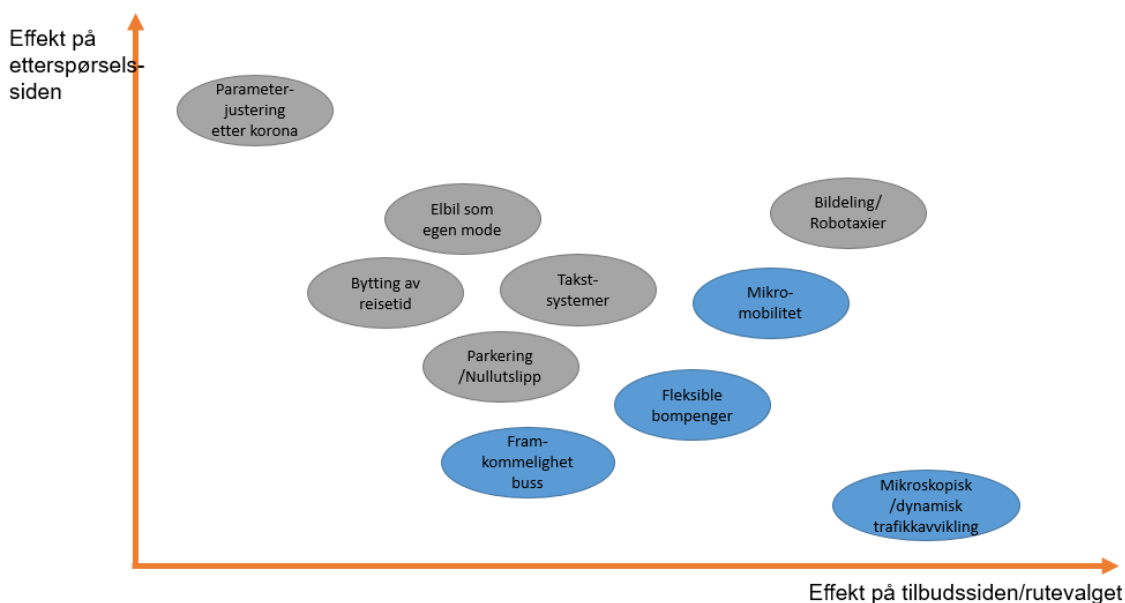
Tabell 2.1: Arbeidsdefinisjon for tiltakene.

Tema	Arbeidsdefinisjon
Elbil som egen mode	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Inkluderer informasjon om tilgang til elbil (eksogent eller endogent) 2) Modellere valg av elbil i transportmiddelvalgmodell (endogent) 3) Fanger opp ulike transportkostnader for ulike drivstofftyper og inkluderer denne informasjonen i etterspørselsmodellen og i rutevalget
Bytting/forskyvning av reisetidspunkt	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Reiser kan endre avreisetidspunkt på tvers av tidsperioder (i det minste mellom rush og ikke-rush) 2) Mekanismer for dette inkluderer a) informasjon om døgnfordeling eller preferanser for ankomsttid, b) tidsavhengige transportkostnader
Fleksible bompenger/veiprising	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Tidsdifferensierte bompenger eller veiprising, i det minste for rush/ikke rush, ideelt per time 2) Trafikantenes adferdstilpasning til dette (både i etterspørsel og trafikkavvikling), ideelt inklusive endret avreisetidspunkt. 3) Modellering av timesregler og andre rabatter 4) Mulighet for dynamisk prising
Parameterjustering etter korona	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Fleksibel endring av rammebetingelser (reisehensiktsfordeling, døgnfordeling), f.eks. gjennom kalibrering av modeller for turgenerering av destinasjonsvalg) 2) Mulighet for å endre adferdsparametre (i det minste tidsverdier, ideelt også trengselskostnader)
Parkering og nullutslippssoner	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Tilgjengelighet og/eller kostnader for bilparkering avhenger av faktisk/gjennomsnittlig tid for parkering 2) Mulighet for å innføre restriksjoner (inkl. forbud) mot å bruke noen biltyper i geografisk avgrensede områder
Bildeling/Robotaxier	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Tilgjengelighet etter tradisjonell bildeling og – ved opsjon – robotaxier (her uten samkjøring) fanges opp i modellering av biltilgang 2) Tidsavhengige ventetider til delte biler/robotaxier som funksjon av tilbud og etterspørsel (endogen) 3) Etterspørselsvirkninger av endrete kjørekostnader og lavere tidsverdi i robotaxi (sammenlignet med å kjøre selv) 4) Biler uten passasjer (tomme robotaxier som henter nye kunder) modelleres/simuleres i trafikkavviklingen
Mikromobilitet	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Tilgjengelighet til private og delte el-sparkesykler eller lignende små kjøretøy (eksogent eller endogent) 2) Transportmiddelvalg for el-sparkesykler eller liggende små kjøretøy der reisetiden er resultat av modellert/simulert rutevalg med disse kjøretøy

Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by

Tema	Arbeidsdefinisjon
Takstsystemer i kollektivtransport	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Mulighet for å spesifisere nye rabattordninger som kvantumsrabatt og medlemskap 2) Mulighet for å spesifisere tidsdifferensierte priser 3) Mulighet for å spesifisere sonebaserte og distanseavhengige priser 4) Effekter av 1)-3) på etterspørsel (ideelt inkl. avreisetidspunkt) og rutevalg/valg av driftsform (ideelt på avgangsnivå)
Framkommelighet (super)buss	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Reisetid for busser avhenger av trafikkavviklingen på ruten 2) Mulighet for å modellere at busser får tilgang til dedikerte filer i veinettet eller egne traseer (super-buss)
Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling	Modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer: 1) Mikroskopisk og dynamisk rutevalg 2) Mesoskopisk (hvis mulig: mikroskopisk) trafikkflyt 3) Dynamisk modellering av romlig utbredelse av køer

Vi kan rangere tiltakene/modelleringsgrepene avhengig av om de har stor eller liten effekt på etterspørselen (OD-matriser) og/eller tilbudet (LoS-matriser). Dette er illustrert i Figur 2.1. Blå farge indikerer at tiltaket i større grad påvirker tilbudet enn etterspørselen, mens grå farge indikerer at tiltaket i større grad påvirker etterspørselen enn tilbudet.



Figur 2.1: Vektlegging av tiltak på elementer i etterspørsels- og tilbudssiden av transportmarkedet (blå: tilbudssiden mer påvirket; grå: etterspørselssiden mer påvirket).

For eksempel vil parameterjustering etter korona først og fremst påvirke etterspørselssiden. I RTM-systemet vil dette altså påvirke OD-matrisene, og ikke LoS-matrisene². Parameterjustering etter korona er derfor fargelagt grå.

De fleste tiltak vil ha direkte effekter på begge sider av transportmarkedet. I disse tilfellene er det viktig å fange opp tiltaket både i etterspørsels- og i trafikkavviklingsmodellen.

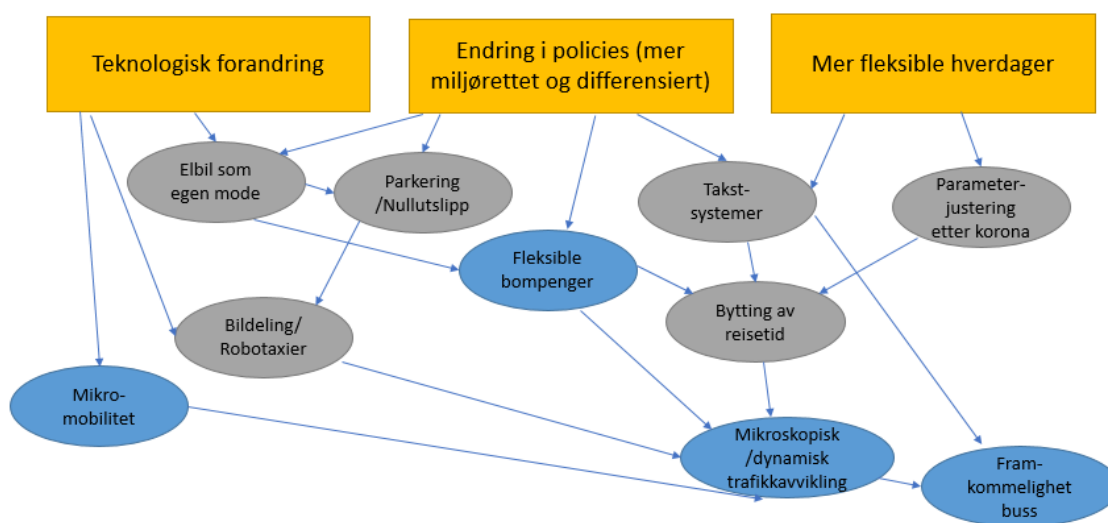
² Indirekte effekter etter iterering med avviklingsmodell er mulig

2.2 Tematisk avhengighet mellom tiltakene

Tiltakene som er definert i forrige avsnitt har en viss tematisk avhengighet. Figur 2.2 illustrerer noen av de mest opplagte direkte effektene.

Figuren tar også for seg 3 sentrale trender (teknologisk forandring, mer “miljøvennlig” og differensierte tiltak og mer fleksible hverdager) som delvis motiverer tiltakene.

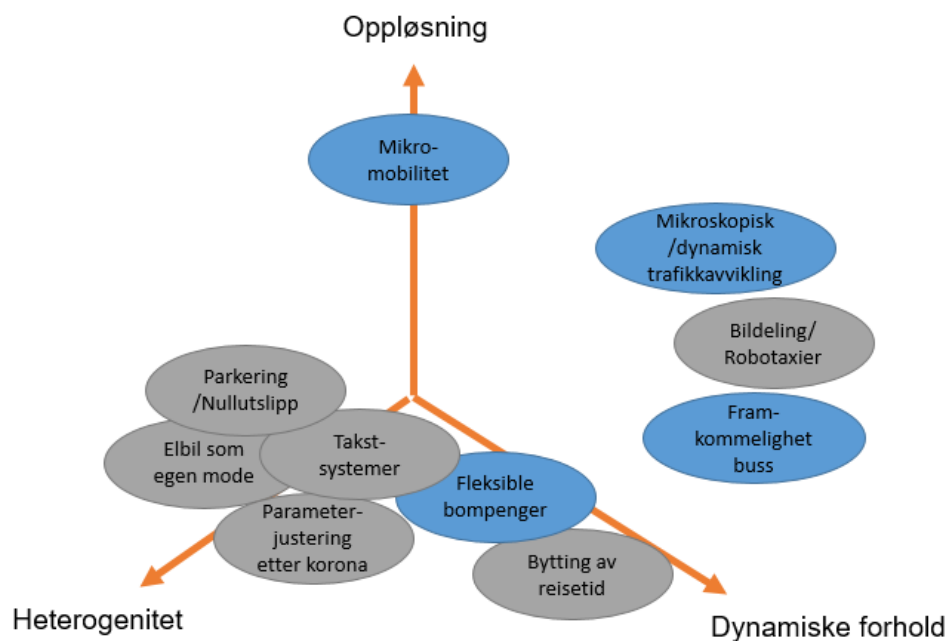
Figur 2.2 viser ikke hele bildet, og i virkeligheten vil noen av tiltakene være gjensidig avhengige. For eksempel vil tidsdifferensierte takstsystemer påvirke i hvilken grad folk vil endre avreisetidspunkt. Men for å predikere transportmiddelvalg ved nye takstsystemer må vi først vite i hvilken grad personer er tilbøyelig til å endre avreisetidspunkt. Dataflyt og sammenhenger i transportmodellen vil derfor være ulik og mer sammensatt enn illustrert i figuren under.



Figur 2.2: Sentrale tematiske sammenhenger mellom de 10 tiltakene (NB! Figuren viser ikke dataflyt i transportmodeller, som gjerne går i begge retninger).

2.3 Perspektiver for modellutvikling i by

Som beskrevet i TØI rapport 1819/2021 kan man systematisere behov for modellutvikling i by langs tre dimensjoner: a) heterogenitet, b) oppløsning og c) dynamiske forhold. Figur 2.3 gjør et forsøk på en innledningsvis kartlegging av tiltakene etter disse tre dimensjoner.

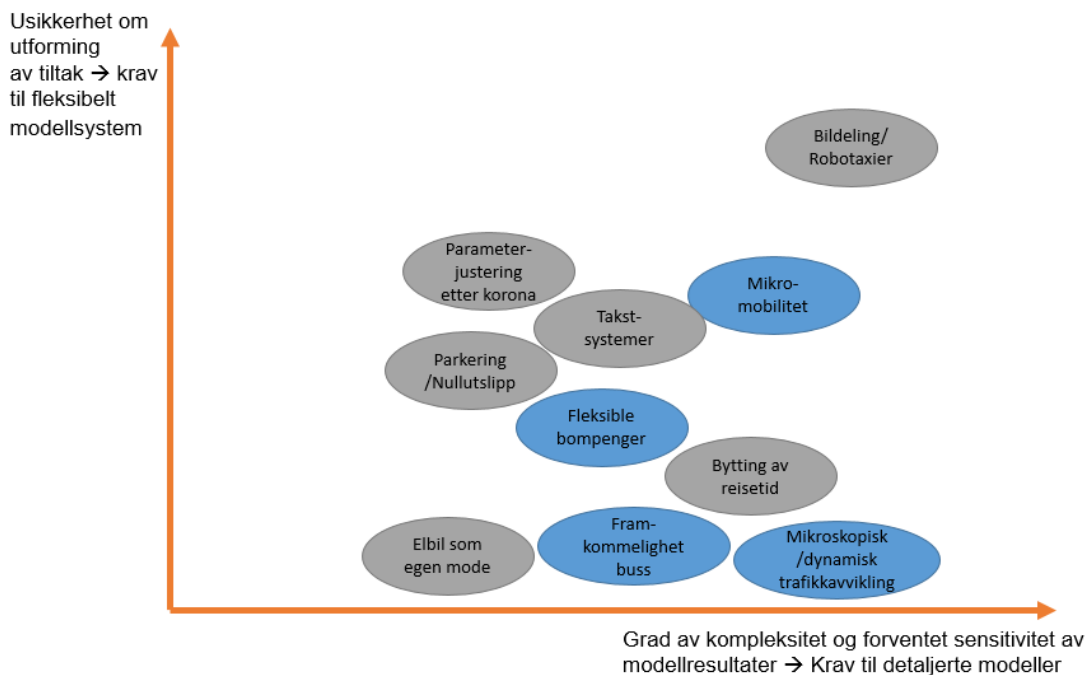


Figur 2.3: Illustrasjon av 10 tiltak i lys av 3 modellutviklingsdimensjoner.

Ved siden av noen fundamentale begrensninger (sone-struktur, forhåndsbestemte befolkningssegmenter og statisk modellering innenfor gitte tidsperioder) kan det argumenteres for (se TØI rapport 1819/2021) at RTM-modellsystemet har en grunnleggende svakhet ved at modellsystemet er forholdsvis uflexibelt. Dette gjelder både i anvendelse (utover funksjonaliteten som ligger i Cube-grensesnittet) og i modellutviklingen.

Figur 2.4 er et forsøk på å plote de 10 tiltakene i to nye dimensjoner. Dimensjon 1 (vannrett akse) «krav til detaljerte modeller» kan tenkes som en «sum» av de tre dimensjonene heterogenitet, oppløsning og dynamiske forhold. Disse er også vist i figur 2.3, men der kun som en illustrasjon av den relative betydningen av disse 3 dimensjonene. Dimensjon 2 i figur 2.4 (loddrett akse) angir behovet for fleksibilitet i modellsystemet, som henger sammen med usikkerhet om hvordan disse tiltakene vil være utformet i fremtiden.

Tiltakene som scorer høyt her ligger typisk litt lengre fram i tid, eller kan endres fortløpende og plutselig som følge av ny teknologi. Dette gjelder i høyeste grad robotaxier som krever både detaljerte modeller, for å fange opp dynamikken mellom tilbud og etterspørsel på enkeltindividnivå med høy geografisk oppløsning, og fleksible modeller, for å kunne tilpasse modellen til ulike spesifiseringer av framtids-scenarier med robotaxier. I andre enden av skalaen ligger tiltak som omhandler elbiler for persontransport. Disse er forholdsvis enkle å fange opp, og økt detaljeringsgrad kan oppnås med enkle segmenteringer og parallelle beregninger. Tiltakene er relativt forutsigbare og krever i liten grad fleksible transportmodeller for persontransport.



Figur 2.4: Tiltakenes krav om fleksible og detaljerte modellsystemer.

2.4 Vurderte modelltyper

I den systematiske gjennomgangen i kapittel 3 diskuterer vi sentrale behov for å fange opp ulike adferdsdimensjoner og mekanismer. Behovene vil variere betydelig mellom de 10 tiltakene. For eksempel så vil det å kunne fange opp preferanser etter korona kreve at en modellerer helt andre adferds-elementer og mekanismer (reisefrekvens, preferanser for trengsel osv.) enn det modellering av mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling (rutevalg, romlig utbredelse av kø) gjør i dag. Vurdering av behovene vil være nødvendig for å finne ut av hvilke modelltyper som kan forventes å gi de beste svarene på fremtidige problemstillinger og hvilke modelltyper det er verdt å satse på i transportplanleggingen fremover.

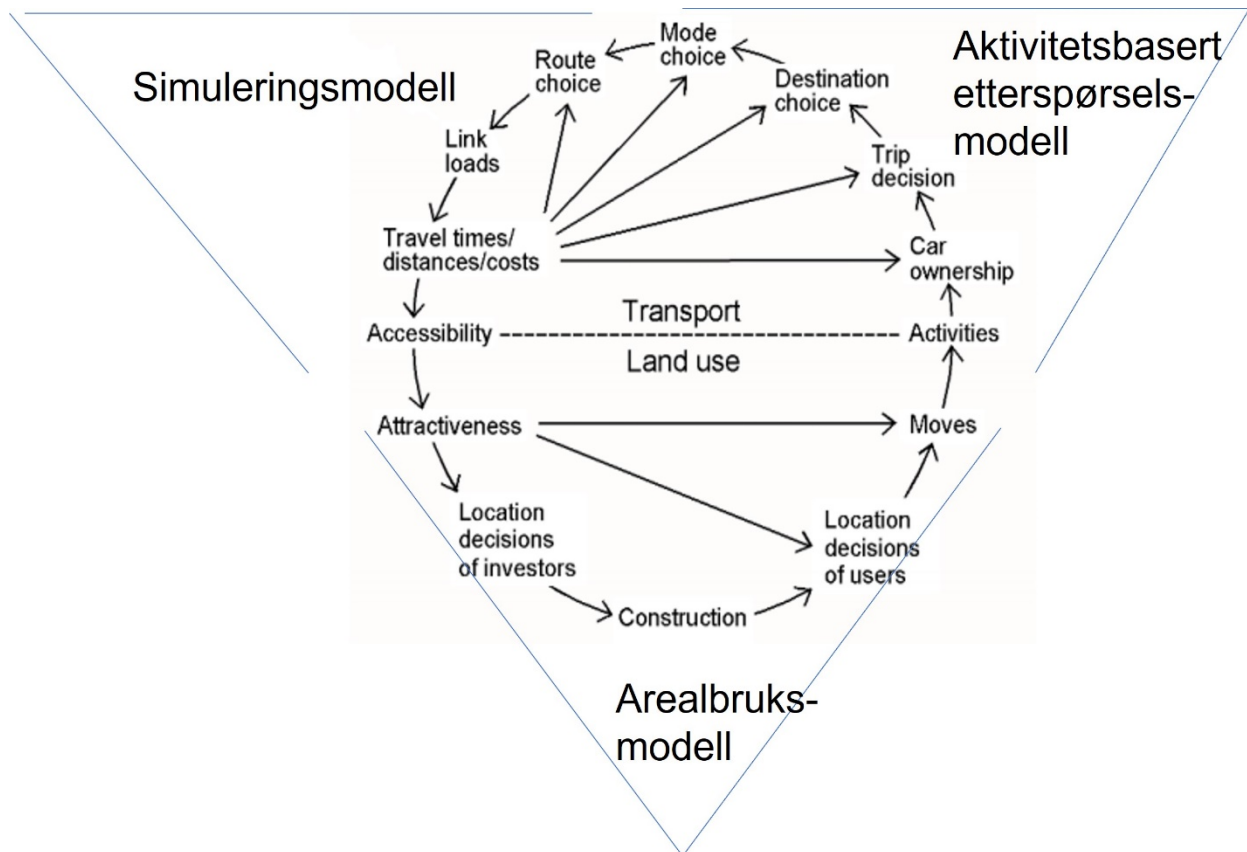
I dette avsnittet gir vi en kort oversikt over de ulike modelltypene og deres egnethet til å håndtere ulike adferdsdimensjoner og mekanismer.

Vi ser på fire typer modeller/modellsystemer som er relevante for bytransport; tre modeller³ som er i bruk i Norge i dag (riktignok i sterkt varierende grad) og ett mulig modellsystem for fremtiden.

- Modelltype 1 (M1) er en klassisk trafikksimuleringsmodell med eksogen etterspørsel. Et eksempel på dette er Aimsun som anvendes av SVV for å modellere detaljert trafikkflyt i byer. Det finnes et titalls slike modeller (se vedlegg A for en oppstilling med ulike referanser).
- Modelltype 2 (M2) er dagens RTM-system med TraMod_by som etterspørselsmodell og trafikkavviklingsmodell kodet i Cube Voyager.

³ Vi inkluderer i dette avsnittet kun modeller med en nettverksutlegging for veitrafikk. Modellverktøyene Trenklin, MPM og ADA er derfor ikke inkludert her. Disse vil dog være relevante for enkelte tiltak.

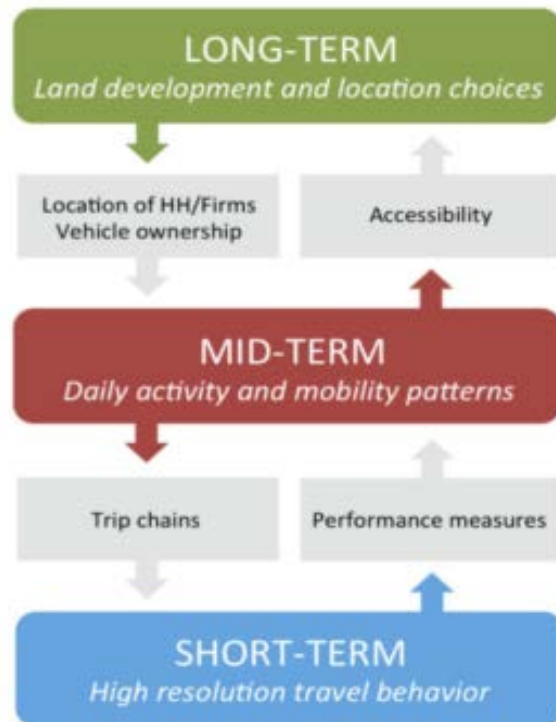
- Modelltype 3 (M3) er agent-baserte trafikksimuleringsmodeller. MATSim og POLARIS er de mest brukte rammeverkene for agent-baserte modeller, men det finnes mange flere alternativer (se vedlegg A for en oppstilling).⁴
- Modelltype 4 (M4) er et modellsystem bestående av en LUTI-modell, en aktivitetsbasert etterspørselsmodell (ABDM) og en trafikksimuleringsmodell. Et slik modellsystem ansees å være det mest omfattende og mest detaljerte system som man kan bygge sammen ut fra kjente modeller. Figur 2.5 illustrerer hvordan en slik modell kan være sammensatt.



Figur 2.5: Strukturen i et mulig "state-of-the-art" transportmodellsystem. Figur er tilpasset basert på Wegener (2014).

Vi er ikke kjent med mange slike transportmodellsystemer, men SimMobility (Adnan et al., 2016) virker å følge en slik struktur. SimMobility inneholder en aktivitetsbasert etterspørselsmodell som kombineres med en trafikksimuleringsmodell (for kortsiktige/detaljerte analyser) og en arealbruksmodell (for langsiktige analyser). Figur 2.6 viser den overordnet strukturen av modellen. Slike transportsystemer refereres til som «multi-scale» siden de integrerer flere moduler med ulik detaljeringsgrad. SimMobility er gjennomgående agent-basert og tillater derfor effektiv dataflyt mellom modulene.

⁴ MATSim er noe mer utbredt enn POLARIS: "Among the several agent-based transport models that are currently under continued development, MATSim takes a special role and can be considered the currently most widely applied model." Anda, C., Erath, A., & Fourie, P. J. (2017). Transport modelling in the age of big data. *International Journal of Urban Sciences*, 21(sup1), 19-42. <https://doi.org/10.1080/12265934.2017.1281150>



Figur 2.6: Oversikt SimMobility (kilde: Adnan et al. (2016)).

Tabell 2.2 viser hvordan ulike adferdsdimensjoner er håndtert i ulike modelltyper. Vi inndeler i:

- «Ikke inkludert»: adferdsdimensjonen fanges ikke opp eller spiller ingen rolle i modellsystemet
- «Eksogent»: adferdsdimensjonen er representert ved faste inndata og predikeres ikke av selve modellen
- «Endogent»: adferdsdimensjonen predikeres innad i modellsystemet. I noen tilfeller legger vi til «detaljert» eller «forenklet» for å indikere detaljeringsgraden i hvordan adferdsdimensjonen modelleres.

Tabell 2.2: Adferdsdimensjoner og mekanismer i de fire ulike modelltypene.

Adferdsdimensjon	M1: Klassisk trafikksimulering med eksogen etterspørsel	M2: RTM-system (TradMod_by + Cube Voyager)	M3: Agent-baserte trafikkm modeller (f.eks. en standard MATSim-modell)	M4: LUTI+ABDM+ trafikksimulering
Bosettings-/arbeidsstedsvalg	Ikke inkludert	Eksogent (arbeidssted endogent, som del av destinasjonsvalg for arbeidsplasser)	Eksogent	Endogent
Biltilgang	Ikke inkludert	Endogent	Eksogent	Endogent
Valg av/kjøp av biltype	Ikke inkludert	Eksogent	Eksogent	Eksogent (muligens endogent)
Valg av periodekort	Ikke inkludert	Endogent (arbeidsreiser)	Eksogent	Endogent
Reisefrekvens	Eksogent	Endogent	Eksogent	Endogent
Destinasjonsvalg	Eksogent	Endogent	Eksogent	Endogent
Transportmiddelvalg	Eksogent	Endogent	Endogent (noe forenklet)	Endogent
Valg av avreisetidspunkt	Eksogent	Ikke inkludert	Endogent	Endogent
Valg av rute	Endogent	Endogent , noe forenklet	Endogent , detaljert	Endogent , detaljert
Kjøreadferd som påvirker trafikkflyt	Endogent	Ikke inkludert	Endogent (sterkt forenklet)	Endogent (noe forenklet)

I M1 leses etterspørselen inn som eksogene data og det modelleres rutevalg og kjøreadferd i veinettet.

I M2 modelleres etterspørselen med en modell for biltilgang og klassiske modeller for reisefrekvens, transportmiddel- og destinasjonsvalg. Uten bruk av tilleggsmodeller ligger tidsperioden fast og etterspørselen leses inn «statisk» i en trafikkavviklingsmodul i Cube Voyager. I Cube Voyager legges trafikken ut på nettverket. Rutevalget modelleres på en makroskopisk og deterministisk (og dermed litt forenklet) måte og LoS-matriser oppdateres før disse sendes tilbake til etterspørselsmodellen.

I M3 tar man utgangspunkt i faste lister som representerer reiseplaner for en syntetisk befolkning. I M3 modelleres endringer i transportmiddelvalg, avreisetidspunkt og rutevalg for hver agent (enkeltperson) i den syntetiske befolkningen.

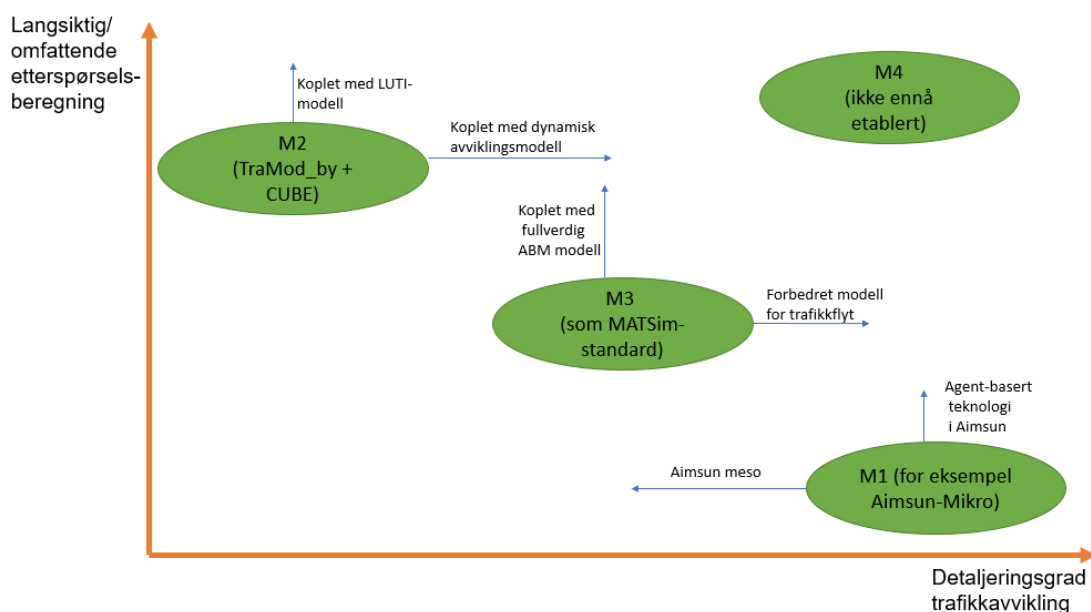
Ved M4 vil de fleste adferdsdimensjoner kunne modelleres endogent. Ideelt sett bør oppbygningen være modulær slik at man kun kjører modulene isolert ved behov. Samtidig skal modulene være integrerte og konsistente med hverandre. Den ideelle enheten for dette er agent-basert, evt. hushold-basert. Dette gjelder også den langsiktige modulen selv om agent-basert tilnærming virker mindre utbredt for arealbruksmodellering.

Tabell 2.3 gir en oversikt over hvordan sentrale mekanismer håndteres/vil håndteres.

Tabell 2.3: Mekanismer i ulike modelltyper.

Mekanismer	M1: Klassisk trafikkmodellering med eksogen etterspørsel	M2: RTM-system (TraMod_by + Cube)	M3: Agent-baserte trafikkmodeller (f.eks. en standard MATSim-modell)	M4: LUTI+ABD+trafikkmodellering
Heterogenitet i preferanser	Tilfeldig variasjon i rutevalget	Systematisk (persongrupper, reisehensikt, ...)	Potensielt detaljert	Potensielt detaljert
Preferanseendring over tid	Ikke inkludert	Nei, men mulig å fange opp prinsipielt	Nei, men mulig å fange opp prinsipielt	Nei, men mulig å fange opp prinsipielt
Kapasitetsavhengige reisetider	Ja, veldig detaljert	Ja (VDF-funksjoner)	Ja, detaljert	Ja, detaljert
Romlig utbredelse av kø	Ja, veldig detaljert	Nei	Ja, detaljert	Ja, detaljert
Korrespondanse og forsinkelser (kollektivtransport)	Ikke relevant	Forenklet	Potensielt detaljert	Potensielt detaljert
Reisetidsvariabilitet	Ja, men ingen feedback til etterspørselen	Nei (reisetider kapasitetsavhengig men deterministiske)	Mulig (stokastiske reisetider)	Mulig (stokastiske reisetider)
Dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilgjengelighet /ventetid	Nei (eksogen etterspørsel)	Nei (ingen dynamikk)	Kan fanges opp (f.eks. for robotaxier)	Kan fanges opp (f.eks. for robotaxier)
Aktivitetsplanlegging ("scheduling")	Typisk ikke inkludert	Nei (ingen dynamikk)	Eksogent (scheduling delvis endogent)	Endogent
Kapasitetsavhengig reisekomfort/tidsverdier	Ikke inkludert (men teknisk mulig)	Begrenset (generalisert reisetid i rush)	Kan fanges opp	Kan fanges opp
Nettutlegging av soneinterne reiser	Ja, begrenset hvis etterspørsel kommer fra OD-matriser	Nei	Ja	Ja

Figur 2.7 illustrerer to overordnede egenskaper ved modellene. Y-aksen viser langsiktig og omfattende etterspørselsberegning (bosettingsvalg, destinasjonsvalg, reisefrekvens), mens x-aksen viser detaljeringsgrad i trafikkavviklingen (dynamisk oppbygging av kø, mikroskopiske interaksjoner).

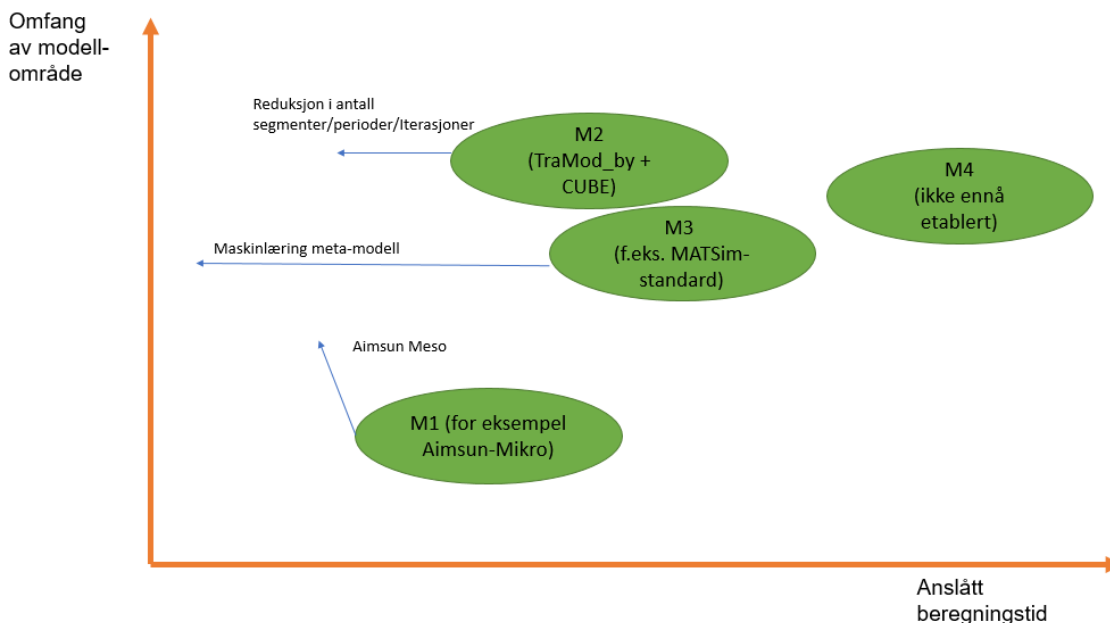


Figur 2.7: Modelltypenes kapabilitet.

Blant «dagens» modeller (M1 til M3) har RTM (M2) størst omfang av langsiktig etterspørselsberegning, mens klassiske mikroskopiske simuleringmodeller (M1) har høyest detaljeringsgrad i trafikkavvikling. En standard MATSim modell (M3) ligger et sted mellom disse. Et «state-of-the-art» transportmodellsystem (med en vellykket integrering av en LUTI-modell) vil score noe bedre enn RTM på omfattende etterspørselsmodellering og likt/noe dårligere enn klassiske trafikksimuleringsmodeller på detaljeringsgrad i trafikkavvikling (avhengig av detaljeringsnivå til den integrerte simuleringmodellen).

Det er viktig å huske at dagens modeller kan bli utvidet slik at de vil forbedres i én eller begge dimensjoner. Dette er illustrert med pilene i figur 2.7. En standardmodell i MATSim kan f.eks. score omtrent likt som RTM på langsiktig etterspørselsmodellering om den er koblet mot en fullverdig aktivitetsbasert etterspørselsmodell. På den andre siden kan dagens mesoskopiske trafikkflytmodeller bli erstattet av en mikroskopisk versjon. I dette tilfellet ville den få omtrent samme detaljeringsgrad som en mikroskopisk Aimsun-modell.

Fra et praktisk perspektiv er geografisk omfang og beregningstid viktige faktorer (figur 2.8). M2-M4 kan uten videre anvendes på større byområder, mens klassiske mikroskopiske simuleringmodeller typisk er noe mer begrenset i omfang. Det er selvfølgelig en trade-off mellom omfang og beregningstid, og man kan sikkert bygge større scenarier hvis man godtar lengre beregningstider.



Figur 2.8: Mulig geografisk omfang og forventet beregningstid for ulike modelltyper.

Beregningstiden i RTM kan reduseres ved bruk av færre segmenter, færre tidsperioder og/eller færre iterasjoner mellom TradMod_by og Cube.

I et pågående NFR-prosjekt⁵ jobbes det med å bygge maskinlæringsbaserte meta-modeller på toppen av MATSim-kjøringer. En vellykket implementering vil redusere beregningstiden betraktelig.

Beregningstiden til M4 er noe uklar, men må regnes å være betraktelig større enn med dagens modell-systemer.

⁵ <https://www.toi.no/project-prelong/>

3 Systematisk gjennomgang av 10 tiltak / modelleringsgrep

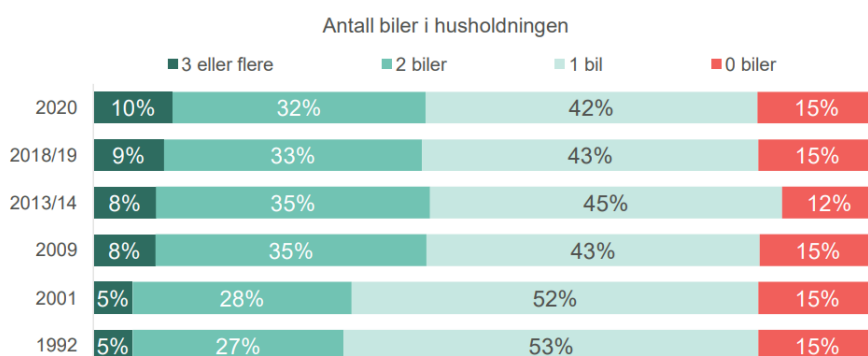
3.1 Elbil som egen mode

3.1.1 Hva går tiltaket ut på?

Elbiler medfører ulike transportkostnader for den reisende og ulike eksterne kostnader for samfunnet. Transportkostnader antas å påvirke reisendes adferd og disse burde representeres i modellen på best mulig måte. Eksterne kostnader antas å ikke påvirke reisendes adferd, men er viktig i etterberegning av resultatene (nytte-kostnadsanalyser, utslippsberegninger osv.). Ulike eksterne kostnader alene taler for at modellen i størst mulig grad kan segmentere modellresultater etter biltype. Ulike transportkostnader motiverer videre til å inkludere informasjon om elbil i de implisitte beregningene i modellen i rutevalg og i etterspørselsmodellering.

Mens elbiler var lite utbredt og derfor lite relevant for transportmodelleringen for rundt 10 år siden, så har den raskt økende markedsandelen for elbiler i Norge økt behovet for å ivareta elbiler på en god måte i transportmodellene. En forenklet metode har vært å bruke informasjon om elbilandel til å beregne gjennomsnittlige transportkostnader som inngår i et felles valgalternativ, «bil», i transportmiddelvalget.

Tiltaket «elbil som egen mode» peker på en modellering der man eksplisitt tar hensyn elbiler i modellering av transportmiddelvalg. Dette kan enten skje via «parallele beregninger», for eksempel separate beregninger for ulike segmenter med og uten tilgang til elbil, eller med en felles modell der konkurranseforhold mellom elbil og fossilbil modelleres eksplisitt. Sistnevnte er prinsipielt foretrukket når det er personer/segmenter som har tilgang til både fossil- og elbiler. Figur 3.1 viser at andel husholdninger som har mer enn én bil er økende ifølge RVU-data, og at andelen lå på 42% (10%+32%) i 2020.



Data frem til og med 2013/14 er hentet fra: TØI, RVU 2013/14 – nøkkelrapport

Figur 3.1: Antall biler i husholdningen (kilde: <https://www.veqvesen.no/globalassets/faq/fokusomrader/nasjonalt-transportplan-ntp/reisevaner/2020/nokkeltallsrapport-2020-versjon-per-20.12.21.pdf>)

Som beskrevet i neste avsnitt er tilgang til elbiler et viktig element som man bør prøve å ta hensyn til i modellen. Dette kan skje eksogent eller endogent. Å modellere tilgang til elbil endogent er viktig når tiltaket/infrastrukturprosjektet man analyserer med transportmodellen har en større effekt på transportkostnadene, slik at man kan forvente en (langsiktig) effekt på kjøp av ulike biltyper. I mange tilfeller vil denne effekten være liten, og det vil framstå som hensiktsmessig å se bort fra den. Et typisk motor-

veiprosjekt vil ikke påvirke elbilandelen i befolkningen, og det å anta en eksogen elbilandel virker dermed uproblematisk. Hvis man derimot vil studere effekten av økt årsavgift for elbiler så vil det ha en klar effekt på bilkjøp/elbilandel, og da vil det å anta en eksogen elbilandel være en sterk forenkling. Slike tiltak bør derfor analyseres (også) med bilkjøpsmodeller som BIG (Fridstrøm & Østli, 2018). Transportmodellen kan da bruke nye elbilandeler som bilkjøpsmodellen predikerer etter endring i årsavgift. Elbilandelene blir videre brukt til predikering av transportmiddelvalg.

Elbil som egen mode kan også implementeres i trafikkavviklingen. Pga. ulike drivstoffkostnader, ulike bompengesatser og ulike fergetakster kan man forvente at rutevalget er påvirket av biltypen. I tillegg finnes det noen veier/filer som kun er tiltatt for elbiler (gjerne elbiler med minst én passasjer). Det kan derfor være ønskelig å skille mellom biltyper også i trafikkavviklingen.

I tillegg kan elbiler ha lavere parkeringsavgifter eller det kan være nullutslippssoner forbeholdt elbiler, slik at også destinasjonsvalget påvirkes. Dette er nærmere beskrevet i avsnitt 3.5.

Elbiler har både langsiktige effekter (bilhold) og kortsiktige effekter (rutevalg), og er dermed et viktig aspekt for både strategiske- og taktiske modeller.

I de siste årene har andelen elbiler økt betraktelig, og det selges færre bensin- og dieslbiler. Man kan derfor argumentere for at poenget med å inkludere elbil som egen mode i transportmodellene ikke lenger er like viktig. For langsiktige prognoser viser nasjonalbudsjettet 2023 at tilnærmet alle personbiler vil være elektriske i 2050, og trolig en god stund før det.

Et annet element ved elbiler er ladeinfrastruktur. For analyser i by er det ofte antatt at personbiler kan lades ved bosted/overnatting. Merk at dette ikke nødvendigvis gjelder varebiler eller tjenestebiler. Vi kommer litt inn på modellering av elbilladning ved omtale av dynamiske transportmodeller.

For kartlegging under, definerer vi «Elbil som egen mode» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Inkluderer informasjon om tilgang til elbil (eksogent eller endogen)
- 2) Modellerer valg av elbil i transportmiddelvalgmodell (endogen)
- 3) Fanger opp ulike transportkostnader for ulike drivstofftyper og inkluderer denne informasjonen i etterspørselsmodellen og i rutevalget

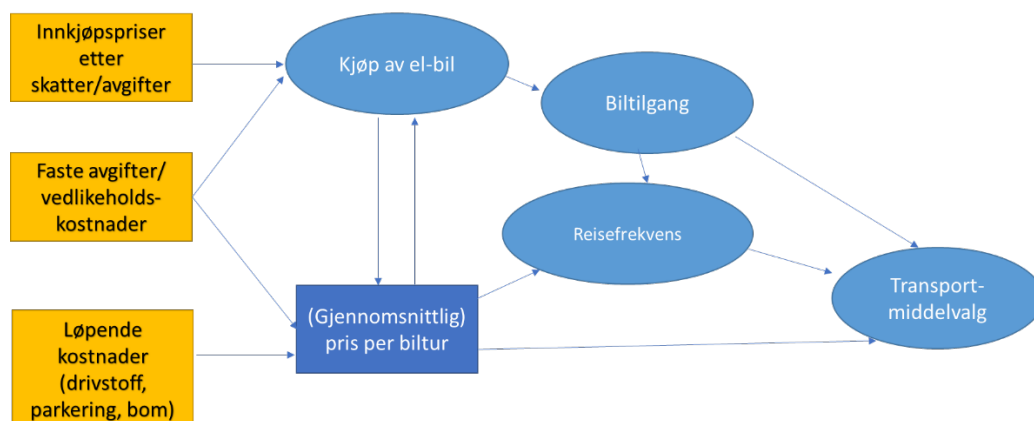
3.1.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

På etterspørselssiden er vi mest interessert i effekten av elbiler på reisefrekvens og transportmiddelvalg (effekter på destinasjonsvalg gitt parkering og nullutslipp er nærmere beskrevet i avsnitt 3.5.).

Reisefrekvens og transportmiddelvalg for bil øker dersom det blir lavere pris per biltur. Personer med tilgang til elbil vil derfor ofte ha flere bilturer. Lavere kostnader øker også salg av elbil. Dette øker biltilgang, som igjen påvirker reisefrekvens og transportmiddelvalg. Ved siden av lavere kostnader ved bruk av elbil, så vil kjøp av elbil også bli påvirket av innkjøpspriser etter skatter/avgifter og faste avgifter og vedlikeholdskostnader. Det er illustrert i figur 3.2.

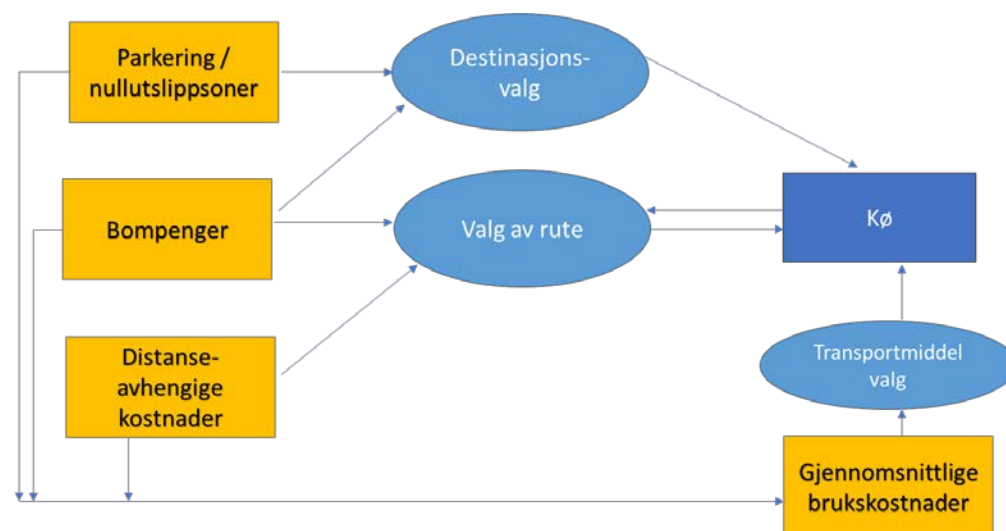
Merk at pilene fra «kjøp av elbil» og «gjennomsnittlig pris per biltur» går i begge retninger. En utfordring for modelleringen er at tidshorizonten er forskjellig. Tilgang/bruk av elbil har direkte/kortsiktige effekter på reisekostnader, mens en forventning om generelt lavere reisekostnader er en av grunnene for kjøp av elbil, som er en langsiktig beslutning. De to elementene håndteres derfor typisk i separate modeller, bilkjøpsmodeller og transportmodeller, og de itereres ikke til en likevekt. Som beskrevet i forrige avsnitt vil et typisk infrastrukturprosjekt ikke ha en stor effekt på reisekostnader, så det vil ikke kreve en endogen modellering av kjøp av elbil.

Merk at sannsynligheten for å kjøpe elbil kan være påvirket av reisefrekvens. En person som reiser mye vil – andre ting likt – ha høyere sannsynlighet for å kjøpe elbil enn en person som reiser sjelden.



Figur 3.2: Sentrale virkninger av elbil som egen mode på etterspørselssiden.

På trafikkavviklingsiden kan ulike bompenger for elbiler påvirke rutevalg og destinasjonsvalg. Rutevalg og destinasjonsvalg kan påvirke købelastningen på enkelte veier. Kø på bestemte veier kan også bli påvirket av tiltak som nullutslippssoner der bensin/dieselbiler ikke kan kjøre. Og selve kønivået kan være påvirket av økt bilbruk generelt (transportmiddelvalg og reisefrekvens) som følge av lavere (gjennomsnittlige) brukskostnader for biler. Sentrale virkninger på trafikkavviklingssiden er illustrert i figur 3.3.



Figur 3.3: Sentrale virkninger av elbil som egen mode på trafikkavviklingssiden.

3.1.3 Hvilke data trengs?

Forskjeller i transporttilbudet mellom elbil og fossilbil bør være representert i transportnettverket og forutsetninger for rutevalgsalgoritmen. Tradisjonelt vil det være forskjeller knyttet til bom- og fergetakster. Forskjeller kan i prinsippet også handle om at elbil skal ha anledning til å benytte kollektivfelt, eller at fossilbiler ikke skal ha anledning til å kjøre innenfor visse områder (nullutslippssoner). Videre handler det om at de ulike kjøretøytypene har ulike km-kostnader. Alle disse elementene vil føre til forskjeller i rutevalg. Dette vil også påvirke LoS-data og har en effekt på transportetterspørsel.

På etterspørselssiden trenger man videre informasjon om tilgang til bil. Uten integrering av en bilkjøpsmodell vil denne informasjonen være eksogent gitt. Detaljene om implementering i RTM er videre beskrevet i neste avsnitt.

3.1.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensingene?

Historisk sett har man ikke tatt hensyn til elbiler i RTM systemet. Senere fikk man versjoner av RTM der elbiler inngår og påvirker gjennomsnittlige reisekostnader. I de nyeste versjoner av RTM har man gått fra gjennomsnittskostnader til segmenter med ulike kostnader for hhv. el- og fossilbiler (Hamre & Rekdal, 2024).

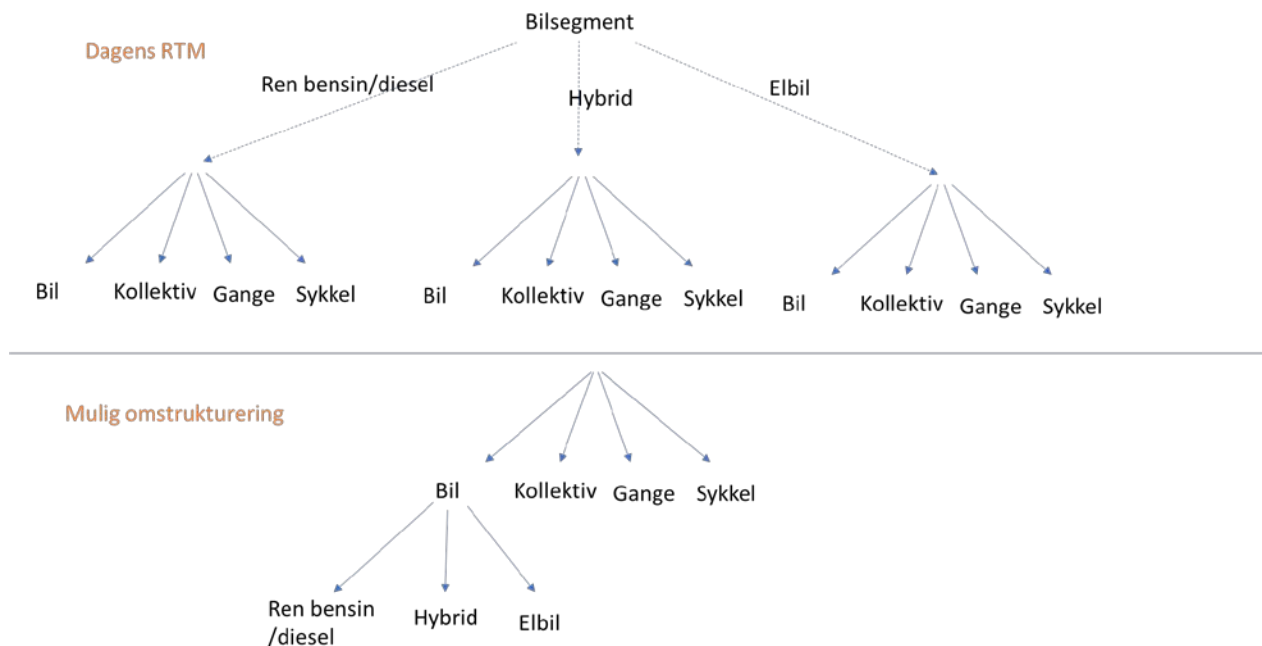
Hvis vi tar utgangspunkt i definisjonen av «elbil som egen mode» fra avsnitt 3.1, så oppfyller dagens RTM krav 1 og 3 men ikke 2. Dvs. RTM inkluderer (eksogen) informasjon om tilgang til elbil og det brukes ulike transportkostnader per biltype, men modellen predikerer ikke endogent valg av elbil i transportmiddelvalgmodellen. At bil er relativt mer foretrukket over kollektivtransport, gange og sykkel er derimot tatt hensyn til via parallelle beregninger (segment-for-segment). For en detaljert beskrivelse se Hamre and Rekdal (2024).

Dagens måte å modellere elbiler på i RTM har følgende begrensinger

- Modellen ser bort fra konkurranseflaten mellom biltyper for hushold med tilgang til flere biler
- Innkjøpspriser og avgifter håndteres ikke innad i modellen og det må brukes eksogene andeler fra bilkjøpsmodeller og framskrivingsmodeller for bilparken (f.eks. BIG)
- Lading av elbiler er ikke modellert

3.1.5 Hva er mulighetene for videreutvikling i RTM-systemet?

Som nevnt ovenfor ligger det en viss begrensing i dagens RTM ved at biltilgangen til en husholdning består av enten bensin/diesel-biler, hybridbiler eller elbiler, mens i virkeligheten vil noen husholdninger ha tilgang til flere forskjellige biltyper. For å kunne modellere konkurranseflaten mellom biltyper på en bedre måte kan en mulighet være å inkludere elbiler som et eget alternativ i transportmiddelvalget. Dette er illustrert i figur 3.4.



Figur 3.4: Dagens struktur og mulig omstrukturering (destinasjonsvalg ikke vist her).

En slik omstrukturering vil trolig øke presisjonen i beregning av logsummer for frekvensmodellen for personer med tilgang til flere biltyper. Men omstruktureringen vil sette høyere krav til modellering av tilgjengeligheten til biltyper. Dette krever trolig utvidelse av segmenteringsmodellen og en restrukturering av kildekoden.

Det er også uklart i hvilken grad personer i husholdninger med flere biltyper faktisk gjør et reelt valg mellom biltyper. For daglige reiser i byområder vil elbiler ofte være et dominant valg (bedre eller lik bensin/diesel biler i alle attributter). Grunnen til at noen personer allikevel velger bensin/dieserbiler kan ha en forklaring i koordinering med andre personer i husholdet, noe som er svært vanskelig å modellere også utenfor mulighetsrommet i RTM.

Generelt virker det vanskelig å foreslå modellutvikling for elbil som egen mode utover det som er foreslått og implementert i Hamre and Rekdal (2024).

En integrering av BIG innad i RTM-systemet ville ha prinsipielle fordeler med tanke på konsistens, men virker ikke realistisk, rent teknisk sett. For analyser av større tiltak som signifikant endrer konkurranseflaten mellom elbil og bensin/dieselbil og dermed innfasing av elbiler, kan det være aktuelt med nye kjøring i BIG og justering av (langsiktige) andeler i segmenteringsmodellen.

3.1.6 Hvilke andre metoder/modeller kan tenkes å brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Tiltaket «elbil som egen mode», virker å være tilfredsstillende modellert i den nyeste versjonen av RTM gjennom segmentering. Det er visse praktiske grenser for hvor mange segmenter man kan innføre uten at beregningstiden blir altfor høy. En prinsipiell fordel med mikroskopiske/agent-baserte modeller ligger i at man kan tilordne flere egenskaper til personer og kjøretøy uten at det går på bekostning av beregningstiden.

For et gitt prognoseår er «Elbil er egen mode» et forholdvis statisk tiltak og forbedringspotensialet i overgang til mer dynamiske modeller er begrenset. At tidsavhengige bomtakster vil påvirke valg av avreisetidspunkt, og at denne effekten kan være ulik avhengig av biltyper er et mindre aspekt som trolig ikke vil være avgjørende for mange typer analyser.

Ladeinfrastruktur er bedre modellert med dynamiske modeller. På den andre siden er problematikk rundt elbillading trolig mindre viktig for personbiler i bymodeller siden mange biler lades hjemme og ikke er berørt av evt. flaskehals ved offentlige ladestasjoner. For varebiler og tjenestebiler kan lading langs ruten eller i huber derimot være viktig å fange opp. I den forbindelse har dynamiske modeller visse fordeler, spesielt med tanke på modellering av tilgjengelighet, ventetid og avvikling ved ladestasjoner, samt etterspørsel etter strøm på et gitt tidspunkt som kan føre til flaskehals i tilførsel av effekt fra strømmettet. Generelt er strategiske modeller gode til å fange opp gjennomsnittsbetraktninger, mens dynamiske modeller er bedre til å fange opp tidsdifferensierte flaskehals.

3.1.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

I MATSim-modellen for Oslo utviklet i PRELONG-prosjektet er biltilgang og biltype en agentegenskap med følgende inndeling: «ingen biltilgang», «tilgang til elbil», «tilgang til bil, men ikke elbil». Dette tilsvarer inndelingen i datagrunnlaget Ruter-MIS. En populasjon av agenttyper er generert fra befolkningsdata, pendlerstatistikk og sonedata fra RTM. Dette er nærmere beskrevet i Flügel et al (2024).

En fordel med MATSim i forbindelse med elbiler er at etterspørsel etter, avvikling rundt og tilgjengelighet til ladestasjoner kan modelleres. En interessant implementering for Sverige er dokumentert i Bischoff et al. (2019).

3.2 Endring av avreisetidspunkt

3.2.1 Hva går tiltaket ut på?

I klassiske transportmodeller analyserer man «hvor ofte», «hvor» og «hvordan» folk reiser, men ikke «når».

Bytting av reisetidspunkt handler om at man modellerer «når» som en endogen del av modellen. I statiske modeller som opererer innenfor forhåndsbestemte tidsperioder, kan dette gjøres ved å forskyve trafikken mellom tidsperioder.

I dynamiske modeller kan endring av avreisetidspunkt implementeres som en egen adferdsdimensjon som personer i modellen (agenter) tar beslutninger om. For eksempel kan innføring av en høyere bomsats i rush-timene føre til at agenter i slike modeller reiser tidligere eller senere på jobb.

For å kunne predikere valg av reisetidspunkt, trenger man – uansett type transportmodell - informasjon om tidsavhengige transportkostnader og preferanser for reisetidspunkt (typisk ankomsttid). Sistnevnte kan komme i form av døgnfordelinger (i enkleste form: andeler i rush og utenfor rush). Videre trenger man adferdsparametre som bestemmer følsomheten for å endre avreisetidspunkt som følge av endrede transportkostnader eller endringer i rammebetingelser. Hvordan disse mekanismene henger sammen er nærmere beskrevet i neste avsnitt.

Tradisjonelle transportmodeller er deterministiske modeller som ignorerer variabilitet i reisetider og avgangstider. En implisitt antakelse er at de reisende vet akkurat hvor lang tid en reise tar, også når det forekommer forsinkelser i veinettverket. I deterministiske modeller er derfor valg av ankomsttid identisk med valg av avreisetidspunkt.

I kollektivtransport er reisetidspunkt knyttet til rutetabeller, og dermed står de reisende ikke fritt til å velge (forventet) ankomsttid. Valget er begrenset til valg av avgang. I en deterministisk verden vil personer kunne velge avreisetidspunkt (når de forlater huset) slik at ventetiden blir minimal. Siden dette ikke er realistisk brukes det i tradisjonelle modeller gjerne en antakelse om at ventetiden tilsvarer halve tiden mellom avganger (til en viss maks ventetid). I en gjennomsnittsbetraktning er dette det samme som at personer velger avreisetidspunkt til et tilfeldig klokkeslett (innenfor tidsperioden som analyseres). Dette er ikke veldig realistisk (muligens med unntak for høyfrekvente avganger) men det er vanskelig å unngå en slik antakelse med statiske og deterministiske modeller. Siden klokkeslettet til avreisetidspunktet ikke er gitt eksplisitt i statiske modeller er det heller ikke en problematisk antakelse, så lenge beregnet ventetid er en god tilnærming til kostnadene forbundet med frekvensen av rutegående transport.

For kartlegging under, definerer vi «Endring av avreisetidspunkt» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

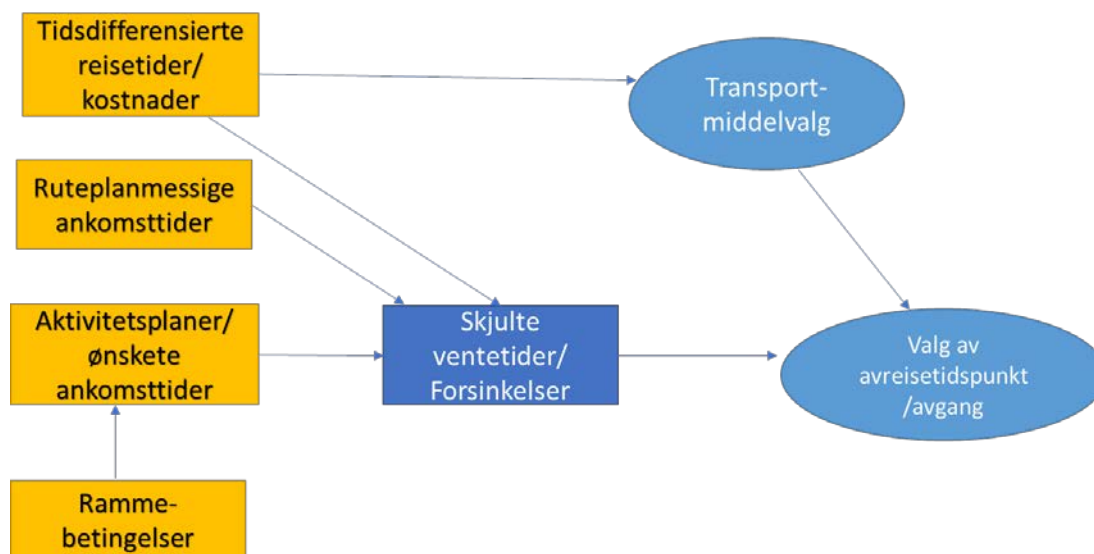
- 1) Reiser kan forflytte tidspunkt på tvers av tidsperioder (i det minste mellom periodene rush og ikke-rush)
- 2) Mekanismer for dette inkluderer a) informasjon om døgnfordelinger eller preferanser for ankomsttid b) tidsavhengige transportkostnader

3.2.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

Med utgangspunkt i at man reiser for å komme seg til ulike aktiviteter er valg av reisetidspunkt avhengig av når personer/agenter ønsker å gjennomføre aktiviteter. Med økonomiske marginalbetraktninger kan man tenke seg at det finnes en optimal ankomsttid, dvs. et klokkeslett som maksimerer nytten av å være på aktivitetene. Disse kan representeres i aktivitetsplaner, som kan være heldaglige. Aktivitetsplaner vil avhenge av rammebetingelser som for eksempel muligheten til å ha hjemmekontor. Differansen mellom *faktisk* (eller i stokastiske modeller: forventet) ankomsttid og *ønsket* ankomsttid kalles for *skjulte ventetider*. Disse kan være positive (man kommer for seint til aktivitet) eller negative

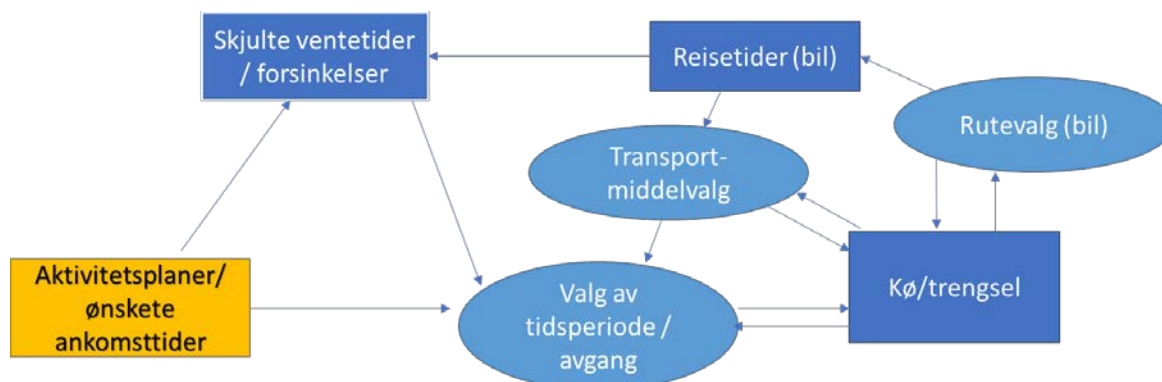
(kommer for tidlig). En typisk antakelse er at skjulte ventetider inngår sammen i nyttefunksjoner med øvrige tidsdifferensierte reisekostnader.

Disse hovedmekanismene er illustrert i figur 3.5.



Figur 3.5: Sentrale virkninger av å endre avreisetidspunkt på etterspørselssiden.

På trafikkavviklingssiden vil valg av reisetidspunkt påvirke kø og trengselsnivå. På den andre siden vil kø og trengsel øke transportkostnader (som kan variere betydelig over døgnet) som igjen kan føre til endringer i reisetidspunkt.



Figur 3.6: Sentrale virkninger av bytting av reisetid på trafikkavviklingssiden.

3.2.3 Hvilke data trengs?

Ønskede ankomsttider kan ha ulike representasjoner og de nødvendige dataene som trengs vil avhenge av type modell. Tabell 3.1 gir en oversikt.

Tabell 3.1: Representasjon og grunnlag for reisetidspunkt/ønskete ankomsttider i ulike modeller.

	RTM	RTM + tilleggsmodule (Flügel & Hamre, 2019)	Trenklin	MATSim	ABDM
Type modell	Statisk, makroskopisk og deterministisk	Statisk, makroskopisk og deterministisk	Dynamisk, makroskopisk og deterministisk	Dynamisk, mikroskopisk og stokastisk	Dynamisk, mikroskopisk og stokastisk
Opphav av reiser	Sone-attraktivitet	Sone-attraktivitet	Faste OD matriser i referansesituasjon	Aktivitetsorientert	Aktivitets-basert
Økonomisk representasjon av adferd	Minimerer GK	Minimerer GK	Minimerer GK inkl. skjulte ventetider ved ankomst	Maksimerer nytten av å utføre aktiviteter på ønskede tidspunkter	Ulike muligheter
Representasjon av ønskede ankomsttider	Implisitt gjennom faste andeler – tolkning som avreisetidspunkt	Døgn-fordelinger (timenivå)	Døgn-fordelinger (minuttnivå)	Klokkeslett for aktiviteter i reiseplaner	Klokkeslett for aktiviteter i reiseplaner
Empirisk grunnlag	RVU-andeler for rapportert avreisetidspunkt	Avledet fra fordelinger i Trenklin (anvendt på grunnkrets nivå)	Døgnfordelings-modell på togstasjonsrelasjoner estimert på 2018-RVU	Reisedagbøker fra RVU (Trondheim-modell) eller RuterMIS (Oslo-modell)	Ikke etablert for Norge ennå, GPS-tracking data kan være en mulighet ved siden av reisedagbøker

Merk at det ikke er åpenbart hvordan man empirisk skal måle ønsket ankomsttid. Det er fordi den faktiske ankomsttiden som blir observert i virkeligheten (eller rapportert i reisevanedata) alltid er betinget av tilbudet og de reisendes tilpasning til det. Det mest opplagte er rutetabeller for kollektivtransport, der reisende ikke kan velge faktisk ankomsttid. Også for bilreiser kan valgene man observerer være påvirket av tilbudet (kapasitetsavhengige reisetider), slik at faktisk ankomsttid ikke vil være lik ønsket ankomsttid når man observerer virkeligheten, dvs. med «revealed preference data».

Ved siden av ønskede ankomsttider trenger man også parametere som definerer følsomheten for å endre avreisetidspunkt. Disse kan være vanskelig å tallfeste empirisk, men verdsettingsstudiene i Norge fra 2009 og 2018 har estimert verdien av å komme for sent (i 2009 også for å komme for tidlig) basert på stated preference undersøkelser.

Følsomheten av å endre reisetidspunkt vil variere med type aktivitet man gjennomfører. Dette kan fanges opp med ulike variabler, som åpningstider til aktiviteter. Det å komme for seint til en aktivitet kan da beregnes med utgangspunkt i slike åpningstider. Se avsnitt 4.2.3 for en illustrasjon.

3.2.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensningene?

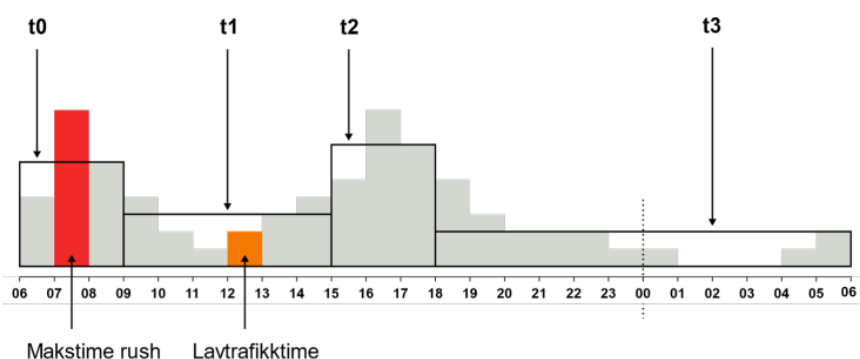
Endret avreisetidspunkt er ikke et naturlig element av RTM systemet. Som andre statiske transportmodeller opererer man innenfor en forhåndsbestemt tidsperiode. For å fange opp at transport/trafikk varierer utover dagen, deler man modellen opp i ulike tidsperioder, for eksempel rush og lavtrafikk. Dette skjer med gitte andeler, for eksempel avledet fra reisevanedata.

Følgende beskrivelse og figur 3.7 er basert på Flügel and Hamre (2019):

RTM-modellen kjøres enten med 1, 2 eller 4 tidsperioder. Når man kjører modellen med flere tidsperioder kan man ta hensyn til at transporttilbudet varierer i de ulike tidsperiodene (for eksempel at reisetiden med bil er høyere i rushperioden pga. kø). En begrensning i RTM ligger i at fordelingen av reiser (totalt antall reiser før oppsplitting på transportmidler) på tvers av tidsperioder, og mellom timer innad i tidsperiodene, styres av faste fordelinger, uavhengig av transportkostnader og transporttilbudet (LoS-

data). I figuren nedenfor (Figur 3.7) indikerer sorte rammer de fire tidsperiodene som det kan skiller mellom i RTM/Tramod_By i dag; det vil si morgenrush (t0), midt på dagen (t1), ettermiddagsrush (t2), og kveld/natt/pre-morgenrush (t3). Faste andeler legges til grunn for hvordan trafikkvolumet fordeles mellom rushtidene og periodene utenom rush (dette er input til Tramod_By).

Makstimen innenfor morgenrush eller ettermiddagsrush skiller ut ved hjelp av faste andeler (vist ved rød søyle for morgenrush i Figur 3.7). Det samme gjøres for en time midt på dagen (oransje søyle). Ved beregning av LoS-data for bil i to ulike trafikksituasjoner (lavtrafikk og makstime rush) legges det til grunn etterspørselsmatrisene for disse to timene. Dette fører til to separate LoS-matriser. I tilfeller der etterspørselsmodellen beregnes på døgnnivå veies LoS-variablene med faktorer som er spesifisert for hver reisehensikt.



Figur 3.7: Inndeling i RTM når den kjøres med 4 tidsperioder og to sett av LoS-data.

En fundamental begrensning ved TraMod_By er at modellen ikke har eksplisitt representasjon av døgntid (klokkeslett) og ingen interaksjon mellom de forhåndsbestemte tidsperiodene. Å fange opp endring av reisetidspunkt innad i TraMod_By er derfor ikke mulig, i alle fall ikke i sin nåværende form og med nåværende kildekode.

3.2.5 Hvilke muligheter finnes for videreutvikling av RTM-systemet?

På kort sikt og med dagens oppbygging av TraMod_By må valg av reisetidspunkt modelleres med separate modeller.

Flügel og Hamre (2019) presenterer en modell for forskyvning av reisetidspunkt med følgende funksjonalitet:

- Døgntrafikk (evt. oppdelt i 2 / 4 perioder) fra TraMod_By kan fordeles på enkelttimer (N=24) basert på døgfordelinger.
 - Døgfordelingen varierer med sonedata og fanger opp relative pendlerstrømmer (referansescenario)
- Videre forskyvning av reiser til/fra nabotimer ved endringer i generaliserte kostnader på enkeltimesnivå (tiltaksscenario)
 - Følsomheten av endringer kan styres ved ulike variabler og kan avhenge av sonedata og reisehensikt

På litt lengre sikt kan det ligge flere utviklingsmuligheter i RTM systemet.

Frekvensmodellen i TraMod_By er hardkodet som en døgmodell og det er ikke mulig å generere reiser for mindre perioder/enkelttimer (det brukes faste andeler for å dele inn i rush og ikke rush når modellen kjøres med flere perioder).

Estimeringsgrunnlaget for TraMod_By er RVU-data som inneholder informasjon om avreisetidspunkt på timesnivå⁶. I prinsipp er det dermed mulig å estimere modeller som predikerer reisegenerering (reise-frekvens) på timesnivå. I en slik estimeringsmodell kunne man ta hensyn til tidsdifferensierte LoS-data via time-spesifikke log-sum parametere. Med dette vil man ved predikering også fange opp effekter av endrede bomtakster osv.

Å implementere en slik estimeringsmodell i dagens kildekode av TraMod_By er midlertidig ikke mulig. En slik modell er derfor ikke aktuell før man starter en eventuell ny oppbygging av TraMod_By.

Med en slik oppbygging av frekvensmodellen vil TraMod_By bli en kvasi-dynamisk modell (se definisjon i tabell 1.1), men modellen vil fortsatt være makroskopisk (basert på et sonesystem). At modellen fortsatt vil være (rundt)tur-basert (ikke på heldaglige reiselister) er også en begrensning for mer dynamiske tilnærminger (se diskusjon om hjemmekontor i avsnitt 3.4). Videre kan rundturer være vanskelig å representere for enkelttimer siden det krever en antakelse om når tilbaketuren skjer. Det er heller ikke sikkert at en frekvensmodell på timenivå vil være hensiktsmessig hvis man ser forventet ressursinnsats og økt beregningstid opp mot forventet utbytte.

3.2.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Som diskutert over er valg av avreisetidspunkt prinsipielt best modellert med et modellrammeverk som har en eksplisitt representasjon av tid på døgnet.

Som beskrevet i tabell 3.1 i avsnitt 3.2.3, er Trenklin og MATSim to (ulike) modelltyper som har eksplisitt representasjon av tid.

Trenklin opererer på minuttnivå og valg av avreisetidspunkt beregnes som valg av (tog)avgang. Beslutningstaker i modellen kommer fra OD-matriser (og representerer derfor aggregerte strømmer) som fordeler seg over ønskede ankomsttider basert på døgnfordelinger (gitt OD-relasjon og reisehensikt). Det som styrer valg av togavgang er reisetiden. Skjult reisetid øker ikke reisetiden, men er en kostnad i form av planleggingskostnader (at man ikke kan reise til ønsket tidspunkt). For eksempel vil reduksjon i kapasitet på en gitt avgang (f.eks. når antall togsett reduseres) føre til økt trengsel og en økt sannsynlighet for at noen togpassasjerer enten tar tidligere eller senere avganger.

MATSim opererer på sekundnivå. Beslutningstaker er agenter som kan justere avreisetidspunktet sitt slik at de forbedrer nytten av heldaglige aktivitetsplaner. Nyttens (også kalt «score» i MATSim) er en sammensatt funksjon av – blant annet – tid i transport og tid i aktiviteter. Nyttens blir redusert hvis man kommer for sent (eller tidlig) til aktiviteter eller hvis man ikke klarer å gjennomføre den ønskede varigheten til aktivitetene. Vi illustrerer noen av disse mekanismene i avsnitt 4.1.

Tilnærmingen i MATSim faller under et paradigme av aktivitetsbasert modellering som avleder transport og timingen («scheduling») av transport basert på et aktivitetsmønster («activity patterns»). Aktiviteten er beskrevet med og begrenset av tids- og stedskoordinater. Argumenter for å ta med tidsdimensjonen eksplisitt i transportanalyser (ofte illustrert i «tids-rom-prims») går tilbake til 1970 med svenske Torsten Hägerstrand (Hägerstrand, 1970).

Valg av avreisetidspunkt er derfor en naturlig del av aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller. Det kan skje som en selvstendig valgdimensjon i sekvensielle modeller (en rekke av valgmodeller som er forbundet med logsummer) eller som en integrert del av mer sammenhengende modelltilnærminger, eksempelvis «Household Activity Pattern Problem (HAPP)». HAPP går tilbake til Recker (1995) og formulerer en integrert optimalisering av aktivitetsmønster, inkl. valg av reisetidspunkt.

⁶ Hvis kommende TraMod_By-estimering er basert på Stordata-RVU vil man også ha informasjon på en mye finere tidsoppløsning.

Ifølge (Västberg et al., 2020) er HAPP veldig beregningsintensive modeller. I det pågående PRELONG prosjektet (<https://www.toi.no/project-prelong/>) prøver man å løse denne utfordringen med maskinlæring. Modelleringen i PRELONG er begrenset til individuelle/uavhengige valg for reiseplaner og er ikke en modellering sammensatt av valg fra flere husholdsmedlemmer. Det er imidlertid økt litteratur om simultan modellering av aktivitetsplaner for flere personer i samme husholdning (for eksempel Fu and Lam (2018)).

Følgende fordeler med aktivitetsbaserte modeller kan nevnes med hensyn til modellering av avreisetidspunkt

- Ingen aggregering av (tids)informasjon som ligger i det empiriske datagrunnlaget i form av rapporterte reisedagbøker⁷.
- En mer direkte og naturlig måte å innføre tidsrestriksjoner på (at man må forholde seg til pålagte varigheter og åpningstider til ulike typer aktiviteter).
- En mer intuitiv forklaring av hvordan ønskede ankomsttider forstås og avledes.
- En modellering/simulering av en hel dag unngår aggregeringsfeil man kan ha hvis man etablerer «gjennomsnittlige timer» for døgn eller delperioder.
- Informasjon om tidsmessig avhengighet mellom reiser og aktiviteter. For eksempel det at man kan fange opp forsinkelse i ankomsttiden til første aktivitet som igjen kan føre til forsinkelser senere i reisekjeden.
- En mer direkte og presis representasjon av forsinkelser og skjulte ventetider.
- En mer presis kobling mot simuleringsmodeller på avviklingstiden. Mer finkornete adferdsendringer for tidsdifferensiert købelastning og bompenger. F.eks. adferden minutter før og etter bomtaksten øker i et system med tidsdifferensierte bompenger.
- Fleksibel aggregering av resultater i tidsdimensjonen

Aktivitetsbaserte modeller er typisk agent-baserte, som gjør det lettere å innføre heterogenitet (både systematisk og stokastisk). Agent-baserte modeller gjør det også lettere å utvide kompleksiteten i valgene. Et eksempel som ble nevnt i forrige avsnitt er felles beslutninger med andre agenter i samme hushold. Koordinasjon av aktiviteter og tidspunkter er sentralt her.

Modellering av avreisetidspunkt er også viktig i forhold til modellering av robotaxier der timingen av ledige robotaxier med etterspørsel er et viktig element i modelleringen (ser mer i avsnitt 3.6 og 4.4).

3.2.7 Hvordan kan andre modeller anvendes/videreutvikles til å fange opp tiltakene på en god måte?

Vi viser til kapittel 2 som beskriver en implementering i endring av avreisetidspunkt i MATSim. Merk at i aktivitetsbaserte modeller defineres avreisetidspunkt basert på sluttidspunkt for aktiviteter. En modell som kan predikere slutt av aktiviteter vil dermed også predikere avreisetidspunkter.

Det kan argumenteres for at tilpasning av avreisetidspunkt er noe forenklet modellert i MATSim, siden MATSim modellerer tilpasning av avreisetidspunkt gitt et fast aktivitetsmønster (antall, type og rekkefølge av aktiviteter er forhåndsbestemt for hver agent). I forbindelse med en satsing på en state-of-the-art transportmodell (tidligere presentert som M4 i avsnitt 2.4) vil det være naturlig å prøve å modellere avreisetidspunkt som del av en aktivitetsbasert etterspørselsmodell, der gjensidig avhengighet mellom generering av aktiviteter og ønskete start- og sluttidspunkter for aktiviteter kan fanges opp.

Hvis man på sikt lager en aktivitetsbasert etterspørselsmodell (ABDM) for Norge eller regioner i Norge fra bunnen av kan man velge ulike tilnærminger. Som beskrevet i (Flügel et al., 2021) finnes det ulike

⁷ Reisedagbøker kommer per i dag fra RVU eller Ruter-MIS, men kan også generes fra GPS-tracking data.

typer ABDM og valget av den mest hensiktsmessige modelltypen bør sees i sammenheng med empirisk datagrunnlag, praktisk behov, kobling mot andre modeller osv.

Bedre tilgang til stordata, metoder som maskinlæring og økt regnekraft kan være viktige elementer i modellutviklingen.

3.3 Fleksible bompenger/veipricing

3.3.1 Hva går tiltaket ut på?

I dette avsnittet omtaler vi bompenger og veipricing. Bompenger betales ved bruk av bestemte veisnitt og betales per kryssing, mens veipricing betales ved bruk av hele veinettet og betales typisk per kjørt kilometer (evt. per tidsenhet). Flere bomstasjoner kan være plassert slik at de utgjør en bomring, i så fall virker bomringen som en kostnad for å komme seg til og fra et område, typisk et bysenter. Byer kan også ha veipricing, der det kun betales for kjørte kilometer innenfor byen/bysenter.

«Fleksibel» kan i vår sammenheng bety flere ting, deriblant

1. Separate priser (per kryssing eller kilometer) per biltype
2. Tidsdifferensierte priser (etter en fast tidsplan)
3. Ulike rabattordninger, deriblant dynamiske rabatter som «timesregel»
4. Dynamiske priser avhengig av antall biler på veisnitt/veinett (køpricing)
5. Dynamiske priser avhengig av forventet utslippsnivå (avhenger av for eksempel drivstofftype, vær og utslippsnivå)

Fleksible bompenger etter tiltak 1-3 finnes flere steder i Norge. 4) og/eller 5) er et forsøk å internalisere noen av de eksterne effektene av å kjøre bil på en mer direkte måte.

Merk at en generell vegpricing som avhenger av CO₂-utslippene til bilen, vil ha lignende effekt på transportkostnadene som drivstoffavgifter.

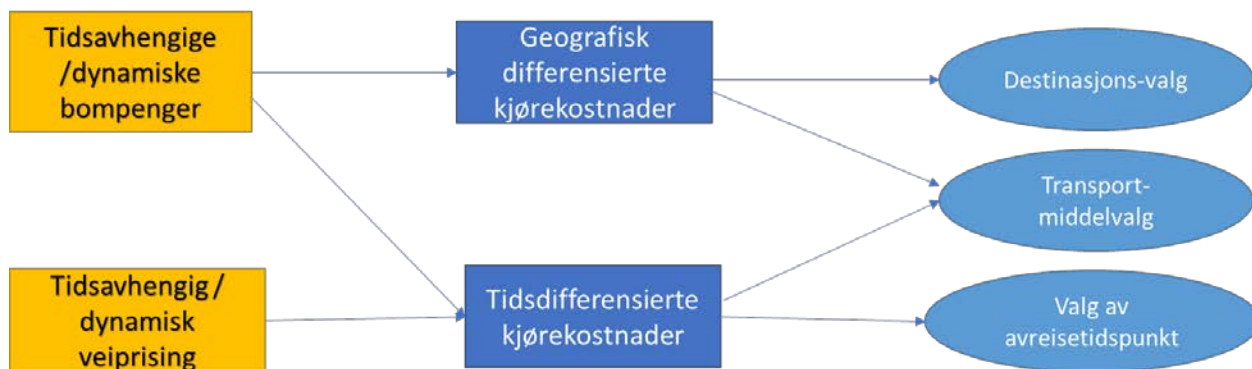
For kartlegging under, definerer vi «Fleksible bompenger/veipricing» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Tidsdifferensierte bompenger eller veipricing, i det minste for rush/ikke rush, ideelt per time
- 2) Trafikantenes adferdstilpasning til dette (både i etterspørsel og trafikkavvikling), ideelt inklusive endret avreisetidspunkt.
- 3) Modellering av timesregler og andre rabatter
- 4) Mulighet for dynamisk pricing

3.3.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

Fleksible bompenger/veipricing kan føre til flere adferdsmessige endringer blant bilistene. Hvis man legger vekt på tidsdifferensiering, er samspill mellom rutevalg/avreisetidspunkt og kø sentralt.

Hovedeffekten av bompenger og veipricing vil typisk være transportmiddelvalg, rutevalg og destinasjonsvalg. Ved tidsdifferensiering kan det også forventes endringer i avreisetidspunkt (som i noen modeller håndteres i etterspørselsmodelleringen). Noen sentrale virkninger på etterspørselsiden er illustrert i figur 3.8.



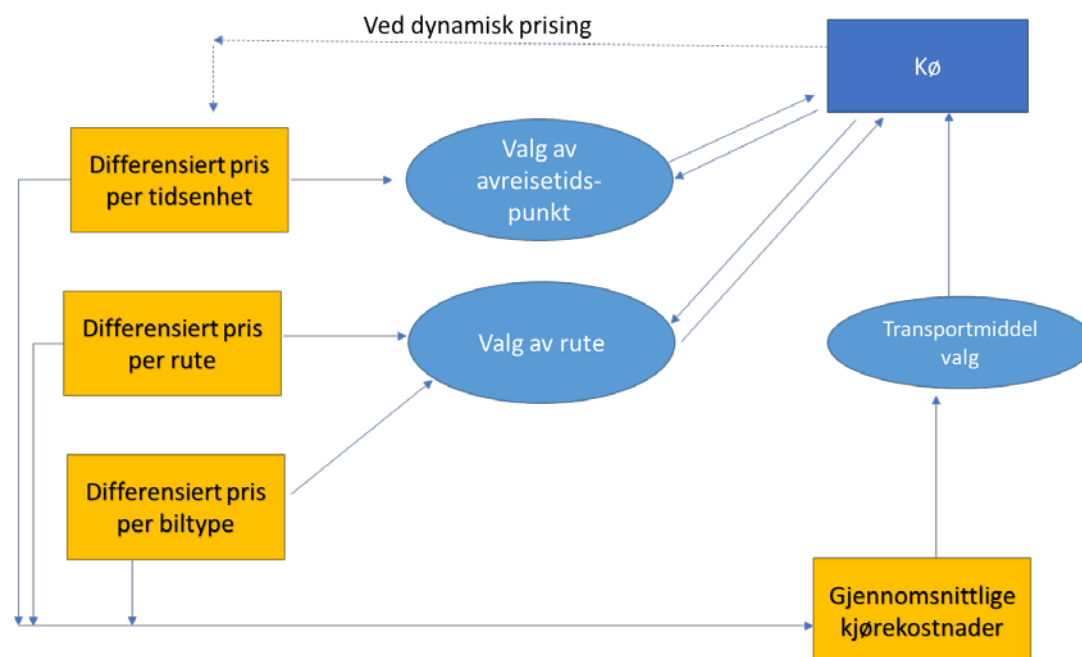
Figur 3.8: Sentrale virkninger av fleksible bompenger/veipricing på etterspørselssiden.

Bompenger på enkelte veier kan ha direkte effekter på rutevalget siden det gir incentiver til å kjøre en annen vei, mens generell veipricing med gitt kilometerpris per bil vil ha ingen/liten effekt på rutevalget.

Tidsdifferensierte priser kan føre til endringer i avreisetidspunkt, noe som kan påvirke køer i vegnettet. Mer kø vil føre til endring i reisekostnader i form av lengre reisetider. Dette vil ha effekter tilbake til valg av avreisetidspunkt og rutevalget.

I figur 3.9 er gjensidig påvirkende effekter vist ved at pilene mellom to elementer går i begge retninger. Slike effekter må typisk predikeres iterativt til det oppnås en (tilnærmet) likevekt.

Ved dynamisk prising der bompengetaksten avhenger av faktisk kø-situasjon oppstår det også gjensidig påvirkende effekter. Dette setter høye krav til transportmodellen siden bompengene blir en endogen variabel som avhenger av nokså detaljerte og komplekse effekter på trafikkavviklingssiden.



Figur 3.9: Sentrale virkninger av fleksible bompenger/veipricing på trafikkavviklingssiden.

3.3.3 Hvilke data trengs?

I RTM-systemet er bompengestasjoner og satser kodet inn i veinettverket. Gitt (gjennomsnittlige) rutevalg mellom to grunnkretser som predikeres i nettverksmodellen (Cube Voyager), skrives ut

gjennomsnittlige bompenger mellom to relasjoner (grunnkretser). I nåværende versjon av RTM kommer bompengerekostnader segmentert etter følgende kategorier⁸:

- Bilfører og bilpassasjer
- Rush og ikke rush («lavpris»)
- Elbiler og alle øvrige biler

3.3.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensingene?

Som antydnet i forrige avsnitt kan RTM systemet gjennom separate LoS-variabler/filer håndtere fleksible bompenger differensiert etter biltype (se også avsnitt 3.1) og tidsperiode, dvs. rush/ikke rush.

I ulike anvendelser av RTM/RTM23+ har man også klart å ta vare på timesregelen (Norconsult (2020) Steinsland et al. (2022)). Siden RTM ikke har en representasjon av klokkeslett er timesregel nødvendigvis implementert på en forenklet måte, der man betaler for den dyreste bompaseringen på hver OD-relasjon uavhengig av pågått tid. Det er imidlertid mulig å sette opp modellen til å håndtere nokså komplekse systemer, f.eks. at man i Oslo har ulike ringer med separate timesregler (der Indre ring og Osloringen behandles som ett system med timesregel, mens Bygrenseringen har sin egen timesregel).

Når det gjelder generell veiprisering så kan dette ivaretas gjennom en oppskalering av de distanseavhengige kjørekostnadene som inngår i nyttefunksjonene for reisemiddelvalg og destinasjonsvalg i TraMod_by. Det er også fullt mulig å ivareta geografisk avgrenset veiprisering, og dette er gjort i forbindelse med et stort antall analyser knyttet til nullvekstmålet i de ulike byområdene.

3.3.5 Hvilke muligheter finnes for videreutvikling av RTM-systemet?

Videreutviklingsmulighetene i RTM i forbindelse med fleksible bompenger ligger i hovedsak i å utvide tilpasningsmulighetene for forskyvning i avreisetidspunkt. Dette er beskrevet i avsnitt 3.2.

En form av dynamisk («demand-responsive») kjøprising, også kalt for «first-best-pricing», har blitt analysert i Steinsland et al. (2022). I Dynamiske kjøprising kan i TraMod_by modellere på tilsvarende måte som kapasitetsavhengige reisetider, men vil kreve iterering med avviklingsmodellen. I RTM vil det være begrenset til de forhåndsbestemte tidsperiodene. Sistnevnte gjør dynamisk kjøprising til et ikke ideelt tiltak å modellere i RTM.

3.3.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Siden bomtakster påvirker rutevalget og trafikkavviklingen er (tidsdifferensierte) bompenger et naturlig element av trafikksimuleringsmodeller.

Tidsdifferensierte bompenger var også caset som ble valgt som illustrasjon i Norges først kjente MATSim-implementering (Flügel et al., 2016).

⁸ <https://www.numerika.no/tramod/tramod-by/trb-losdata/los-data-som-tekst/>

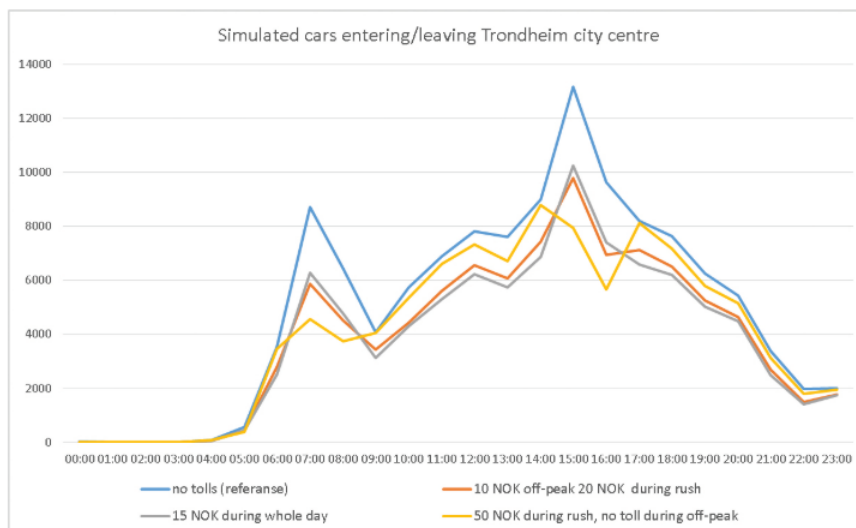


Figure 94.2: Cars entering/leaving Trondheim city center in reference scenario and three congestion pricing scenarios (source Bockemühl, 2014).

Figur 3.10: Simulerte effekter av tidsdifferensierte bomtakster i Trondheim basert på et MATSim-scenario fra 2014.

I modeller med en eksplisitt tidsdimensjon kan bompenger spesifiseres på et mer detaljert nivå. MATSim har en tidsoppløsning på sekundnivå, og har stor fleksibilitet i spesifisering av bomstruktur og er ikke bundet til gitte tidsperioder.

Dynamiske avviklingsmodeller vil kunne simulere mer detaljerte tilpasninger til fleksible bomtakster. Dette inkluderer tidsdifferensiert rutevalg og avreisetidspunkt.

En annen prinsipiell fordel med MATSim og andre agent-baserte modeller er at man kan se mer detaljert på «vinnerne» og «taperne» av et bompengetiltak. Dette er illustrert i figur 3.10 som viser endring i relativ nytte («score») og reisetid for hver agent i et MATSim-scenario (Meyer de Freitas et al., 2017). Endring i reisetid og score er negativt korrelerte (siden reisetid inngår negativt i nytteverdiene), men det er et tydelig skille mellom agenter som må betale bompenger og agenter som slipper å betale bompenger.

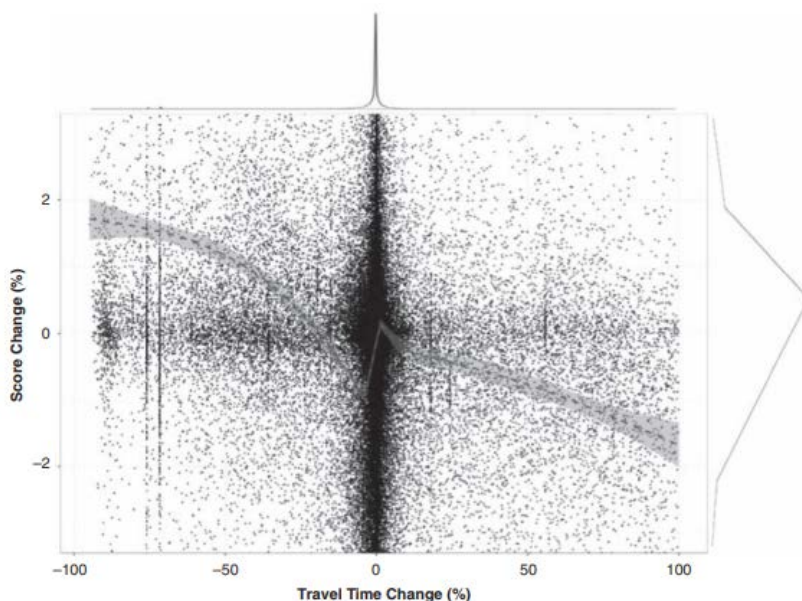


FIGURE 2 Travel time and score changes with densities of each variable.

Figur 3.11: Eksempel av en illustrering av en mikroskopisk vinner-taper analyse (kilde Meyer de Freitas et al. (2017)).

En annen mulighet i agent-baserte simuleringsmodeller som MATSim er å studere «first-best-pricing». Dette er mulig siden man kan beregne køkostnader (forsinkelse) en agent påfører agenten(e) bak seg. Dette er altså en beregning på agent-nivå, og hver agent kan prises for hans/hennes forårsakede køkostnader. Vi viser til Kaddoura (2015) for mer info.

3.3.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Bompenger er ikke en standard del av MATSim modellen, men kan iverksettes med et ofte brukt tillegg (contrib: «roadpricing»⁹). Som i RTM spesifiseres bompenger i MATSim på retningsspesifikk lenke-nivå () i en egen datafil som rutinemessig leses inn konfigurasjonsfilen i MATSim. For tidsdifferensierte bompenger kan man spesifisere intervaller (på sekundnivå hvis det ønskelig) som vist i avsnitt 4.3.

3.4 Parameterjustering etter korona

3.4.1 Hva går tiltaket ut på?

«Parameterjustering etter korona» er ikke et tiltak, men et modelleringsaspekt eller en «rammebetingelse» som kan være viktig å ta hensyn til i transportmodellering. Ideen med slike justeringer er å ta hensyn til mulige preferanseendringer etter koronaperioden.

Innenfor transportmodeller er ordet «preferanser» ofte bruk i forbindelse med parameterverdier i nyttefunksjoner. «Preferanser for tidsbesparelser» er f.eks. knyttet til parameterverdier for reisetid. En typisk negativ verdi sier at en person foretrekker kortere reisetider.

Innenfor samme analyser antar vi typisk at preferanser (altså parameterverdier i nyttefunksjoner) er konstante og ikke endres av tiltaket. Det er et grunnleggende prinsipp i nytte-kostnadsanalyser, der man beregner nytten av en tilbudsendring gitt konstante preferanser. Når man derimot endrer analyseåret (f.eks. nytte i år 2050) vil man typisk endre noen av forutsetningene i parameterne. Dette gjelder spesielt at tidsverdien antas å øke over tid pga. antatt inntektsvekst. Med dette fanger man opp at preferansen for én krone faller med økende inntekt. Hvis man derimot hadde beskrevet preferanser for en gitt brøkdeler av inntekten ville man likevel fastslå at preferanser er konstante over tid.

Dette er forenlig med en antakelse om at grunnleggende preferanser for tilgang til varer, type aktiviteter, sosial interaksjon og livstil ansees som relativt konstante. Preferanser kan likevel endres over tid gitt endringer i livssituasjon (f.eks. når man får barn), sosiale trender (som miljøbevissthet) eller teknologiske endringer. Teknologiske forbedringer som smartphone har trolig påvirket preferansene for tidsbesparelser i kollektivtransport.

Preferanser kan også endres ut fra erfaring og eksponering. En hypotese er at eksponering for korona har endret preferanser for kollektivreisende gjennom bevisstgjøring av faren for smitteoverføring. Det er visse empiriske indiser for det. For eksempel viser Flügel and Hulleberg (2023) at flere kan føle ubehag ved å stå trangt mot andre personer etter korona enn før korona.

En annen mulig preferanseendring etter korona gjelder hjemmekontor. Økt bruk av hjemmekontor post-korona (versus pre-korona) er trolig ikke en grunnleggende preferanseendring, men forklares bedre med aksept for hjemmekontor. Aksept kan også henge sammen med teknologisk utvikling som muliggjør eksempelvis digitale møter.

⁹ [matsim-lib/contribs/roadpricing at master · matsim-org/matsim-lib · GitHub](https://github.com/matsim-org/matsim-lib-contribs/tree/master/roadpricing)

Videre i dette avsnittet diskuterer vi to typer preferanseendringer etter korona.

1. mer fleksible hverdager gjennom økt bruk av hjemmekontor
2. Varige preferanser knyttet til kollektivtransport og trengsel

Modelleringsgrepene vil gå ut på kalibrering av modellen og justering eller reestimering av adferdsparameterne.

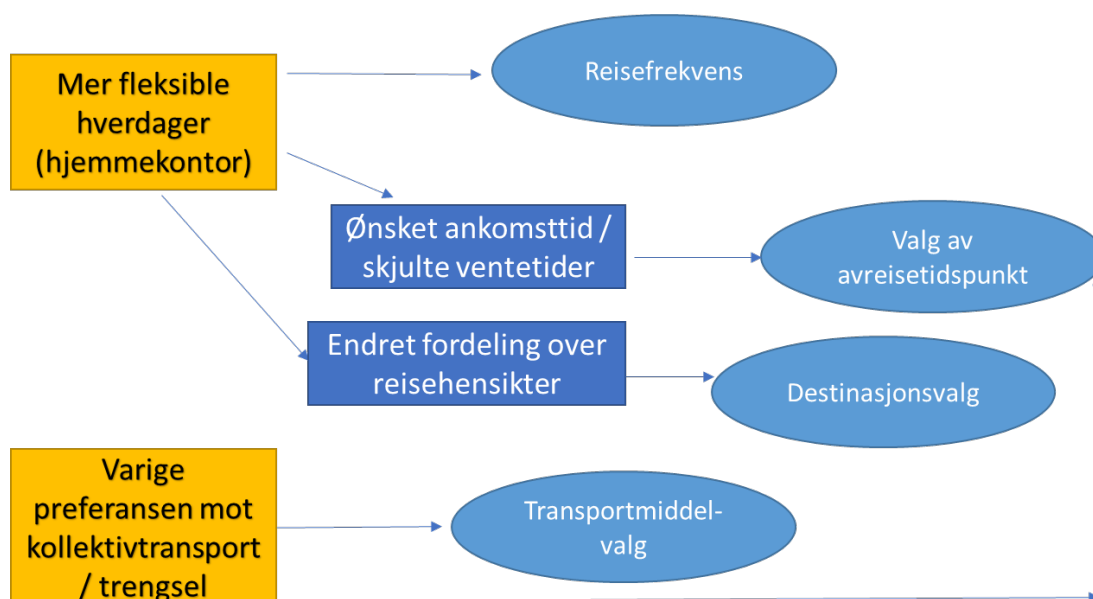
For kartlegging under, definerer vi «Parameterjustering etter korona» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Fleksibel endring av rammebetingelser (reisehensiktsfordeling, døgnfordeling), f.eks. gjennom kalibrering av modeller for turgenerering av destinasjonsvalg
- 2) Mulighet for å endre adferdsparametre (i det minste tidsverdier, ideelt også trengselskostnader)

3.4.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

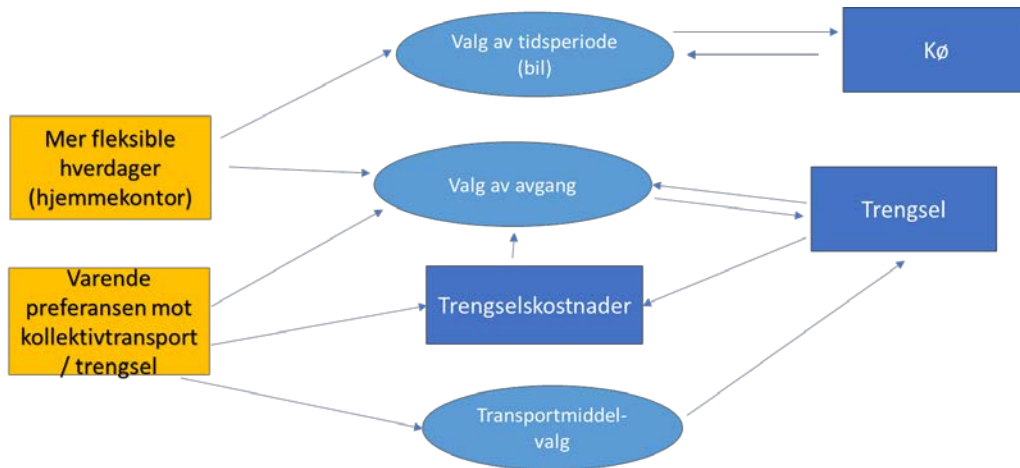
På etterspørselssiden vil økt bruk av hjemmekontor ha påvirkning på reisefrekvens (færre arbeidsreiser). Via endrete aktivitetsplaner (dvs. endret fordeling av reisehensikter og ønskede ankomsttider) vil også valg av avreisetidspunkt (færre reiser i rushtidsperioder) og destinasjon endres. Destinasjonsvalg forventes å gi færre reiser til grunnkretser med mange arbeidsplasser, spesielt arbeidsplasser innenfor kategorien «kontorjobber».

De mulige varige preferanser mot trengsel i kollektivtransporten vil ha en direkte effekt på transportmiddelvalg og muligens endringer av avreisetidspunkt (unngår høy trengsel i rushtidsperioder).



Figur 3.12: Sentrale virkninger av parameterjustering etter korona på etterspørselssiden.

Parameterjustering etter korona er i hovedsak et modelleringsgrep på etterspørselssiden. Via effekter på valg av tidsperiode/avgang og transportmiddelvalg kan det også forventes effekter for kø og trengsel. Merk at gjensidig avhengighet mellom valg og kostnader (reisetid/kø og trengselskostnader) har en (rebound) effekt på etterspørselen (mindre trengsel på en avgang gir mer behagelig reisetid, økt antall reisende og dermed noe økt trengsel) og det er ikke sikkert at kø og trengsel er mye endret i en ny likevekt.



Figur 3.13: Sentrale virkninger av parameterjustering etter korona på trafikkavviklingssiden.

3.4.3 Hvilke data trengs?

For å kunne justere parameterne etter korona er man avhengig av reisevanedata i post-korona perioden.

Merk at hjemmekontor ikke dukker opp som en egen aktivitet i reisedagbøker (siden den ikke er koblet mot en utreise og typisk vil inngå i aktiviteten «hjem»). Det er derfor anbefalt å ha med et spørsmål om hjemmekontor i spørreskjemaet i RVU (det er tilfelle i Ruter-MIS der respondentene både blir spurt om bruk av hjemmekontor og mulighet for hjemmekontor).

Generell kalibrering mot trafikktegninger kan også gjøres for å tilpasse antall reiser og transportmiddelvalg. For dette kan man bruke API-løsningen til trafikktegningene som SVV tilbyr.

Trengselsnivå er heller ikke rapportert i reisedagbøkene i RVU, og det kreves egne undersøkelser for dette. I verdsetningsstudien og flere oppfølgeundersøkelser under og etter korona har man kartlagt reisevaner og preferanser i forbindelse med trengsel om bord. Resultater fra Flügel og Hulleberg (2023) kan tyde på en økning i trengselkostnader selv om effekten statistisk sett ikke er signifikant per november 2022 (forskjellen var statistisk signifikant per april 2022).

3.4.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensingene?

Vi er ikke kjent med konkrete forsøk på å fange opp preferanseendringer etter korona i RTM i form av endring i parameterne i adferdsmodeller. Tilpasninger etter korona virker å være begrenset til endring i rammetallkalibrering).

At etterspørselsmodellen i RTM er estimert på reisevanedata fra 2013/2014 er en kjent problemstilling, og generell fremgangsmåte for å tilpasse modellen til nyeste empiri er ved kalibrering. Hvordan man kan fange opp økt bruk av hjemmekontor og endrede preferanser i transportmodellene er beskrevet i neste avsnitt.

3.4.5 Hva er muligheter for videreutvikling av RTM-systemet?

Det gir mening å skille mellom kortsiktig og langsiktig utvikling, der «langsiktig» impliserer en re-estimering av modellen. Ved en re-estimering av modellen med post-korona reisevaner vil preferanser i modellen mer direkte gjenspeile faktiske preferanser i befolkningen.

På lengre sikt kan det også være en idé å prøve å få hjemmekontor mer direkte inn i modellen. En naturlig inngangsvinkel vil være å lage en segmentmodell for hjemmekontor. Ideelt bør slike segmentmodeller være LoS-avhengig, dvs. funksjonen bak segmenteringsmodellen bør inkludere log-summen,

tilsvarende dagens segmentmodell for biltilgang. I så fall kan bruk av hjemmekontor avhenge av reise-kostnader, og andel hjemmekontor kan beregnes endogent i avhengighet av beregnet tiltak.

Det å få hjemmekontor med i modellsystemet ansees som viktig for muligheten til å kunne predikere ulike teknologiske og samfunnsmessige scenarier. En mulig segmentering kunne være 1) ikke sysselsatt 2) sysselsatt uten bruk av hjemmekontor 3) sysselsatt med fullt hjemmekontor 4) sysselsatt med delvis hjemmekontor. Segmentene vil trolig ha betydelige effekter på reisefrekvensmodellen for ulike reise-hensikter (i alle fall for arbeidsreiser).

På kort sikt, dvs. før en re-estimering av modellen, er en mulighet å inkludere hjemmekontor i RTM begrenset med indirekte kalibrering. Det som virker mest gjennomførbart er destinasjonskalibrering med mulig reduksjon i andel arbeidsreiser til soner med en potensiell høy andel personer som har mulighet for hjemmekontor. Mulighet for hjemmekontor kan muligens avledes fra NACE-koder i sonedataene for arbeidsplasser.

Når det gjelder trengsel så ligger det funksjonalitet for det i avviklingsmodellen siden versjon 4 av RTM (Tørset et al 2022). Man kan spesifisere ulempefunksjoner som multipliserer tidsverdien med en faktor ut ifra belastningsgraden på det kollektive transportmidlet ("load factor"). I motsetning til trengselsfunksjoner i Trenklin, skiller belastningsgraden i RTM ikke mellom stå- og sitteplasser. Uansett ligger det en mulighet for å oppjustere disse ulempekostnader om man vil legge inn preferanseendringer (økt trengselsulempe etter korona).

3.4.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Bruk av hjemmekontor vil ha direkte effekter på aktivitetsmønsteret og transportbehovet over et helt døgn siden et er avhengigheter mellom aktiviteter. Derfor er hjemmekontor et element som er best ivaretatt ved aktivitetsbasert modellering.

Som antydnet i avsnitt 2.4 (og beskrevet i Flügel et al (2021) og Flügel et al 2024) har aktivitetsbasert modellering flere prinsipielle fordeler over modeller som er basert på turgenering og soneattraktivitet:

1. Realismen i adferdsmodellering forbedres ettersom individuelle beslutninger er underlagt personspesifikke begrensninger (som hjemmekontor)
2. Valgadferd er basert på heldaglige aktivitetsplaner og modelleres/simuleres for å oppnå konsistens mellom avhengige turer (folk som reiser til jobb, må også reise fra jobb senere på dagen, og transportmiddelvalget for disse to turene vil være avhengige). I motsetning til RTM kan dette også skjer på tvers av turkjeder/rundturer.
3. Høyere oppløsning i tid og rom (typisk ingen binding til geografiske soner eller tidsperioder).
4. Inkluderer flere adferdsdimensjoner (valg av avreisetid)

Trengsel kan fanges opp i transportmodellen Trenklin etablert av Jernbanedirektoratet. Motstand mot trengsel beregnes gjennom såkalte trengselsfunksjoner (Flügel et al 2020). Basert på resultater i Flügel og Hulleberg (2023) kan disse funksjonene justeres for å fange opp empirien fra post-korona situasjonen.

I MATSim er kollektivtransport typisk et valgalternativ som agenter kan velge. Reisetiden kan enten bestemmes basert på luftdistanse eller ved faktiske simuleringer i nettverk (dette inkluderer simulering av bytte og tilbringer-frabringerreise). Ved simulering i nettverk vil man også ta hensyn til kapasitetsbegrensninger på kjøretøyene og må muligens vente på neste avgang når kjøretøyet ved gjeldende avgang er fullt. trengselskostnader kan i prinsippet fanges opp i MATSim. Vi er ikke kjent med konkrete implementeringer som inkluderer trengselsnivå i kollektivtransport i nyttefunksjoner i MATSim.

3.4.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles til å fange opp tiltakene på en god måte?

I maskinlæringsbasert generering av aktivitetsplaner, i Flügel et al (2024), inngår graden av hjemmekontor¹⁰ som en forklaringsvariabel, og påvirker ikke bare arbeidsreiser, men også alle andre reisehen-sikter. I trening av modellen på data fra Ruter-MIS, er graden av hjemmekontor basert på rapporterte verdier, både under og etter korona. I anvendelse av modellen – ved predikering av aktiviteter og reiser – er fordelingen av hjemmekontor over syntetiske personer (agenter) i RTM23+ området basert på post-korona andeler i Ruter-MIS gitt arbeidsregion, kjønn og aldersgruppe til agentene.

3.5 Parkering og nullutslippssoner

3.5.1 Hva går tiltaket ut på?

Nullutslippssoner, dvs. områder hvor utslipp fra kjøretøy er forbudt eller strengt begrenset, har i uten-landske studier vist seg å være effektive i å redusere både konsentrasjonen av utslipp og trafikk tett-heten i bysentrum. Implementering av slike soner krever imidlertid nøye planlegging og en forståelse av de potensielle effektene på både transportmønstre og bysamfunnet. Transportmodellering kan brukes som utgangspunkt for å evaluere effekten av nullutslippssoner og for å forutsi konsekvensene av slike tiltak på transport, inkludert personbiler, offentlig transport og ikke-motorisert trafikk.

Parallelt med nullutslippssoner er parkeringspolitikk og -styring blitt et kraftfullt verktøy for å kontrollere bilbruk og påvirke transportvaner. Ved å regulere tilgangen til parkering og justere parkeringsavgifter, kan byer redusere etterspørselen etter bilreiser og fremme mer bærekraftige transportformer som gåing, sykling og offentlig transport. Transportmodeller kan simulere ulike parkeringsstrategier og deres påvirkning på transportvalg, trafikkflyt og bymiljøet. I de fleste transportmodeller har man brukt parkeringskostnader som en forklaringsvariabel. Tilgjengelighet til parkering er noe vanskeligere å modellere direkte, men effekter av dårlige parkeringsmuligheter kan fanges opp via proxy-variable. I RTM bruker man en såkalt tetthetsvariabel som en proxy for parkeringsmuligheter. Tetthetsvariabler vil også fange opp andre effekter som henger sammen hvor tett bebygdet et område er.

I følgende diskusjon legger vi følgende definisjon til grunn:

For kartlegging under, definerer vi «Parkering og nullutslippssoner» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Tilgjengelighet og/eller kostnader for bilparkering avhenger av faktisk/gjennomsnittlig tid for parkering
- 2) Mulighet for å innføre restriksjoner (inkl. forbud) mot å bruke noen typer biler i geografisk avgrensede områder

3.5.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

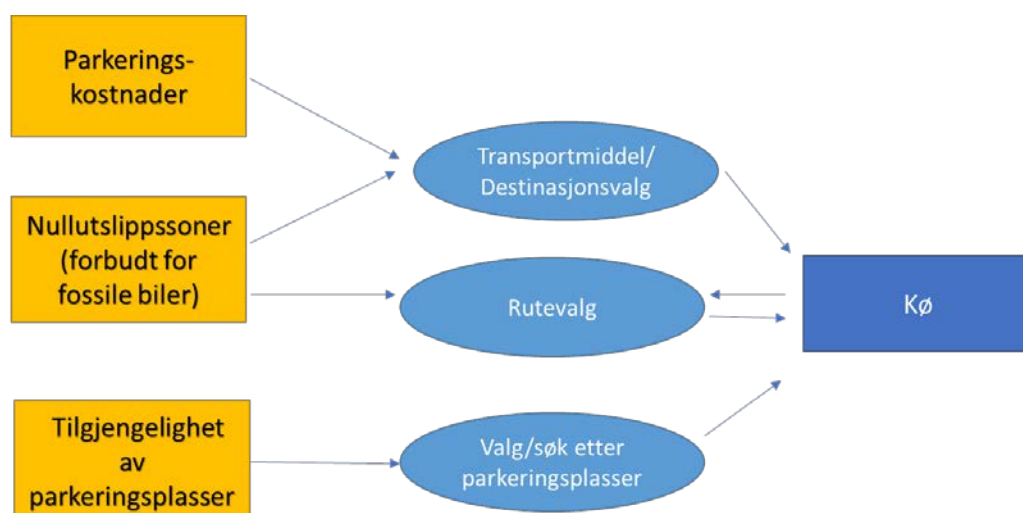
Figur 3.14 viser sentrale mekanismer i hvordan parkering og nullutslippssoner kan påvirke destinasjons-valg, biltilgang og transportmiddelvalg.

¹⁰ Det brukes dummy variabler for ingen hjemmekontor, 1 dag hjemmekontor i uka, 2 dager hjemmekontor i uka, 4 dager hjemmekontor i uka, og 5-7 dager hjemmekontor i uka i modellen.



Figur 3.14: Sentrale virkninger av parkering og nullutslippssoner på etterspørselssiden.

Figur 3.15 viser effekter på trafikkavviklingssiden der parkeringskostnader og nullutslippssoner kan påvirke rutevalg. Det kan skje via omkjøring av nullutslippssonen eller via endret trafikkbelastning og kø. Manglende tilgjengelighet av parkeringsplasser ved destinasjon kan generere mer trafikk og føre til en viss økning i kø. Denne effekten er trolig forholdsvis liten i Norge og mindre interessant for strategisk planlegging.



Figur 3.15: Sentrale virkninger av parkering og nullutslippssoner på trafikkavviklingssiden.

3.5.3 Hvilke data trengs?

Parkeringskostnader og tilgjengelighet av parkeringsplass er vanskelig å identifisere på individnivå og er ofte bare tilgjengelig på aggregert/gjennomsnittlig nivå, f.eks. på relasjonsnivå eller som sonevariabel.

Nullutslippssoner kan kodes i nettverket basert på planlagte politiske vedtak eller scenarioer.

3.5.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensingene?

I utviklingsprosjekter for RTM/tb2-modellen har TØI og Numerika fokusert på detaljert håndtering av parkeringskostnader og konsekvensene av nullutslippssoner. Parkering kan modelleres ved å legge inn

gjennomsnittlige kostnader per destinasjonssone i inputfilene, inkludert rabatter for elbiler, og ved å spesifisere når det påløper kostnader og når parkering er gratis.

Modellering av nullutslippssoner er integrert i RTM/tb2 ved å definere elbiler som et eget transportmiddelvalg. Dette muliggjør eksklusiv tilgang til visse veier for elbiler, noe som effektivt hindrer fossilbiler i å kjøre inn eller å krysse disse sonene. Slike reguleringer påvirker både valg av destinasjon, rute og transportmiddel, og indirekte biltilgangen, uten å direkte påvirke andelen elbiler, som er forutbestemt eksogent.

I tillegg til kostnaden ved parkering, kan tilgangen på parkeringsplasser også begrense valg av destinasjon. For å adressere områder med få parkeringsplasser kan man legge inn høye kostnader i modellen for å reflektere mangel på parkering. Dette suppleres av en egen sonedatafil, «MerKalib», som legger til en ekstra parkeringsulempe. Dette differensieres videre etter reisehensikt, og verdier til denne filen beregnes med hensyn til antallet tilgjengelige parkeringsplasser i eller rundt en sone.

Gjennom utviklingen av arealdataverktøyet (ADV) har det blitt gjort forsøk på å automatisere beregning av disse «kalibreringsverdiene», basert på antall tilgjengelige parkeringsplasser og antall arbeidsplasser i grunnkretsene. Dette inkluderer også vurderinger av parkeringsmuligheter i nærliggende grunnkretser, noe som kan moderere den overordnede parkeringsulempen og opprettholde visse grunnkretser som mulige bildestinasjoner selv uten direkte parkeringstilgang i den aktuelle grunnkretsen.

3.5.5 Hva er muligheter for videreutvikling i RTM-systemet?

Vi har ikke vurdert videre konkrete forbedringer for nullutslippssoner i RTM-systemet. Et generelt forbedringspotensial ligger i kobling av RTM med arealbruksmodeller slik at effekter av nullutslippssoner på bosettingsmønster kan fanges opp.

Når det gjelder parkering kan det ligge en mulighet å bruke en mer direkte datarepresentasjon (enn via tetthetsparameteren) av (gjennomsnittlig) tilgjengelighet og økt reisetid på grunn av parkeringssøk i etterspørselsmodellen av RTM.

Beregning /simulering av ekstra trafikkarbeid pga. søk etter parkeringsplasser er utenom anvendelsesområdet til RTM.

3.5.6 Hvilke andre metoder/modeller kan tenkes å brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Motivasjon for å bruke dynamiske og agent-baserte modeller for parkering ligger i muligheten for å simulere søk etter parkeringsplasser i modellen. I følge (Bischoff & Nagel, 2017), som simulerer søk etter parkeringsplasser i Berlin med MATSim, utgjør trafikk relatert til parkeringssøk opptil 20 prosent av den samlede trafikken i et boligområde og har en betydelig innvirkning på de totale reisetidene for agenter som reiser med bil.

Denne type simulering faller nok utenom strategiske transportmodeller. For de fleste typer analyser er det trolig viktigere å se på modellering av etterspørselseffekter. En fordel med agent-baserte modeller kan være at parkering kan spesifiseres på individnivå og ikke som et gjennomsnittlig nivå per grunnkrets. Det synes viktig at parkering inngår i generaliserte kostnader for alternativet bil, også med tanke på å kunne beregne effekter av robotaxi og andre mobility-as-a-service der behov for parkering bortfaller.

3.5.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Vi har ikke vurdert hvordan parkering konkret kan integreres i MATSim-modeller for Norge. Det finnes en MATSim-modul for parkering (<https://www.matsim.org/apidocs/parking/0.9.0/>), men vi har innenfor rammen av dette prosjektet ikke hatt anledning til å teste ut denne.

En aktuell og omfattende integrering av parkering i MATSim er dokumentert i Hassine et al. (2024).

3.6 Bildeling/robotaxier

3.6.1 Hva går tiltaket ut på?

Robotaxier er delte biler som kjører autonomt, dvs. uten fører. Robotaxier kan være med eller uten samkjøring av (fremmede) personer.

Waymo tilbyr i skrivende stund robotaxier i Phoenix og San Fransisco, og har kjørt over 700 000 robotaxi-turer i 2023¹¹. Merk at Waymo service har en sikkerhetsrutine der en operatør kan gripe inn og styre bilen eksternt hvis det blir nødvendig. Waymo er på automatiseringsnivå 4 siden kjøringen er begrenset til et visst område («geofencing»).

Bideling er et mer generelt begrep for å leie/dele en bil, enten for å bruke den til private formål (delt bil uten samkjøring) eller at man betaler for å bli med på en biltur (delt bil med samkjøring). Det finnes ulike løsninger for det som illustrert i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Ulike former for bildeling og robotaxier.

	Kjører selv	Andre mennesker kjører	Fullt automatisert
Privat kjøretøy	Vanlig privat bil	Bilpassasjer (privat)	Autonome biler
Delt bil – ingen samkjøring	Bil gjennom bildeling / leiebil / UberRent o.l.	Tradisjonelle taxier / Uber (taxi)	Robotaxier – uten samkjøring
Delt bil – samkjøring	Tilbyr andre å kjøre med deg (for eksempel PenguinUp)	Tjenester som UberPool	Robotaxier – med samkjøring (Ruters pågående uttesting i Groruddalen)
(Delt) buss /minibuss – MaaS («demand responsive»)	-	Bestilte busser / maxitaxi (i Norge typisk uten samkjøring utenfor gruppen med unntak av «rosa busser» i Oslo)	Større robotaxier/ delte selvkjørende busser
(Delt) buss /minibuss – faste ruter	-	Tradisjonelle busser i rute	Selvkjørende busser i rute

For å holde diskusjonen oversiktlig, konsentrerer vi oss om bildeling og robotaxier uten samkjøring, dvs. det som er markert med grønn farge i tabell 3.2. Samkjøring medfører ytterligere utfordringer til modelleringen siden flere reiser fra forskjellige adresser må koordineres. Vi har diskutert dette kort i en analyse som er dokumentert i vedlegg B.

Som indikert i tabell 3.3 under, er kun tradisjonelle biler og busser eksplisitt modellert i RTM-systemet.

Tabell 3.3: Former for bildeling inkludert i denne rapporten.

	I forhold til dagens RTM	Diskutert i denne rapporten
Tradisjonelle biler /buss	Implementert	Nei
Tradisjonelle taxier / Uber - taxier	Ikke eksplisitt implementert	Nei
Autonome biler/busser	Ikke implementert (mulige tilpasninger på biltilgang og tidsverdi)	Nei
Bil gjennom bildeling / leiebil / UberRent o.l.	Ikke implementert	Ja
Robotaxier – uten samkjøring	Ikke implementert	Ja, se også kap. 4.4
Ulike former av samkjøring	Ikke implementert	Vedlegg B

¹¹ [Waymo chief product officer on progress, competition vs Cruise \(cnbc.com\)](https://www.cnbc.com)

Delte biler har flere lignende egenskaper som delt mikromobilitet, se avsnitt 3.7.

Tilgang og ventetider er sentrale elementer ved beskrivelse av transporttilbudet for delte biler/robotaxier. Følgende antakelser kan tenkes i modelleringen a) ubegrenset tilbud / ingen ventetider, b) eksogen bestemt tilgang/ventetid, muligens segmentert etter tidsperiode/byområde, c) endogent beregnet tilgang/ventetid.

Sistnevnte er den mest realistiske virkemåten og den mest utfordrende for modelleringen siden resultatet (ventetiden) vil være et resultat av dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud. I et forsøk på å være mer konkret så kan etterspørselen beskrives som antall personer som etterspør en bil/robotaxi ved sted X til tidspunkt Y, og tilbudet vil være antall ledige delte biler/robotaxier som er tilgjengelig i nærheten av X til tidspunkt Y+t, der t er gangtiden til nærmeste ledige bil eller ventetiden for nærmeste tilgjengelige robotaxi. Hvis etterspørselen er større enn tilbudet ved sted X, vil det ikke være en ledig bil/robotaxi, og det vil ta lengre tid å gå til et nytt sted eller vente på at en robotaxi kommer fra et annet sted for å hente personen (i begge tilfeller vil t øke med redusert tilbud).

Forskjellen mellom bildeling (uten autonomi) og robotaxier tabell 3.2 er:

- a) Robotaxier kan i prinsippet også brukes av personer uten førerkort. Dette øker potensiell brukergruppe
- b) Tidsverdien i selvkjørende biler kan være lavere enn for biler der man må kjøre selv (Flügel et al 2019)
- c) Robotaxier kan dynamisk re-allokeres, noe som kan øke tilgangen og redusere gangtiden til bil. Reallokering av tomme kjøretøy vil – andre ting likt – føre til mer trafikk på veiene
- d) Robotaxier kan redusere behovet for parkering og for areal for parkering
- e) På sikt er det også sannsynlig at autonome biler/robotaxier kan kjøre tettere enn andre biler og dermed øke veikapasiteten.

Vi bruker følgende arbeidsdefinisjonen for bildeling/robotaxier:

For kartlegging under, definerer vi «Bildeling/robotaxier» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

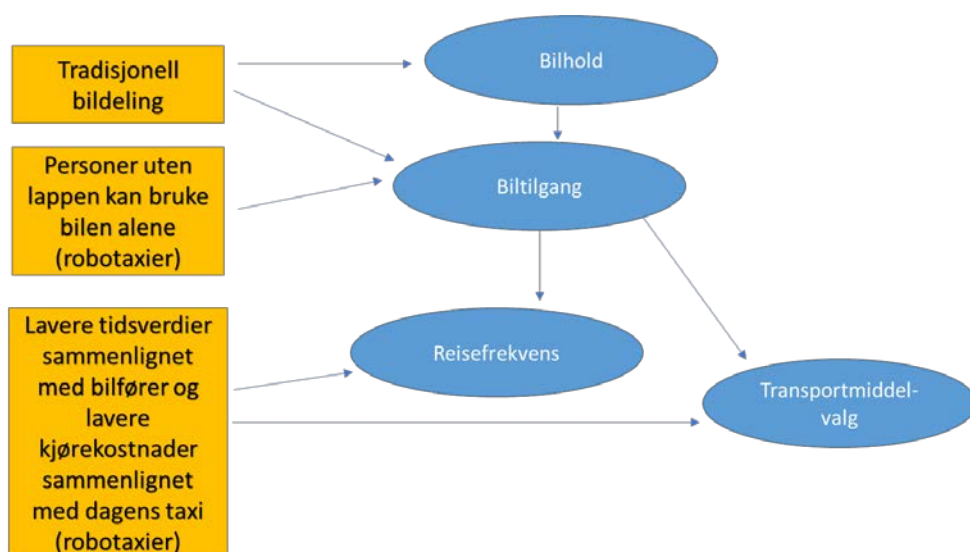
- 1) Tilgjengelighet etter tradisjonell bildeling og – ved opsjon – robotaxier (her uten samkjøring) fanges opp i modellering av biltilgang
- 2) Tidsavhengige ventetider til delte biler/robotaxier som funksjon av tilbud og etterspørsel (endogen)
- 3) Etterspørselsvirkninger av endrete kjørekostnader og lavere tidsverdi i robotaxi (sammenlignet med å kjøre selv)
- 4) Biler uten passasjer (tomme robotaxier som henter nye kunder) modelleres/simuleres i trafikkavviklingen

3.6.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

Figur 3.16 viser noen av de mest sentrale virkningene på etterspørselssiden. Tradisjonell bildeling har en negativ effekt på bilhold (eierskap av bil). Redusert bilhold vil - isolert sett - ha en negativ effekt på biltilgang, men denne effekten blir kompensert med at folk får biltilgang gjennom bildeling. Samlet sett vil økt bildeling trolig føre til økt biltilgang. I et tilfelle med robotaxier vil biltilgangen øke ytterligere fordi personer uten førerkort vil kunne bruke tjenesten.

Økt biltilgang vil gi effekt på reisefrekvens og transportmiddelvalg.

Prisen på en tur med robotaxier vil mest sannsynlig være vesentlig billigere enn med dagens taxier. Det vil sannsynligvis føre til økt reisefrekvens og transportmiddelvalg i favør bil/taxi. For dagens bilførere vil også økt kjørekomfort/lavere tidsverdier bidra til mer bruk av bil.



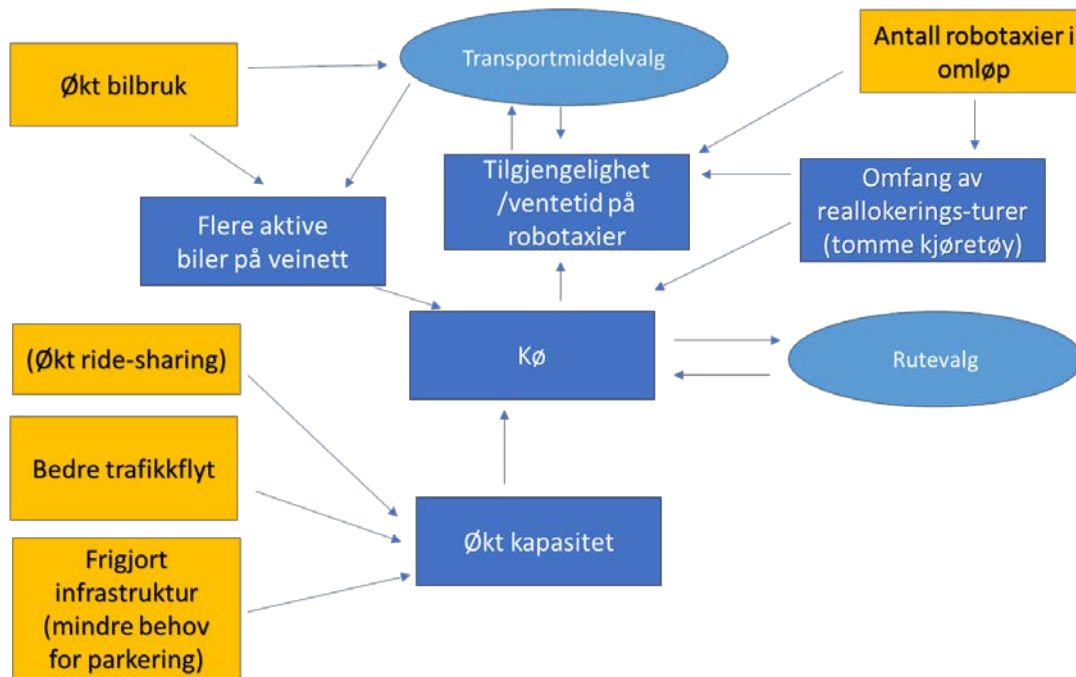
Figur 3.16: Sentrale virkninger av bildeling/robotaxier på etterspørselssiden.

På trafikkavviklingssiden vil økt bilbruk føre til flere biler på veinett. Om dette også fører til mer kø er noe usikkert siden andre mulige effekter av robotaxier kan øke vegkapasiteten. Blant disse effektene er økt samkjøring, bedre trafikkflyt (at bilene kan kjøre tettere opp mot hverandre) og frigjort infrastruktur som følge av mindre behov for parkering.

Det er altså uvisst om det blir mer eller mindre kø på grunn av robotaxier. Uansett må man regne med endringer i kømønsteret, noe som kan påvirke rutevalget.

En sentral komponent i LoS-data for robotaxier vil være forventet ventetid på neste ledige robotaxi. Høy ventetid vil redusere etterspørselen etter robotaxier, og høy etterspørsel vil – ved et fast antall robotaxier i omløp – føre til økt ventetid. For å modellere disse effektene må det beregnes/simuleres en likevekt. Den endogene ventetiden i likevekt vil variere med døgntype, klokkeslett og geografi.

Et annet endogent element er omfang og fordeling av reallokeringsturer av robotaxier som kan ha en betydelig effekt på kø.



Figur 3.17: Sentrale virkninger av bildeling/robotaxier på trafikkavviklingssiden.

3.6.3 Hvilke data trengs?

Viktige scenariovariabler for robotaxi er antall og utforming (setekapasitet) av kjøretøyene. Videre trenger man å definere plassering av pick-up plassene (hentesteder) i nodene i nettverket.

Gjennom nyttefunksjoner i etterspørselsmodeller bør det komme frem at tidsverdien trolig er lavere når man slipper å kjøre selv. Analyse på data fra den norske verdsettelsesstudien viser at tidsverdien i selvkjørende biler kan være mellom 70 og 80% av tidsverdien for bilfører (Flügel et al., 2019).

Andre scenariovariabler inkluderer takstsystemer og evt. geografisk begrensning (geofencing) av tilbudet.

3.6.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensningene?

Bildeling (utenom eget hushold) er ikke en del av RTM-systemet (se figur 3.18 i neste avsnitt).

Robotaxi og andre transportmidler innenfor kategorien «mobility-as-a-service» (MaaS) har ikke blitt implementert i RTM og det virker ikke som det er en klar vei for hvordan det kan inkluderes. RTM er designet for å representere gjennomsnittlige forhold og er ikke naturlig egnet til å håndtere de dynamiske, tidssensitive egenskapene til MaaS som robotaxi. Dette inkluderer variasjoner i ventetid og tilgjengelighet som endres over døgnet.

Uten mulighet for å simulere ventetid på robotaxi i nettverksmodellen som en konsekvens av dynamisk samspill mellom etterspørsel (personer som etterspør robotaxier der og da) og tilbud (ledige robotaxier i nærheten av personen som bestiller), må ventetiden antas eksogent. Dette medfører et stort usikkerhetsmoment fordi ventetiden kan forventes å være det største elementet i generaliserte reisekostnader for delte autonome biler. Når det gjelder trafikkmengde er det også en begrensning i at det er uklart hvordan man skal beregne antall og fordeling av tomme reallokeringssturer (robotaxier som kjører uten passasjer for å plukke opp neste kunde).

3.6.5 Hvilke muligheter finnes for videreutvikling av RTM-systemet?

Når det gjelder tradisjonell bildeling, så ligger det trolig en mulighet i RTM for å fange opp økt biltilgang i segmenteringsmodellen for biltilgang. I dag brukes følgende segmentering (figur 3.18):

#	Kortnavn	Navn	Fører kort	Bil(er) i hushold
1	DBTP	Dårlig biltilgang som passasjer	Nei	Nei
2	FBTP	Full biltilgang som passasjer	Nei	Ja
3	DBTF	Dårlig biltilgang som fører	Ja	Nei
4	FBTF	Full biltilgang som fører	Ja	Ja, og >= antall FK
5	GBTF	God biltilgang som fører	Ja	Ja, og < antall FK

Figur 3.18: Dagens inndeling i biltilgang i RTM (kilde: <https://www.numerika.no/tramod/tramod-by/biltilgang-geografisk/>).

Med sterkt økende biltilgang via bildeling (utenom eget hushold) virker det hensiktsmessig å endre inndelingen og definisjonen av segmenter. En slik endring vil trolig kreve nyestimering av modellen og er dermed ikke realistisk på kort sikt. På kort sikt kan det ligge en mulighet å kalibrere ned andel DBTP til fordel for FBTP, men dette må vurderes basert på grundig uttesting.

Videreutvikling av RTM for å kunne fange opp robotaxier på en realistisk måte virker vanskelig (se forrige avsnitt). Det er heller ikke sikkert at kobling med trafikksimuleringsmodeller er en fruktbar vei å gå her siden en ekstern kobling vil gjøre det vanskelig å fange opp dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud på en god måte selv om man skulle klare å dynamisk iterere mellom RTM og en evt. simuleringsmodell. En hovedutfordring er at TraMod_by ikke har en representasjon av døgntid som kan «snakke sammen» med simuleringsmodellen på en ønsket tidsoppløsning.

3.6.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Agent-baserte modeller fremstår som den mest lovende modelltypen for å kunne modellere robotaxier.

I stedet for å søke etter abstrakte representasjoner, prøver den nye simuleringsbaserte tilnærmingen å fange opp alle viktige egenskaper og interaksjoner i systemet og utføre simuleringer som etterligner virkelige prosesser.

Agent-baserte transportsimuleringer (Nagel og Flötteröd 2012) simulerer oppførsel, bevegelser og interaksjoner mellom individuelle agenter og kjøretøy, noe som resulterer i oppduggende fenomener på systemnivå (for eksempel trengsel i transportnettverket som oppstår ut fra adferden av mange individuelle reisende). Implementering av en agent-basert transportsimuleringsmodell krever at man (i) konstruerer en digital representasjon av transportsystemet, (ii) setter inn simulerte personer som handler i dette miljøet i henhold til tidligere estimerte adferdsmodeller, (iii) evaluerer (simulerer) de resulterende systemnivådynamikkene til personer og kjøretøy. Det åpne kildekode-verktøyet MATSim (Horni et al. 2016) er et mye brukt rammeverk for agent-basert simulering.

For å bestemme LoS for robotaxier, må man endogent beregne/simulere ventetiden gitt detaljert romlig allokering av etterspørsel (agenter som etterspør en robotaxi) og tilbud (tomme robotaxier). I de fleste tilfeller vil det være et misforhold mellom tidspunktet på dagen og stedet der en robotaxi blir etterspurt. Interaksjonene mellom enkeltagenter og robotaxier er ikke godt fanget opp i matematiske modeller, og en simuleringsbasert tilnærming er klart foretrukket. I en gjennomgangsstudie fra 2019 brukte bare 2 av 27 studier som analyserte nettverksytelsen til autonome kjøretøy tradisjonelle/makroskopiske tildelingsmodeller, og et klart flertall brukte agent-baserte simuleringsmodeller (Pernestål og Kristoffersson, 2019). En annen gjennomgangsstudie fra 2021 ser ut til å bekrefte denne trenden og finner interessant nok at 46% av alle studier (N=62) ble gjort med det agent-baserte simuleringsrammeverket MATSim (Lie et al. 2021).

3.6.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Relevante moduler for en MATSim implementering er modulen for etterspørselsresponsiv transport (DRT) og modulen for dynamisk ruteplanlegging av kjøretøy (DVRT). Den første modulen muliggjør inkluderingen av delte autonome taxier, mens den andre letter dynamiske justeringer til agenters planer. Ytterligere utvidelser som er relevante for vår forskning, inkluderer en modul for autonome kjøretøy (AV) og en taximodul. Disse to modulene har blitt utviklet basert på DRT og DVRT. Lignende scenarioer har blitt utforsket i et Mobility-as-a-Service (MaaS) og Mobility-on-Demand-prosjekt (<https://github.com/matsim-org/matsim-maas>), utviklet av J. Bischoff, M. Maciejewski og K. Nagel.

Vi henviser til avsnitt 4.4 for en illustrasjon av et forenklet scenario.

3.7 Mikromobilitet

3.7.1 Hva går tiltaket ut på?

Vi følger definisjonen av mikromobilitet som foreslått av Meland et al. (2020):

Begrepet 'mikromobilitet' defineres både som typen av kjøretøy og mobilitetsfunksjonen som kjøretøyene fyller, og refererer til transport over korte avstander, med små og ofte (men ikke nødvendigvis) elektriske kjøretøy slik som elsparkesykkel, Segway, enhjuling, hoverboard, skateboards etc. Begrepet «delt mikromobilitet» inkluderer ytterligere en dimensjon, nemlig organiseringen av publikums tilgang til

kjøretøyene. Disse kjøretøyene leies vanligvis via en app eller kiosk, plukkes opp og avleveres på offentlig grunn, og er ment for korte punkt-til-punkt-turer.

(Meland et al., 2020).

I motsetning til egenskapene til robotaxier i forrige avsnitt, setter vi ikke noe krav om at ventetiden til mikromobilitet beregnes endogent i modellsystemet. Teoretisk sett kan det oppstå ventetid, hvis en bruker venter på at en annen bruker leverer fra seg en elsparkesykkel i nærheten. I de fleste tilfellene vil denne ventetiden være for stor eller for usikker, og brukerne vil heller gå (hvis avstanden er kort) eller (ved lengre avstander) bruke kollektivtransport eller taxi. Generell tilgjengelighet vil derimot være en viktig forklaringsvariabel for valg av mikromobilitet. Tilgjengelighet kan antas eksogent i modellen, men bør variere med geografi og tid (både sesongvariasjon, døgntype og tidspunkt). Tilgjengelighet kan implementeres som en hard restriksjon eller som en kontinuerlig variabel som indikerer motstand mot bruk av mikromobilitet. I sistnevnte tilfelle vil variabelen også fange opp ventetid/gangtid for/til neste elsparkesykkel.

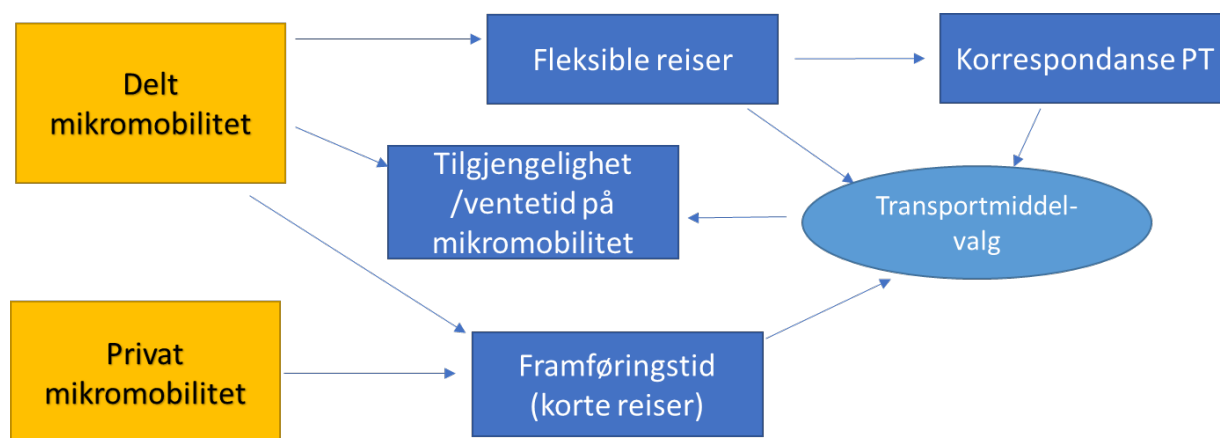
I likhet med gange og sykkel, er elektriske elsparkesykler ofte brukt som tilbringertransportmiddel til kollektivtransport.

For kartlegging under, definerer vi «Mikromobilitet» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Tilgjengelighet av private og delte e-scootere eller lignende små kjøretøy (eksogent eller endogent)
- 2) Transportmiddelvalget omfatter e-scooter eller lignende små kjøretøy der reisetiden er resultat av modellert/simulert rutevalg med disse kjøretøy

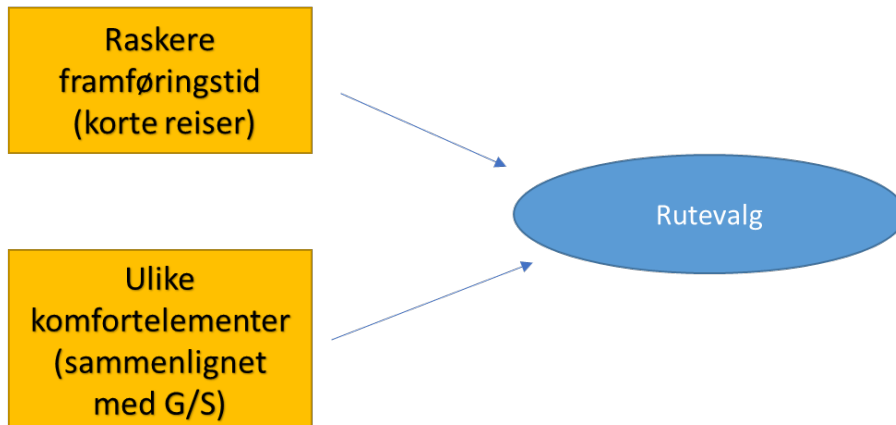
3.7.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

Delt mikromobilitet medfører en fleksibilitet som man ikke nødvendigvis har med private kjøretøy. Videre kan framføringstiden være raskere enn med gange (og sykkel). Dette innebærer at tilbringer- og frabringerreisen til kollektive transportmidler kan reduseres. Det kan igjen føre til at kollektivtransport blir mer attraktivt. Som illustrert i Figur 3.19 fører disse effektene til at mikromobilitet påvirker transportmiddelvalget. Når mange personer bruker mikromobilitet (deriblant mange delte løsninger) vil dette påvirke tilgjengeligheten (og ventetiden) for delt mikromobilitet. Tilgjengelighet kan påvirkes med økt tilbud, dvs. innkjøp og utrulling av flere kjøretøy, noe som kan simuleres i et eget senario.



Figur 3.19: Sentrale virkninger av mikromobilitet på etterspørselssiden.

På trafikkavviklingssiden (figur 3.20) kan raskere framføringstid og komfortvirkninger påvirke rutevalget. For eksempel kan ruter med mange motbakker få mer trafikk siden ulempen med elektriske kjøretøy er mindre sammenlignet med å gå eller sykle. Rutevalget for gange og sykkel (og i forlengelsen mikromobilitet) har hatt en underordnet rolle i mange transportmodellkjøringer, men bedre analyser av transportmiddelvalg og rutevalg kan være interessant blant annet med tanke på (tapte) helsegevinster gjennom (reduisert) sykling og gange ved overgang til mikromobilitet.



Figur 3.20: Sentrale virkninger av mikromobilitet på trafikkavviklingssiden.

3.7.3 Hvilke data trengs?

For modeller som beregner tilgjengelighet endogent må man definere antall kjøretøy og opprinnelige plasseringer av kjøretøyene i analyseområdet. For modellering av en referansesituasjon bør dette skje basert på empiriske data.

Reisetiden med mikromobilitet kan beregnes ut fra distanse, evt. ved å ta hensyn til infrastruktur. I beste fall bør det etableres fartsmodeller tilsvarende som for sykling.

3.7.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensningene?

Etterspørselsmodellen TraMod_By er estimert basert på data fra RVU fra år 2013 og 2014. På dette tidspunktet var elsparkesykler og lignende små elektriske kjøretøy ikke/lite utpreget i Norge. Mikromobilitet håndteres derfor ikke i dagens RTM.

TraMod_By inkluderer gange og sykkel (GS), som har en del likhetstegn med mikromobilitet fra et modelleringsperspektiv. utfordringer inkluderer 1) man mangler private veier og snarveier i CUBE-nettverket 2) soneinterne reiser legges ikke ut på nettverket, 3) forenklet rutevalg der alle reisende mellom et sonepar velger samme rute (se også Flügel et al 2021).

I byer inngår GS indirekte som tilbringertransportmiddel for bil og kollektiv. Disse turene legges ikke ut på nettverket og påvirkes bare hvis det er endring i lokasjon stoppesteder for kollektive transportmidler. Et tiltak om forbedre GS infrastruktur hastighet eller komfort for GS kan dermed undervurderes hvis tilbringerreiser utgjør en betydelig andel av GS-reiser.

Et argument for behov for bedre modellering av gange og sykkel er bedre predikering av helsegevinster som følge av tiltak og adferdsendringer. Dette er elementer som er av mindre betydning for mikromobilitet, som typisk krever mindre fysisk innsats.

3.7.5 Hva er mulighetene for videreutvikling av RTM-systemet?

Å tilføre nye transportmidler i dagens RTM er ikke uten videre mulig pga. faste modellformuleringer og en låst dataflyt. Det er tidkrevende å ta inn nye modellformuleringer og endret segmentering, og innføring av nye transportmidler kan kreve omskriving av kildekode og en ny estimering av modellen.

Ved en reestimering av modellen bør man vurdere om mikromobilitet bør tas med som en egen mode eller om denne type transport skal integreres i sykkelalternativet. Som nevnt i forrige avsnitt er det fordelaktig å kunne skille mellom de to med tanke på helsegevinster.

På kort sikt kan det ligge en mulighet i å integrere etterspørsel etter mikromobilitet i sykkelalternativet når man rammetallskalibrerer modellen.

For detaljerte analyser av mikromobilitet kan det ligge forbedringsmuligheter i å bruke et mer detaljert nettverk som inkluderer plasser, snarveier og private veier som brukes av mikromobilitet. OpenStreetMap kan være en kilde for å øke detaljeringsgraden i Cube-nettverket.

3.7.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Mikromobilitet setter visse krav til detaljeringsgrad som kan være vanskelig å få til i strategiske transportmodeller. Modeller med detaljerte nettverk som unngår aggregering på sonenivå er prinsipielt foretrukket.

Om man eksplisitt vil modellere tilgjengelighet av elsparkesykler og delte elsykler endogent, trenger man også en dynamisk modellering i likhet med modellering av robotaxier.

Artikkelen <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043022000016> gjør en systematisk analyse av egnethet for agent-baserte modeller når det kommer til å modellere mikromobilitet.

Analysen er basert på følgende 10 kriterier:

1. Åpen kildekode
2. Simulering av delt mobilitet
3. Storskala transportnettverk
4. Etterspørselsvariasjoner i rom og tid
5. Sykkeltrafikksimulering
6. Fotgjengertrafikksimulering
7. Blandet trafikksimulering
8. Sosiodemografiske kjennetegn
9. Nye diskrete valgmodeller
10. Simulering av multimodale turer

MATSim (M3 i avsnitt 2.4) og SimMobility (state-of-the-art modell, M4, avsnitt 2.4) er to omtalte modeller i artikkelen. SimMobility møter 9 av 10 kriterier (alle unntatt kriterie 5), og har sin styrke i evnen til å utføre simuleringer på flere nivåer og tidsperspektiver (se avsnitt 2.4). MATSim oppfyller også 9 av 10 kriterier (alle unntatt kriterie 6) og det poengteres at MATSim er generelt mer brukt enn SimMobility.

3.7.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Når man vil simulere mikromobilitet i agent-baserte modeller som MATSim, bør man trolig legge mest fokus på et godt grunnlag av etterspørselsdata. Ideelt sett kommer denne informasjonen både fra reisevanedata og fra bruksdata fra operatører. Videre trenger en detaljert nettverk og nettverksvariabler og de parameterne som påvirker fart og rutevalg.

Videre spesifisering vil avhenge av analyseformål. Hvis man fanger opp egnethet av mikromobilitet (som batteritid og begrenset parkering) på en realistisk måte, kan man også endre/videreutvikle algoritmer innad i systemet, noe som kan være ressurskrevende.

Inspirasjon for implementering av mikromobilitet kan finnes i litteraturen, f.eks. i Mitropoulos et al. (2023) og (Diallo et al., 2023).

3.8 Takstsystemer i kollektivtransport

3.8.1 Hva går tiltaket ut på?

Takstsystemer for offentlig transport i byer og byområder¹² kan være segmentert etter:

1. Lengden på reisen (distanse, tidsbruk eller sonesystem, ...)
2. En form for lojalitetsrabatt (periodekort, kvantumsrabatt, medlemskap, ...)
3. Rabatter for persongrupper (barn, studenter, honnør, ...)
4. Driftsform (tog, buss, T-bane, trikk, båt)
5. Rabatter som følger av reisegruppe (grupperabatt, familierabatt, ...)
6. Tidspunkt for reisen (natt, rushtid, helg,...)

En form for segmentering etter 1-3) er veldig vanlig og finnes i ulike varianter i alle norske byområder.

Det er noe uklart og varierende hvordan takstsystemer settes av kollektivselskapene. Det er trolig en blanding av inntekstmaksimering (i det minste inntektssikring) for kollektivselskaper, det sosiale/politiske aspektet (som er delvis lovfestet eller pålagt fra kontrakter om offentlige kjøp) og pragmatiske løsninger. Dette gjør at det er veldig vanskelig å predikere hvilke takstsystemer som vil være implementert om 5 år.

Mye tilsier at det kommer forandringer i hvordan man setter takstsystemer i fremtiden:

- Endrede preferanser og rammebetingelser som følge av pandemien og teknologisk fremgang øker bruk av hjemmekontor og gir dermed mindre insentiver til å kjøpe periodekort. Dette tilsier mer fleksible former for lojalitetsrabatter.
- Redusert bruk av kollektiv transport under og etter pandemien har/kan redusere inntekten til kollektivselskapene betydelig. Dette setter krav til at takstsystemet utnytter en større del av betalingsvilligheten til trafikantene.
- Nye tekniske løsninger gjør det enklere å validere billetter automatisk og/eller beregne kollektivprisen ut fra distanse og tidsbruk i sanntid.
- Klassiske sonesystemer kan framstå som utdatert og en personlig tilpasning av soner ansees som et mer rettferdig system. Nye teknologiske løsninger kan for eksempel muliggjøre personlige soner basert på hvor enkeltpersoner bor og jobber.

Man kan skille mellom takstsystem og takstnivå. Sistnevnte er trolig viktigst for beregning av overordnede etterspørselseffekter, mens takstsystemer handler mer om hvordan (relative) priser varierer mellom reiser og persongrupper og hvordan disse relative prisene kan påvirke mer finkornede etterspørselsendringer, inkl. valg av avreisetidspunkt.

¹² Vi ser her bort fra ferge, fjerntog og fly.

For kartlegging under, definerer vi «Takstsystemer i kollektivtransport» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Mulighet for å spesifisere nye rabattordninger som kvantumsrabatt og medlemskap.
- 2) Mulighet for å spesifisere tidsdifferensierte priser.
- 3) Mulighet for å spesifisere sonebaserte og distanseavhengige priser.
- 4) Effekter av 1)-3) på etterspørsel (ideelt inkl. avreisetidspunkt) og rutevalg/valg av driftsform (ideelt sett på avgangsnivå)

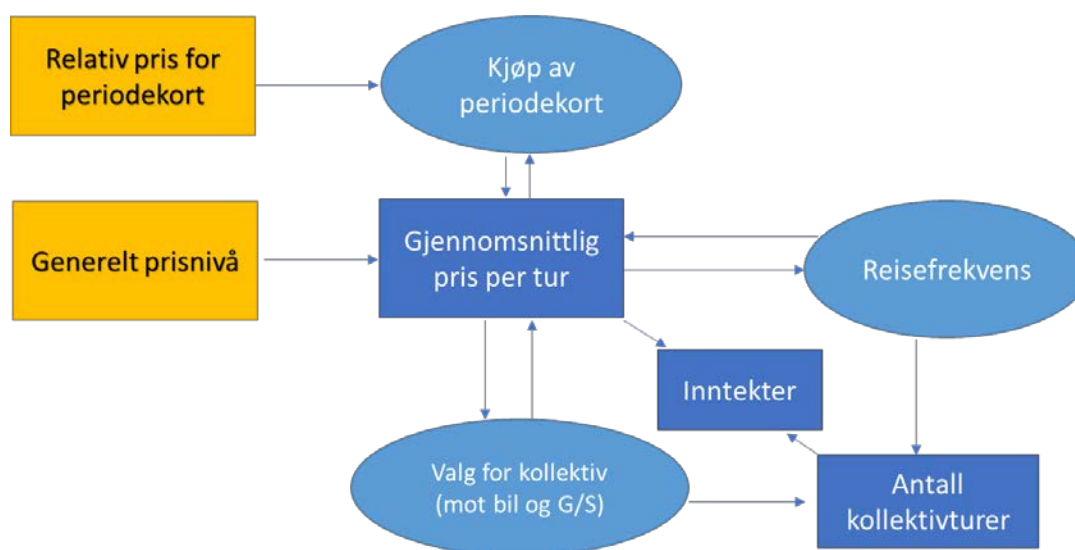
3.8.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

Som antydnet i forrige avsnitt oppstår takstsystemer gjennom politiske og bedriftsinterne prosesser som er vanskelige å predikere. Det finnes derfor ingen gode modeller for hvordan takstsystemet settes i virkeligheten, gitt (endringer i) rammebetingelser eller transportetterspørsel. Fra et modelleringsperspektiv impliserer dette at takstmodeller håndteres eksogent, dvs. at takstsystemene er forhåndsdefinerte og ikke beregnes i transportmodellene.

Ved eksogen spesifisering av takstsystemer i transportmodeller må man forholde seg til både takstsystem og takstnivå. Det gjøres enten ved å sette priser for alle relasjoner og persongrupper (takstnivået beregnes da som vektet sum over alle prisene) eller ved å sette prisnivået (gitt reiselengde) og rabattfaktorer for ulike persongrupper/typer reiser.

Siden de fleste transportmodeller beregner transport for et gjennomsnittlig døgn (og ikke en hel uke eller måned), er det ved bruk av periodekort (og andre lojalitetsrabatter) ikke opplagt hvordan prisen for en enkeltreise bestemmes. En tilnærming er å beregne gjennomsnittlig kostnad per tur ved å dele prisen på periodekortet med estimert antall turer man gjennomfører innen den gitte perioden. En utfordring ligger i at antall turer vil være betinget av kjøp av periodekort, siden den marginale prisen for kollektivtransport gitt kjøp av periodekort er null.

Figur 3.21 illustrerer noen sentrale virkninger gitt en endring i relativ pris for periodekort (tilsvarende endring i enkeltbillett).

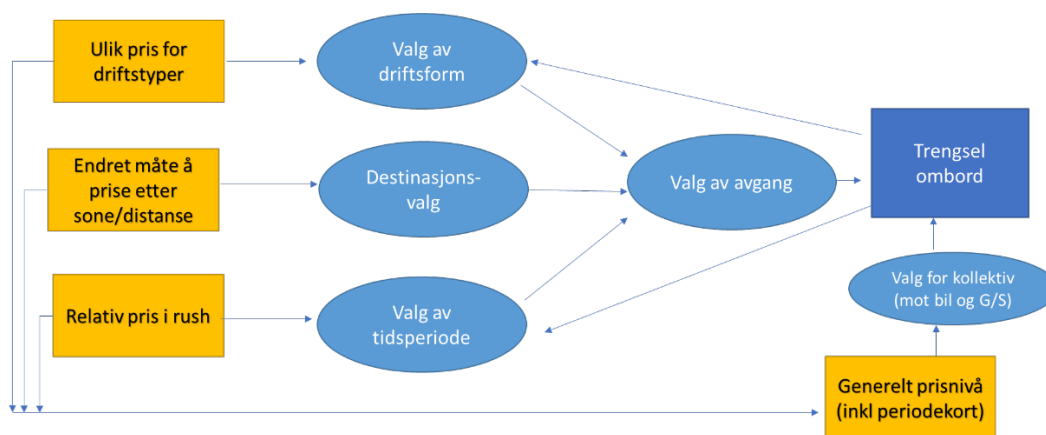


Figur 3.21: Sentrale virkninger av takstsystemer på etterspørselssiden.

For eksempel vil en reduksjon i prisen på periodekort øke andel med periodekort og redusere gjennomsnittlig pris per tur. Det vil ha en effekt på reisefrekvens som sådan og på transportmiddelvalg. I sum vil folk reise oftere med kollektive transportmidler, noe som gjør kjøp av periodekort enda mer attraktivt. Det samme gjelder også for betalt medlemskap som gir rabatter etter kjøp av medlemskap. Ved lojalitetsordningen «kvantumsrabatt» bortfaller valget ved kjøp av billettype. I motsetning til tradisjonell enkeltbillett (som er fast uavhengig av antall turer), har kvantumsrabatt en avhengighet, men reisefrekvens/transportmiddelvalg og gjennomsnittlig kostnad per tur.

For å vite hvordan antall turer og inntekten for kollektivselskapene forandrer seg gitt endringer i relative kostnader mellom periodekort og enkeltbilletter, er det viktig å ha en god modell for kjøp av periodekort. Modellen skal fange opp ulike priselastisiteter for periodekort og enkeltbillett, og bør helst integreres i en modell for transportmiddelvalg. Simuleringsmodellen for Oslo og Viken (ADL/TØI 2021) som TØI har laget for Ruter for å studere effekter av nye takstsystemer, modellerte valg av periodekort og transportmiddelvalg i en felles nestet-logitmodell. En svakhet i modellen var at antall turer med kollektive transportmidler ble holdt fast per individ.¹³

Mens Figur 3.21 viste sentrale virkninger av takstsystemer på etterspørselssiden, viser figur 3.22 virkninger av takstsystemer på valg av avgang («rutevalg») og trengsel om bord. Utfordringen for transportmodelleringen er at valg av avgang og trengsel er gjensidig avhengig. Transportmodellen Trenklin (Ranheim, 2017) fanger dette opp ved å iterere mellom et beregningsopplegg som bestemmer trengsel (gitt rutevalg) og en modell for rutevalg (gitt trengsel). Sistnevnte blir operasjonalisert ved bruk av trengselkostnader som inngår i funksjoner for generaliserte reisekostnader.



Figur 3.22: Sentrale virkninger av takstsystemer på transportavviklingsiden.

3.8.3 Hvilke data trengs?

I dagens versjon av RTM behøver man data om hvilke takstsystemer som benyttes i området man analyserer og relevant informasjon om hvert enkelt system. Modellen kan håndtere to typer takstsystemer: sone- og avstandsbasert. Videre er modelleringen relativt enkel.

Dersom man benytter sonebaserte systemer behøver man informasjon om takstsonenes geografiske utstrekning og priser for enkeltbillett og månedskort. Dersom man benytter et avstandsbasert system, kreves det data om minstepriser, maksimumspriser, fastledd per reise og et prispåslag per kilometer.

¹³ Effekten av økt reisefrekvens i PriSimOV (se avsnitt 3.8.6) blir bare brukt i en etterberegning av total antall turer (i rush og ikke-rush) og inntekster.

Informasjon om priser og sonestruktur er ofte tilgjengelig på nettsidene til offentlige kollektivoperatører. Prisfunksjoner for avstandsbaserte systemer kan i noen grad være mindre tilgjengelige. Det viktigste avstandsbaserte systemet i RTM er for togtrafikken hvor såkalt «TEN-takst» benyttes. Dette er et system, hvor totaltaksten settes basert på avstand og er tilgjengelig som matriser på forespørsel fra Jernbanedirektoratet, separert etter billettslag.

For å predikere andel periodekort i RTM benyttes faste gjennomsnittverdier for antall turer (det antas 21 tur-retur reiser per måned i arbeidsreisesegmentet, se avsnitt 3.8.4. I motsetning til disaggregerte modeller (som PriSimOV), er det ikke nødvendig med individuell informasjon omantall (kollektiv-) reiser per måned i RTM. Denne informasjonen kan imidlertid (under gitte forutsetninger) avledes/gjettes ut fra svarene i RVU og kan i prinsippet brukes ved estimering av kommende TraMod_by (se mer i avsnitt 3.8.5).

3.8.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensningene?

I dagens versjon av RTM (herunder forstått som den Cube-baserte versjonen), håndteres takst enten sone- eller avstandsbasert. Med sonebasert takst, menes det at man betaler en gitt sum for å passere et gitt antall soner. Med avstandsbasert takst, menes det at taksten øker proporsjonalt med reiselengden. Fremstillingen i dette avsnittet bygger i stor grad på Ranheim (2013).

Det sonebaserte systemet i RTM inkluderer at brukeren tilordner hver enkelt grunnkrets en takstzone representert ved et unikt takstsonenummer. For eksempel vil alle grunnkretser som inngår i Ruters sone 1, få tildelt det samme nummeret. Neste steg er å spesifisere hvilken takst som gjelder mellom hvert unike par av takstsonenummer, som vist i figuren under.

Fra	Til	Takst	
	1	1	100
	1	2	200
	1	3	200
	2	1	200
	2	2	100
	2	3	300
	3	1	200
	3	2	300
	3	3	100

Figur 3.23: Eksempel på tabell med taktsonerelasjoner og tilhørende takst.

La oss anta at Ruters sone 1 har takstsonenummer 1, sone 2Ø har takstsonenummer 2 og 2V har takstsonenummer 3. Man kan da sette opp en tabell tilsvarende figuren ovenfor. Hver enkelt *takstsonerelasjon* tilordnes dermed en *takst* som defineres separat. La oss videre anta at det finnes tre takster: 1 sone (= 100), 2 soner (= 200) og 3 soner (= 300). For hver takst, angir man videre pris for månedskort og enkeltbillett, på et format som i Figur 3.24. På denne måten kan man representere ulike takstsoner og priser for ulike kollektivselskaper.

Takst	Enkeltbillett	Månedskort		
100	kr	38	kr	814
200	kr	64	kr	1 443
300	kr	89	kr	2 074

Figur 3.24: Eksempel på taksttabell fra RTM for sonepriser.

Brukeren av RTM må i dag manuelt definere hvilken sone hver enkelt grunnkrets tilhører. Videre må prisene angis i en egen fil, basert på oppgitte priser fra operatørene.

Fra	Til	Takst	
	1	1	50
	1	2	200
	1	3	200
	2	1	200
	2	2	50
	2	3	300
	3	1	200
	3	2	300
	3	3	50

Figur 3.25: Eksempel på takstsonerelasjoner med avstandsbasert system (50).

Det avstandsbaserte systemet i RTM fungerer ved at brukeren definerer takstsoner med tilhørende takster som for det sonebaserte systemet. Inndataformatet for det sone- og avstandsbaserte systemet er så langt likt i modellen. Forskjellen ligger i hvordan man spesifiserer takstene i det avstandsbaserte systemet. La oss, for enkelthets skylds, ta utgangspunkt i den tidligere tabellen som viser hvilken takst som gjelder mellom ulike takstsoner. Dersom man ønsker å legge til et avstandsbasert system, kan dette gjøres ved å definere et nytt takstnummer (50 i eksemplet ovenfor).

Takst	Enkeltbillett				Månedskort					
	Enkeltbillett	Månedskort	Minimum	Maksimum	Konstant	Per km	Minimum	Maksimum	Konstant	Per km
100	kr	38 kr	814							
200	kr	64 kr	1 443							
300	kr	89 kr	2 074							
50		kr	25 kr	300 kr	25 kr	2 kr	700 kr	1 250 kr	700 kr	20

Figur 3.26: Eksempel på taksttabell som inneholder et avstandsbasert system (50).

I taksttabellen (Figur 3.26) kan man legge til et avstandsbasert takstsystem med nytt takstnummer og parametere som følger: En minimum- (T_{Min}) og maksimumstakst (T_{Max}), samt et konstantledd (T_{Konst}) og et prispåslag per kilometer (T_{Km}), differensiert på enkeltbillett og månedskort. Når modellen beregner en reise til å gå mellom to grunnkretser som befinner seg i takstsonen med takstnummer 50, henter den frem billettpris fra raden markert «50» ved hjelp av den relevante informasjonen.

I tillegg til de konkrete satsene henter modellen informasjon om beregnet reiseavstand om bord på det kollektive transportmidlet. Denne informasjonen beregnes i nettutleggingen for kollektivtransport (for morgen- og ettermiddagsrush, samt lavtrafikk).

Taksten, T_p^k , beregnes for en gitt tidsperiode p og for k =(Enkeltbillett, Periodekort) som følger:

$$T_p^k = \min(T_{Max}, \max(T_{Min}, T_{Konst} + T_{Km} * D_p))$$

Det beregnes altså en separat takst for hver tidsperiode, hvor distansen D_p er det som gir variasjon mellom tidsperiodene.

Modellen åpner også for at man kan definere en «resttakst» (sone 0) for alle relasjoner som ikke har fått et definert takstnummer tilordnet. Man benytter da en avstandsbasert takst, der parametere angis som for de andre avstandsbaserte takstsonene.

De estimerte takstene (LOS-data) sendes videre til etterspørselsmodellen der prisene for enkeltbillett og månedskort benyttes til å beregne hvor stor andel av de arbeidsreisende som har månedskort. Disse reisende har en vesentlig høyere sannsynlighet for å velge kollektivtransport sammenlignet med de som

ikke har periodekort (Rekdal m.fl., 2013). De som har periodekort, får effektivt sett gratis kollektivtransport på marginen i modellen. De som ikke har det, forholder seg til prisene på enkeltbilletter ved valg av transportmiddel.

Dagens takstmodellering i RTM dekker de mest brukte takstsystemene (sone- og avstand) og billettene (enkeltbillett og periodekort). De fleste kollektivselskaper opererer med sonebasert takst, foruten jernbanen som benytter avstandsbasert takst, og enkelte kommersielle bussoperatører. Sådan er metoden tilpasset til å gi et «rimelig» nivå på den monetære kostnaden forbundet med en kollektivreise, slik at etterspørselsnivået justeres tilsvarende.

Dagens håndtering gir imidlertid mindre muligheter til mer spesialiserte analyser av taksttiltak, og kanskje spesielt varianter som er av interesse i sentrale områder (hvor markedsgrunnlaget for kollektivtransport også ofte er størst). En uttømmende liste er utfordrende å sette opp, men noen sentrale begrensninger kan trekkes frem.

Et sentralt punkt er muligheten til å spesifisere tidsdifferensierte priser. I dagens variant, produseres det separate etterspørselsmatriser for morgen og ettermiddagsrush, samt lavtrafikkperioden. Det er imidlertid ikke mulig å spesifisere separate priser per tidsperiode, da hver grunnkretsrelasjon kun kan tilordnes én takstzone og ett takstnummer. Selv om det produseres egne matriser for hver periode, kan ikke separate priser genereres på nåværende tidspunkt.

Det er også uklart hvordan kombinasjonstakst håndteres. Med kombinasjonstakst mener man at en reise betaler i flere enn ett takstsystem. Et eksempel kan være en reise fra Drammen til Oslo, hvor man først tar buss til Drammen stasjon, deretter tog til Oslo S og til sist kjøper enkeltbillett i Oslo. En slik reise vil foregå både i et sone- og et avstandsbasert system, og modellen gir i dag kun mulighet for ett system per relasjon.

Videre finnes det kun mulighet for å analysere endringer i enkeltbillett og periodekortpris. Øvrige billettslag, som 24-timersbilletter, 7-dagersbilletter, etc., er ikke inkludert. Følgelig er ikke modellen spesielt godt egnet til å analysere effekten av å introdusere nye billettslag eller gjøre endringer i en portefølje av billettprodukter utover enkeltbilletter og periodekort. For eksempel, er det ikke mulig å spesifisere kvantums- eller medlemskapsrabatter.

Takstmatrisene beregnes som vist ut fra brukergitte tabeller som assosierer ulike grunnkretser med takstsoner, relasjoner mellom takstsoner og takstnummer til konkrete priser (og systemer). Følgelig betrakter ikke modellen forhold ved selve kollektivtilbudet som angitt i modellens inndata direkte. En konsekvens av dette er at man ikke kan spesifisere takster etter driftsform. Dersom det finnes to konkurrerende driftsformer (for eksempel buss og trikk) mellom to grunnkretser, gir modellen bare anledning til å angi en felles takst, fordi det kun er ett takstsystem mellom hver grunnkrets.

Rutevalget i modellen påvirker heller ikke takstnivået direkte, for eksempel gjennom at man velger en litt lenger reisevei for å spare inn billettkostnader. Dette skyldes at nettutleggingen i modellen (som beregner optimale rutevalg mellom to soner) gjøres uavhengig av de monetære kostnadene ved rutene, men bestemmes kun av reisetidsforholdet¹⁴. Dette er en fornuftig tilnærming dersom man ikke har vesentlige innslag av konkurrerende tilbud, som trolig vil være hovedregelen snarere enn unntaket i større byområder med en større kollektivoperatør. På lengre reiser (som ikke bare dekkes av RTM), vil dette kunne gi utslag i hvilke konkrete ruter/selskaper man velger, for eksempel valget mellom ekspressbuss og tog.

¹⁴ Her forstått som vektet reisetid, som sum av tilbringer-, vente-, bytte- og ombordtid.

Det er heller ikke mulig å knytte konkrete priser til en gitt avgang¹⁵. Et slikt tiltak kan være aktuelt dersom man har veldig spisse rushtidstopper som treffer konkrete avganger, eller om man ønsker å styre reisene dynamisk ut fra fyllingsgrad for å optimalisere kapasitetsutnyttelsen. Dette har imidlertid sammenheng med at RTM benytter frekvensbasert nettutlegging, der man ikke betrakter individuelle avganger, men det samlede antallet. Modellering av individuelle avganger vil normalt kreve en rute-tabellsbasert modell som Trenklin (Ranheim, 2017).

3.8.5 Hva er mulighetene for videreutvikling av RTM-systemet?

Rent strukturelt, knyttes flere av begrensningene i modellen til at man ikke kan definere mer enn én takstzone og takstnummer per grunnkretsrelasjon. En utvidelse av hvordan koblingen mellom grunnkrets, takstzone og takstnummer foregår, vil kunne gi muligheter for at modellen kan utføre flere typer analyser.

Det finnes allerede metodikk for å håndtere sone- og avstandsbaserte takstsystemer, om enn på et noe grovkornet nivå, og vi fokuserer dermed på de øvrige elementene som tidsdifferensiering av priser, samt mulighet til å skille på driftsform og nye rabatt- og billettordninger. Vi skiller mellom (i) produksjon av LOS-data og (ii) effekter på etterspørsel. Generelt sett kan man produsere nødvendige LOS-data for en del tiltak med mindre endringer i dagens modellstruktur. Det virker imidlertid sannsynlig at større endringer må til for å kunne beregne etterspørselseffekter av tiltakene, basert på de genererte LOS-dataene.

Tidsdifferensiering av priser

I dagens modell angis det et takstnummer per takstsonerelasjon som så benyttes til å beregne en pris som er lik for alle perioder. En mulighet er å utvide, slik at hver takstsonerelasjon kan ha et separat takstnummer i rush og lav, som angitt i figuren under. Her angir man bare et takstnummer for rush og et for lav (venstre), med tilhørende utvidelse av taksttabellen (høyre). Et slik grep vil nyttiggjøre seg av den etablerte arbeidslogikken og gi mulighet til å fylle matrisene som allerede beregnes med separate tall for hver tidsperiode.

Fra	Til	Takst		Takst	Enkeltbillett	Månedskort
		Lav	Rush			
	1	1	100	150	100	kr 38 kr 814
	1	2	200	250	200	kr 64 kr 1 443
	1	3	200	250	300	kr 89 kr 2 074
	2	1	200	250	150	kr 49 kr 1 058
	2	2	100	150	250	kr 83 kr 1 876
	2	3	300	350	350	kr 116 kr 2 696
	3	1	200	250		
	3	2	300	350		
	3	3	100	150		

Figur 3.27: Eksempel på hvordan man kan utvide taksttabellene til å beregne tidsdifferensierte priser.

I RTM vektet LoS-data fra ulike tidsperioder sammen basert på et sett av andeler som representerer antagelser om hvor stor andel av turene som går i ulike perioder av døgnet, som bidrar til å dimensjonere nivået på den samlede reiseaktiviteten (antall turer). Fordelingen av reiser mellom tidsperioder i modellen, gjøres imidlertid via et fast sett av andeler, slik at endringer i LoS-data ikke gir forskyvning av

¹⁵ NSB kjørte f.eks. såkalte «grønne avganger» på tog på starten av 2000-tallet for en mer effektiv kapasitetsutnyttelse.

reisetidspunkt i modellen. Det finnes empirisk belegg for at prisdifferensiering påvirker valg av reisetidspunkt (se. f.eks. Haraldsen and Eriksson (2020)).

En fullstendig modellering av tidsdifferensierte priser, fordrer at man har en fungerende modell for valg av reisetidspunkt, i tillegg til rutiner for generering av tidsdifferensierte LoS-data, hvor kun det sistnevnte er relativt enkelt å implementere i modellen på kort sikt.

Mulighet for å skille på driftsform

I dagens RTM-versjon er det ikke mulig å skille på driftsform eksplisitt i beregningen av takst for alle takstsystemene som er implementert. Det finnes et delvis grunnlag for å gjøre dette, men kun for avstandsbasert takst. I LOS-data-beregningen for kollektiv, beregnes avstand om bord fordelt på driftsart. Denne informasjonen kan sammenkobles med taksttabellene slik at man benytter en separat avstandsmatrise per driftsart. Dette fordrer altså at man utvider taksttabellene til å kunne spesifisere ulike takster per driftsart. I praksis betyr dette at man har flere takstnummer per takstsonerelasjon, eller lignende.

Fra	Til	Takst Lav		Enkeltbillett				Månedskort												
		Takst buss	Takst Tbane	Takst	Minimum	Maksimum	Konstant	Per km	Minimum	Maksimum	Konstant	Per km								
1	1	100	150	100	kr	25	kr	300	kr	25	kr	2	kr	700	kr	1250	kr	700	kr	20
1	2	100	150	150	kr	31	kr	375	kr	31	kr	2	kr	875	kr	1563	kr	875	kr	25
1	3	100	150																	
2	1	100	150																	
2	2	100	150																	
2	3	100	150																	
3	1	100	150																	
3	2	100	150																	
3	3	100	150																	

Figur 3.28: Eksempel på taksttabeller spesifisert for ulike driftsarter.

For sonebaserte systemer finnes det ikke en direkte mulighet til å beregne separate takster ut fra driftsart, fordi modellen ikke produserer matriser med antall takstsoner i selve nettutleggingen. En slik operasjon vil være nødvendig for å kunne separere etter driftsform i et sonebasert system. Cube inneholder programrutiner, der man kan definere egne takstsystemer i programmet og knytte ulike linjer opp til dette. Det er videre mulig å benytte takst som en parameter som påvirker rutevalget. Deretter kan programmet beregne den totale taksten mellom et gitt sonepar, basert på regler for overgang mellom takstsystemer og takster mellom dem. I en eventuell videre utvikling, kan man vurdere å benytte denne metodikken.

Innføring av takster differensiert på driftsart vil påvirke den samlede etterspørselen etter kollektivturer i modellen, fordi den gjennomsnittlige kostnaden ved å benytte kollektivtrafikk vil beregnes ut fra hvordan trafikantene fordeler seg utover alternativene. Som med tidsdifferensierte priser, vil ikke tiltaket gi noe forskyvning av reisetidspunkt i modellen, da fordelingen til tidsperiodene er statisk. Videre vil ikke økning i takst på en driftsform gi overføring til andre driftsformer i modellen, fordi rutevalget ikke påvirkes av takstene. Dette vil redusere gyldigheten av resultatene, da gjennomsnittstaksten vil kunne overestimeres. Den faktiske overføringen mellom driftsformer vil avhenge av konkurranseflatene mellom dem.

Differensiering av takstnivå vil som nevnt ikke gi effekter på valg av driftsform eller rute i dagens modell. Dette skyldes at rutevalget ikke tar hensyn til differensiert takst på ulike driftsformer. I Cube er det imidlertid mulig å ta inn takstene i rutevalget, som blant annet fordrer at man spesifiserer egne tidsverdier

per driftsart¹⁶. Dette er nødvendig for å sammenstille tids- og monetære kostnader på samme enhet i beregningen, noe som vil kreve ytterligere parametere i modellen.

Det er imidlertid viktig å understreke at dersom man velger strategien om å utvide dagens arbeidslogikk for beregning av takster, vil man nødvendigvis lage stadig mer kompliserte tabeller. Dersom man f.eks. ønsker 3 tidsperioder og 4 driftsarter, vil dette forandre totalt 12 rader som må fylles ut og vedlikeholdes av brukeren, mot 1 rad i dagens modell.

Medlemskaps- og rabattordninger

Medlemskaps- eller rabattordninger innebærer eksempelvis at man betaler en fast sum for å få et fast avslag/rabatt på prisen per reise (medlemskap) eller at man får større rabatt jo mer man reiser (rabattordninger).

Dagens RTM-modell beregner billettprisene uavhengig av antall reiser (frekvens) hva gjelder LOS-data. I selve etterspørselsmodellen, beregnes det imidlertid en sannsynlighet for periodekortinnhav, som en funksjon av billettprisen med følgende nyttefunksjon:

$$U_{\text{kort}} = \ln[\exp(\text{UCD}) + \exp(\text{UCP}) + \exp(\text{UPTC}) + \exp(\text{UBK}) + \exp(\text{UWK})] + \beta \cdot \text{mndkortpris}/21 + \text{andre variable} + \text{konstantledd}$$

Figur 3.29: Faksimile fra Rekdal m.fl. (2021).

Her divideres månedskortprisen (som estimeres i Cube) på 21, som tilsvarer et gjennomsnittlig antall tur-retur reiser for en person som gjennomfører 1,05 reiser pr yrkesdøgn (YDT).

En mulig vurdering er dermed å la beregningen av LOS-data forbli uendret i Cube, og endre selve etterspørselsmodellen. Dersom man øker antall reiser per månedskort, vil dette være ekvivalent med å skalere estimeringsparameteren, beta, med en gitt verdi. En slik tilnærming krever imidlertid grundigere gjennomgang, da konsistens med den statistiske estimeringen må vurderes. Dette vil også kreve at man innhenter antall reiser per person (f.eks. antall kollektivreiser per bosatte), som kan kreve en omprogrammering av modellen og er noe som må vurderes videre.

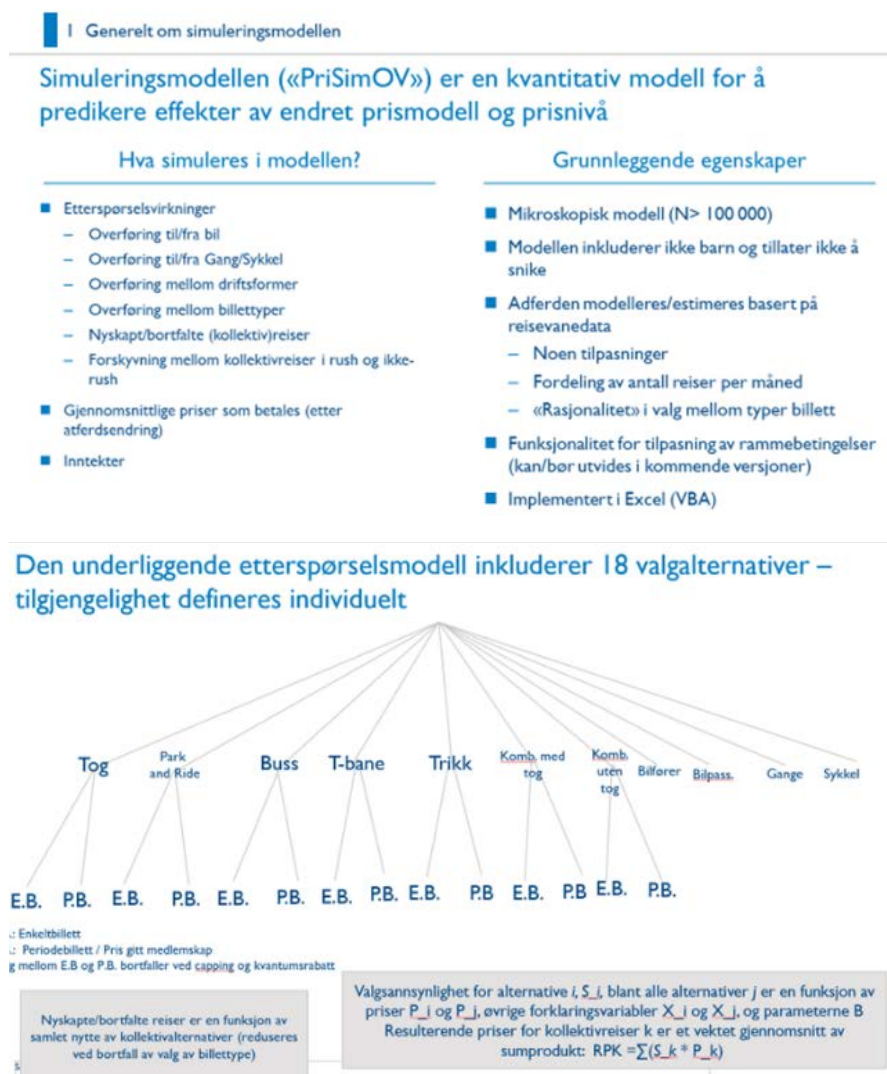
3.8.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Behovet for en detaljert modellering av billettyper i en transportmodell vil være sterkt nytt til anvendelsesområdet til modellen.

¹⁶ I Cube må man angi en «faktorfil» som inneholder parametere til nettutleggingen. Her kan man også definere hvilke takstsystemer i Cube («FARESYSTEM») hver enkelt driftsform («MODE») tilhører, samt en tidsverdi. Videre kan man sette opsjonen «FARE=T» i selve nettutleggingen for å instruere programmet til å vurdere takstene ved valg av rute. I dagens modell, er de ikke-monetære kostnadene som vente-, om bord- og byttetid (m. fl.) inkludert i kostnaden ved å benytte en rute. Dersom man kjører nettutlegging med takst, skaleres disse verdiene med vekt og en tidsverdi, slik at de kommer på samme enhet som takstene. Deretter kjøres en tilsvarende rutevurdering som i dagens modell, men med en annet kostnadsmodell knyttet til hvert alternativ.

Det er to sider som berører valget mellom driftsform. Først ser programmet på om rutene er interessant å benytte og deretter fordeles passasjerene over dem. Dette er to separate beregningssteg og ideelt sett bør begge kunne ta innover seg takstene.

PriSimOV (ADL/TØI, 2021) er en etterspørselsmodell som ble spesielt utviklet med tanke på å kunne simulere effekter av endrete billettyper og prisnivåer i Oslo og Viken. PriSimOV er estimert basert på et samlet datagrunnlag fra RVU (for Oslo og Viken) og RuterMIS (Oslo og Akershus).



Figur 3.30: Infoark om PriSimOV.

PriSimOV kan håndtere ulike segmenteringer og har blitt brukt å studere følgende prismodeller (se vedlegg i ADL/TØI 2021):

- Forenklet sone med periodebillett
- Storsone med periodebillett og påslag for tog/ekspress
- Storsone med capping, påslag for tog/ekspress og rushtidsdifferensiering
- Personlig sone med periodebillett og ingen honnør i rush
- Personlig sone med medlemskap og ulik pris i rush
- Avstandsbasert modell med kvantumsrabatt
- Avstandsbasert modell med kvantumsrabatt og gradvis tidsdifferensiering
- Avstandsbasert modell med medlemskap
- Tidsbasert modell med medlemskap og påslag for tog/ekspress
- Tidsbasert modell med medlemskap, påslag for tog/ekspress og gradvis tidsdifferensiering

I Trenklin er billettprisene forenklet behandlet (via faste prismatriser) og det er rom for forbedringer/ videreutvikling hvis man vil bruke senere versjoner av Trenklin for å studere effekter av prisendringer.

Merk at Trenklin – i motsetning til PriSimOV – ikke er agent-basert og den inneholder i utgangspunktet ingen bakgrunnsvariabler om de reisende.

For effektberegning av tidsdifferensierte priser er dynamiske modeller prinsipielt foretrukket (se også diskusjon under avsnitt om fleksible bompenger). Her har Trenklin noen fordeler sammenlignet med RTM siden valg av avgang er en integrert del av modellen. Ved videreutvikling kunne man etterstrebe å beregne effekter på valg av avgang gitt tidsdifferensierte priser.

En annen modell som virker å kunne håndtere billettpriser er ADA. I dokumentasjonen står det at «Reisekost1 inneholder kostnader på relasjonsnivå, Reisekost2 inneholder distanseavhengige kostnader» (Homleid et al., 2022). Siden ADA er en disaggregert etterspørselsmodell (lignende PriSimOV) har modellen forutsetninger for å håndtere ulike rabattordninger og takstsystemer.

3.8.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

Som diskutert i de foregående avsnittene finnes det ulike («norske») modeller som kan anvendes for å studere mulige effekter av endrede takstsystemer for kollektivtransport. Behov for videreutvikling bør knyttes til spesifikke prognoseformål. Mange modeller kan trolig tilpasses ad-hoc ved manipulering av kostnadsattributter. Datakravet er forholdsvis lite, og det finnes tilstrekkelig empiriske funn rundt prispfølsomheter og priselastisiteter som kan brukes for en forsvarlig modellering også uten en re-estimering av modellene.

3.9 Framkommelighet for (super)buss

3.9.1 Hva går tiltaket ut på?

Tiltaket "Framkommelighet for superbuss" refererer her i hovedsak til evnen til superbuss-systemer, også kjent som BRT (Bus Rapid Transit), til å levere rask, pålitelig og effektiv offentlig transport. Disse systemene er designet for å kombinere kapasiteten og hastigheten til et lettbanesystem med fleksibiliteten til et bussystem. Superbusser kjører ofte i dedikerte kjørefelt for å unngå kø og kan ha prioritet ved trafikklys, noe som forbedrer reisehastigheten og reduserer forsinkelser. Viktige konsepter inkluderer dedikerte kjørefelt, busstasjoner med høy plattform for rask påstigning og avstigning og billett-systemer som tillater forhåndsbetaling.

Konseptet «superbuss» kan også forstås som et resultat av å gi vanlige busser dedikert tilgang til kjørefelt, dvs. filer i veinettverk, såkalte kollektivfelt. En konsekvens av å forbeholde egne kjørefelt for busser er at øvrige kjøretøy (typisk med unntak av taxi som tillates i kollektivfeltet) får redusert veikapasitet og muligens økt reisetid.

Framkommelighet målt i reisetid beregnes i transportmodellering nettverksmodellering. Nettverksmodellen omfatter både de fysiske og operasjonelle egenskapene til transportnettverket og en trafikkflytmodell. Trafikkflytmodeller simulerer hvordan trafikken beveger seg gjennom nettverket. Som diskutert i avsnitt 3.10 finnes det ulike tilnærminger, fra statiske avviklingsmodeller som bruker matematiske funksjoner til å beregne forsinkelser, til komplekse mikrosimuleringsmodeller som tar hensyn til individuelle kjøretøy og deres interaksjoner.

Framkommelighet vil variere over døgnet og forsinkelser vil i virkeligheten variere fra avgang til avgang. Statiske og aggregerte modeller er egnet for gjennomsnittsberegninger, men vil ikke kunne gjenspeile variasjon på avgangsnivå med forhåndsbestemte tidsperioder. Modellering på avgangsnivå kan være ønskelig for noen typer analyser, men er ikke satt som krav i definisjonen under.

For kartlegging under, definerer vi «Framkommelighet (super)buss» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Reisetiden for busser avhenger av trafikkavviklingen på ruten
- 2) Mulighet for å modellere at busser får tilgang til dedikerte filer i veinettet (super-buss)

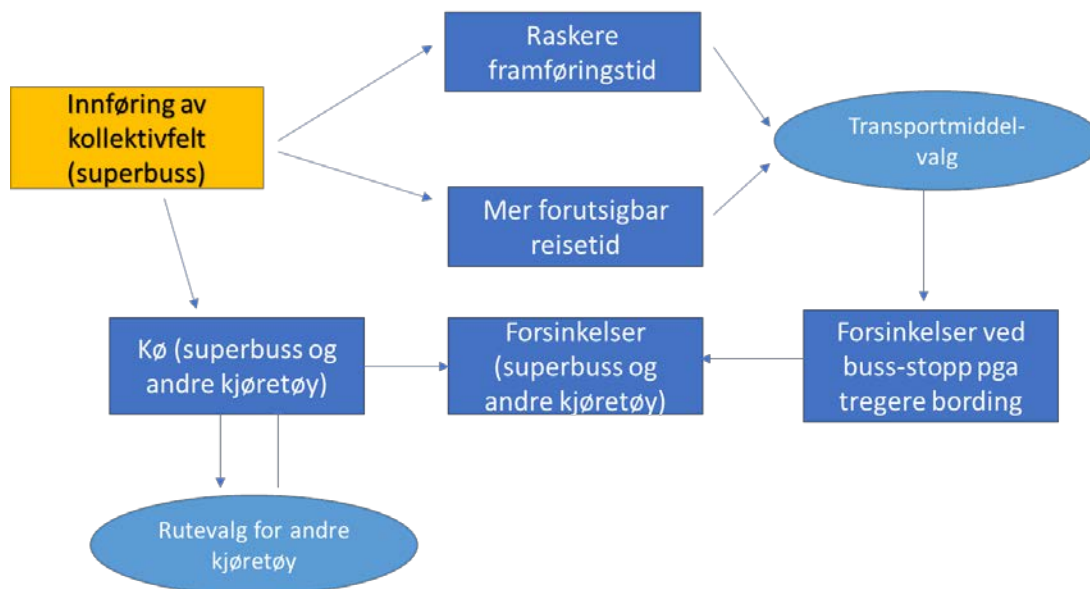
3.9.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

På etterspørselssiden vil effekter av bedre framkommelighet for (super)buss påvirke transportmiddelvalget pga. raskere framføringstid og mer forutsigbar reisetid («pålitelighet»).



Figur 3.31: Sentrale virkninger av framkommelighet superbuss på etterspørselssiden.

På avviklingssiden vil man ofte være interessert i effekter som følge av å gjøre om bilfelt til kollektivfelt, som forutsetning for «superbusser». Ved siden av etterspørselseffekter som illustrert i figur 3.31, vil endret veikapasitet påvirke kønivå og forsinkelser for buss (mindre forsinkelser pga. økt veikapasitet) og andre kjøretøy (mer forsinkelser pga. redusert vegkapasitet). En annen mulig effekt er at økt etterspørsel etter busstransport kan føre til økte forsinkelser ved holdeplasser siden flere passasjer vil øke tiden for av- og påstigning.



Figur 3.32: Sentrale virkninger av framkommelighet superbuss på trafikkavviklingssiden.

3.9.3 Hvilke data trengs?

Dataene som trengs for dette tiltaket er relatert til nettverkskoding. Etter koding av kollektivfelt i nettverket kan det beregnes nye ruter og reisetider. I statiske modeller vil reisetiden beregnes basert på volume-delay-funksjoner (VDF). Det er mulig at eksisterende VDF funksjoner fungerer bra også for super-

busser, evt. kan det være ønskelig med empiriske data som kan brukes til kalibrering av nye VDF-funksjoner.

I mikroskopiske avviklingsmodeller er det også nødvendig å angi bussenes lengde og muligens andre spesifikasjoner som akselerasjon og linjeføring.

3.9.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensingene?

I RTM håndteres busser noe ulikt i etterspørselsmodellen og i avviklingsmodellen.

I etterspørselsmodellen, TraMod_by inngår buss (og evt. superbusser) i et felles valgalternativ «kollektivtransport». I avviklingsmodellen legges kollektivbruken på ulike drivsformer basert på generaliserte reisekostnader.

Det er mulig å manipulere nettverket slik at enkelte lenker kun er tillatt for gitte driftsformer. Det er dermed mulig å fange opp tiltak som superbusser. Etter vår kjennskap har man ikke beregnet reisetiden til kollektivtransport/superbusser endogent (kapasitetsavhengig) men ved manipulasjon av rutetider.

3.9.5 Hva er mulighetene for videreutvikling av RTM-systemet?

For å bedre modellere framkommeligheten til busser kan det være interessant å prøve å beregne reisetiden kapasitetsavhengig og gjennom flere iterasjoner. I så fall kan de være ønskelig med en ny og spesialtilpasset kalibrering av VDF-funksjonene. Behovet er litt vanskelig å bedømme uten å ha jobbet empirisk med dette, og behovet er trolig høyere for vanlige busser som står mye i kø sammenlignet med superbusser som får dedikerte kjørefelt.

Når det gjelder etterspørselseffekter kan en langsiktig videreutvikling av RTM ligge i at man skiller mellom driftsformer i TraMod_by. MPM23 modellen (Flügel S. et al., 2015; Flügel S. & Jordbakke G.N., 2017) og den beslektede modellen PriSimOV (ADL/TØI, 2021), samt ADA modellen (Homleid et al., 2022) er etterspørselsmodeller som skiller mellom ulike driftsformer, noe som kan være en fordel når man vil fange opp konkurranse på tvers av driftsformer innad i transportmiddelvalgmodellen. De nevnte modellene er derimot lite aktuelle for tiltaket «framkommelighet for superbuss» siden de ikke tillater endogen beregning av reisetider i en nettverksmodell.

3.9.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

Framkommelighet for superbuss er trolig best modellert med mikroskopiske avviklingsmodeller (se avsnitt 3.10). For å analysere et større byområde kan det være nødvendig å bruke mesoskopiske modeller for å unngå lange beregningstider, og for å åpne opp muligheten for å inkludere endogene etterspørselseffekter (se neste avsnitt).

3.9.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles til å fange opp tiltakene på en god måte?

For å simulere et bussystem i MATSim, må man først skaffe GTFS-filer som inneholder all nødvendig informasjon om bussruter, stoppesteder, timeplaner osv. EnTur tilbyr slike data. Deretter etablerer man en MATSim-nettverksfil som representerer transportinfrastrukturen i studieområdet. Dette kan gjøres ved å konvertere enten et CUBE-nettverk eller nedlastet vegnett fra OpenStreetMap. Verktøy som GTFS2TransitSchedule brukes for å konvertere GTFS-data til MATSim-kompatible transittplaner. Dette trinnet innebærer å kartlegge bussrutene og stoppene fra GTFS til MATSim-nettverket og tegne opp offentlige transportlinjer sammen med simuleringens øvrige veinett. I MATSim er hver nettverkslenke spesifisert med parameteren «allowedModes». Den angir hvilke transportmidler/driftsformer som kan

benytte seg av lenken. Hvis enkelte kjørefelt er forbeholdt kollektivtransport (f.eks. superbuss) må man lage parallelle lenker og angi hvilke reisemidler som er tillatt på de separate lenkene(filene).

3.10 Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling

3.10.1 Hva går tiltaket ut på?

Temaområde «mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling» involverer prinsipper og metoder som kan være vanskelig å skille fra hverandre. For diskusjonen er det hensiktsmessig å skille mellom modellering av rutevalg og modellering av trafikkflyt. Inntil bilene kjører full-autonome kan rutevalget tenkes å være en del av menneskelig adferd og beslutningsmekanismer, mens trafikkflyt kan tenkes å være en fysisk prosess i all hovedsak. Det er også menneskelig adferd utover rutevalget som påvirker trafikkflyten, som gap-acceptance (avstand mellom bilene), skifte felt osv. Slike detaljerte mekanismer av kjøreadferd kan være veldig vanskelig/ressurskrevende å modellere på bynivå og i større transportmodeller/områder. Vi legger derfor ikke mye vekt på disse elementene i denne rapporten.

Tabell 3.4 prøver å systematisere mulige kombinasjoner av rutevalg og trafikkflyt (tregnsel i Trenklin). I den videre diskusjonen begrenser vi oss til de grønn-markerte kombinasjonene av rutevalg og trafikkflyt-modellering kalt «mikroskopisk og dynamisk trafikkavvikling». Det er en modell som:

- fordeler kjøretøyene på lenkene ved å eksplisitt ta hensyn til tidsdimensjonen (fanger opp tidsmessige avhengigheter)
- predikerer veivalg for hvert enkelt kjøretøy
- predikerer bevegelse av det enkelte kjøretøy eller – i tilfelle av mesoskopisk trafikkflyt – kjøretøygrupper

Se avsnitt 1.4 for kortdefinisjoner av enkelte elementer i tabell 3.4.

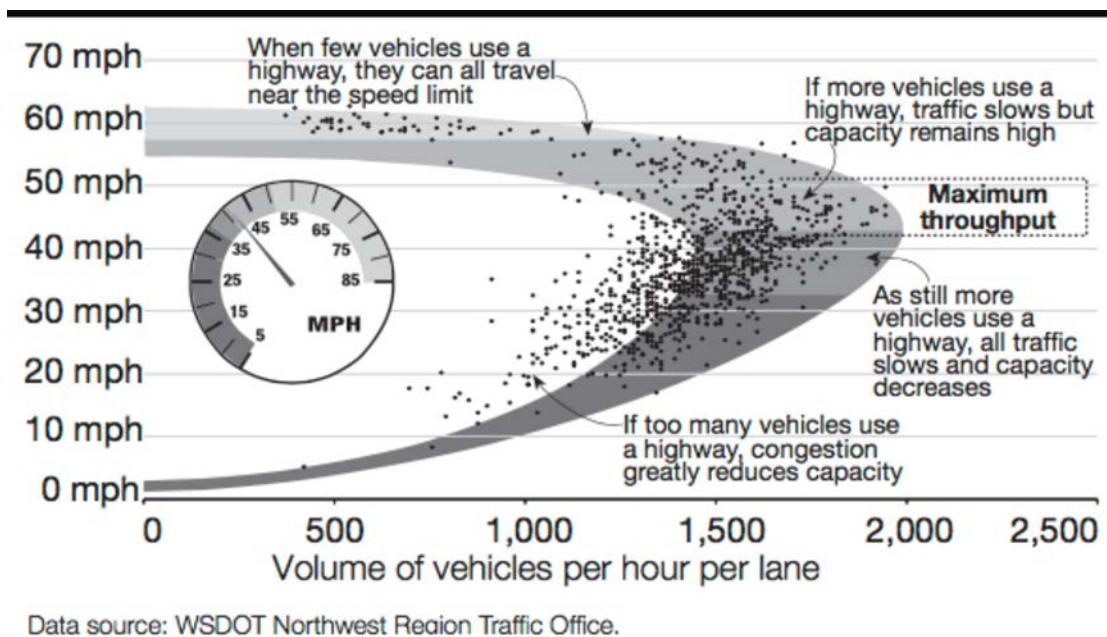
Tabell 3.4: Sammensetning av "mikroskopisk og dynamisk trafikkavvikling".

	Trafikkflyt (tregnsel)			
Rutevalg	Macro./statisk	Macro./dynamisk	Mesoskopisk/dynamisk	Mikroskopisk/dynamisk
Makroskopisk/statisk	Dagens RTM			
Makroskopisk/dynamisk		Trenklin		
Mikroskopisk/dynamisk			«mikroskopisk og dynamisk trafikkavvikling»	

Vi fokuserer på avvikling av biltrafikk, men poengterer at diskusjonen delvis kan overføres til modellering av tregnsel om bord i kollektivtransport. Trenklin-modellen er tatt med i Tabell 3.4 som et eksempel på dette. Trenklin er makroskopisk og dynamisk (minutt-for-minutt), og inkluderer valg av avgang og beregning av tregnsel om bord på tog.

Et mål med en mer realistisk modellering av trafikkflyt er å gjenskape det såkalte fundamentale diagrammet for trafikkflyt. Dette beskriver sammenhengen mellom gjennomsnittlig hastighet på en veilenke og antall kjøretøy som passerer veilenken. Som illustrert i figur 3.33, finnes det et maksimalt antall kjøretøy som kan passere en vei/kjørefelt i et gitt tidsvindu. Dette kaller man også for veiens (maksimale) kapasitet, og det er fysisk umulig å overstige denne kapasiteten (med en antakelse om gitt teknologi). Når flere biler benytter lenken vil både hastigheten og trafikkflyten reduseres.

Makroskopiske og statiske modeller bygger på matematiske programmer og har vanskeligheter med å gjenskape denne sammenhengen siden det ikke finnes funksjoner som kan entydig matematisk beskrive hastigheten som funksjon av trafikkflyt. Dette er videre beskrevet i avsnitt 3.10.4.



Kilde: <https://www.saveoakhill.org/wp-content/uploads/2015/07/speedflow.png>

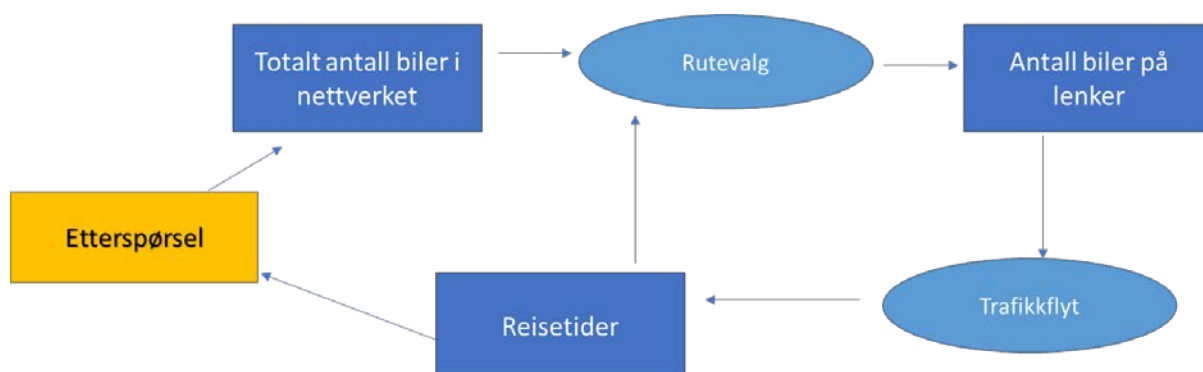
Figur 3.33: Illustrasjon av sammenheng mellom hastighet og trafikkflyt.

For kartlegging under, definerer vi «Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling» som et modelleringsgrep som – i det minste – inkluderer følgende elementer:

- 1) Mikroskopisk og dynamisk rutevalg
- 2) Mesoskopisk (hvis mulig: mikroskopisk) trafikkflyt
- 3) Dynamisk modellering av romlig utbredelse av køer

3.10.2 Hvilke adferdsdimensjoner og mekanismer er det viktig å fange opp?

Som for de øvrige tiltakene illustrerer vi sentrale mekanismer på etterspørselssiden og trafikkavviklingssiden. Siden dette tiltaket fundamentalt er en (del av) trafikkavviklingssiden må tolkningen av figurene tilpasses noe. Figur 3.34 viser noen sentrale mekanismer mellom trafikkavvikling og etterspørsel, mens figur 3.35 gir en oversikt over noen elementer og metoder innenfor trafikkavvikling.

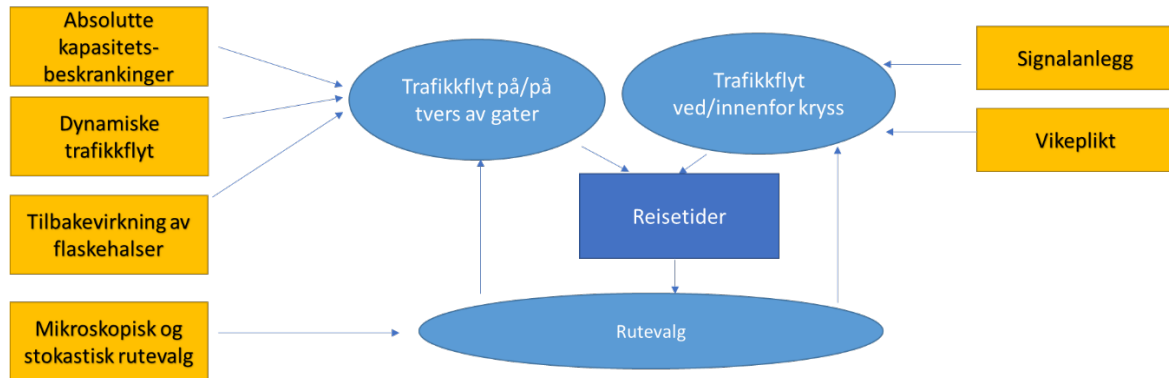


Figur 3.34: Sentrale virkemåte mellom trafikkavvikling og etterspørsel.

Figur 3.34 indikerer et det er typisk to likevekter i et transportmodellsystem. Én likevekt mellom der etterspørselen predikerer antall kjørende biler i nettverket gitt reisetiden, og reisetiden er gitt av antall

biler i nettverket. Den andre likevekten finnes i rutevalget, der antall biler på lenkene predikeres gitt reisetiden og reisetiden er gitt av antall biler på lenkene.

Figur 3.35 viser videre hvordan ulike elementer i modelleringen (gule bokser) inngår i trafikkflytmodellering og rutevalgmodelleringen. I mesoskopiske transportmodeller vil trafikksimuleringen ved/innenfor kryss ofte være forenklet eller ignorert. I så fall ser man typisk bort fra å modellere signalanlegg, vikeplikt og andre elementer knyttet til kjøreadferd i kryss.



Figur 3.35: Sentrale metoder/mekanismer innenfor mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling (for en gitt etterspørsel totalt).

3.10.3 Hvilke data trengs?

Trafikkavviklingsmodeller har følgende inndata

- Transportnettverk (lenker og noder)
- Signalanlegg (for mikrosimulering)
- Lenkeegenskaper (evt. egenskaper til noder)
- Adferdsparametre i rutevalgsmoellen
- Parametere som beskriver matematiske sammenhenger i trafikkflytmodeller
- Etterspørselsdata

For dynamisk trafikkavvikling trenger man en datastruktur for etterspørsel som inneholder informasjon om tid (tidsperioden eller klokkeslett).

For mikroskopisk trafikkavvikling trenger man disaggregert informasjon om transportetterspørsel for enkeltpersoner (agenter).

En datastruktur som ivaretar begge kravene er agent-baserte reiseplaner eller aktivitetsplaner. Et eksempel fra MATSim-modellen er gitt under.

```
<person id="868588">
  <plan selected="yes">
    <activity type="home" x="304759.207667" y="6665262.54157" end_time="07:11:19" >
    </activity>
    <leg mode="car">
    </leg>
    <activity type="work" x="282776.49084" y="6674655.38643" end_time="16:41:53" >
    </activity>
    <leg mode="car">
    </leg>
    <activity type="services" x="303190.206256" y="6666369.96076" end_time="18:41:59" >
    </activity>
    <leg mode="car">
    </leg>
    <activity type="home" x="304759.930025" y="6665248.76763" end_time="19:18:10" >
    </activity>
    <leg mode="walk">
    </leg>
    <activity type="recreational" x="304822.50504" y="6664531.21995" end_time="20:42:16" >
    </activity>
    <leg mode="walk">
    </leg>
    <activity type="home" x="304759.207667" y="6665262.54157" >
    </activity>
  </plan>
</person>
```

Figur 3.36: Et eksempel fra en aktivitetsplan med tidsinformasjon fra en agent-basert modell (MATSim).

Når det gjelder nettverksinformasjon (lenkeegenskaper) så trengs dynamiske trafikkflytmodeller som gjensker det fundamentale diagram (Figur 3.33) med informasjon om friflythastighet og en kapasitetsparameter som angir maksimalt antall biler som kan passere lenken.

3.10.4 Hvordan håndteres tiltaket eller lignende tiltak i dagens RTM og hva er begrensningene?

I RTM-systemet bruker man Cube Voyager for trafikkavvikling. Verktøyet er verken dynamisk eller mikroskopisk. Reisetiden på købelastede lenker beregnes ved hjelp av Volume-Delay-funksjoner basert på aggregerte tall (antall kjøretøy) innenfor en stasjonær tidsperiode.

3.10.5 Hva er mulighetene for videreutvikling av RTM-systemet?

For visse anvendelser som krever mer detaljert og dynamisk trafikkavvikling enn det er mulig med dagens løsning (Cube Voyager), kan RTM kobles mot eksterne verktøy.

Kobling mot RTM og Aimsun er beskrevet i Høyem et al. (2020). Et verktøy som kan lese inn OD-matriser fra RTM i MATSim er beskrevet i Flügel et al. (2023).

Det virker ikke hensiktsmessig å implementere en dynamisk og mikroskopisk modell som integrert del av RTM-systemet. Hovedgrunnen er at mange analysebehov som dekkes av RTM ikke krever detaljeringsgraden som mikroskopiske eller mesoskopiske modeller gir.

Det er også viktig å anerkjenne at datastrukturen som kommer ut fra TraMod_by ikke er direkte kompatibel med mikroskopisk og dynamisk trafikkavvikling. En integrasjon vil kreve at man deler opp OD-matriser fra TraMod_by i rom og tid. Som beskrevet i Flügel et al. (2021) kan utfordringen ved at etterspørselsmodellen og trafikksimuleringsmodellen ikke «snakker godt sammen» (pga. ulik metodikk/datastruktur) unngås i agent-baserte simuleringsmodeller som bruker en integrert og dynamisk etterspørselsmodell (se neste avsnitt).

3.10.6 Hvilke andre metoder/modeller kan brukes/utvikles for å analysere tiltaket?

I diskusjonen om hvilke metoder og modeller som kan egne seg er det viktig å skille mellom strategiske, taktiske eller operasjonelle prognoseformål.

For operasjonelle prognoseformål er man vanligvis interessert i detaljert trafikkavvikling i mindre områder, og en kort tidshorisont slik at etterspørselen kan antas konstant. I så fall er det naturlig å bruke mikroskopiske simuleringsmodeller som VISSIM eller AIMSUN mikro.

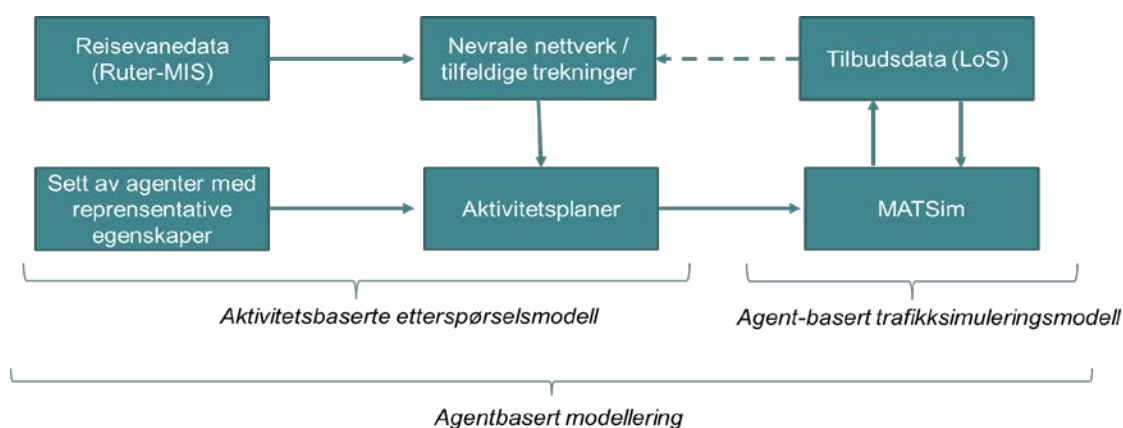
For taktiske analyseformål der deler av etterspørselen (transportmiddelvalg og avreisetidspunkt) beregnes endogent og man vil analysere større byområder, kan agent-baserte modeller være et godt alternativ. Det finnes agent-baserte trafikksimuleringsmodeller med både mikroskopisk og mesoskopisk trafikkavvikling, men for mange anvendelser er det tilstrekkelig med mesoskopiske tilnærminger. MATSim er et populært valg blant agent-baserte trafikksimuleringsmodeller.

For strategiske analyseformål (med endogen turgenerering og destinasjonsvalg) kan man bruke RTM med kobling til eksterne verktøy som Aimsun-meso. Et alternativ er state-of-the-art modeller som SimMobility (kalt M4 i avsnitt 2.4) som er gjennomgående agent-basert og inkluderer en (agent-basert) modell for arealbruk.

3.10.7 Hvordan kan andre modeller konkret anvendes/videreutvikles?

For analyse i byområder for taktiske analyseformål virker det hensiktsmessig å bruke MATSim som et rammeverk for modellering av mikroskopisk rutevalg og mesoskopisk trafikkflyt. En utfordring med å sette opp en MATSim modell er å skaffe representative etterspørselsdata i form av aktivitetsplaner. Aktivitetsplaner (vist i Figur 3.36) representerer reisebehovet for en agent, og alle aktivitetsplanene i modellen representerer etterspørselen etter persontransport.

I forbindelse med det pågående PRELONG prosjektet har det blitt skissert et nytt opplegg for hvordan aktivitetsplaner kan genereres basert på reisevanedata, nevrale nettverk (maskinlæring/ generativ KI) og registerbaserte data (befolkningsdata, pendlerstatistikk). Dette er dokumentert i Flügel et al. (2024) og en kort oversikt er vist i figur 3.37.



Figur 3.37: Mulig oppsett av MATSim-modell med dynamisk trafikkavvikling.

Noen av mekanismene i MATSim er nærmere beskrevet i neste kapittel.

4 Illustrasjon av noen tiltak i MATSim

I dette kapittelet viser vi hvordan noen av tiltakene som vi diskuterte i forrige kapittel kan fanges opp i MATSim. Vi gjør dette basert på et hypotetisk scenario med et veldig enkelt nettverk og fiktive og forenklede etterspørselsdata (reiseplaner). Valget om et stilisert case (framfor full implementering) er motivert av at det da er mye enklere å isolere og forstå effektene av de mekanismene man tester ut.

Vi implementerer tre mekanismer/tiltak. I avsnitt 4.2 ser vi på valg av avreisetidspunkt, avsnitt 4.3 handler om fleksible bompenger og i avsnitt 4.4 implementerer vi robotaxier. Før det, illustrerer avsnitt 4.1 forutsetningene som er lagt til grunn for vårt stiliserte case.

4.1 Oppsett for uttesting

4.1.1 Inndata for stilisert case

Figur 4.1 viser nettverket som brukes i denne MATSim-illustrasjonen.

En variabel som er sentral i simulering av kø er kapasitetsparameteren («capacity») som angir hvor mange biler som maksimalt kan passere en lenke i løpet av en time. Som man ser fra koden på venstre side av figur 4.1 er verdien satt til 1800 for alle lenker (i dette eksempelet består alle lenker kun av én fil).



Figur 4.1: Kode og illustrasjon av stilisert nettverk i MATSim.

Merk at alle lenkene i «rundkjøringen» (lenke 2, 4, 6 og 8) kun går i én retning (mot klokken).

Etterspørselsdata er som i et fullskala MATSim-scenario representert med reiseplaner for individuelle agenter. I vårt tilfelle bruker vi stiliserte reiseplaner som er karakterisert på følgende måte:

- 1 200 homogene agenter uten personkjennetegn
- Alle agenter har samme aktivitetsmønster: hjemme - arbeid – hjemme
- Lokasjon til hjemme og arbeidsplass er likt fordelt over alle 4 lenker i nettverket (21, 43, 65 og 87)
- Avstand til arbeidsplassen er lik for alle agenter (for eksempel jobber alle agenter som bor ved lenke «21» ved lenke «87» og alle som bor ved «87» jobber ved «65»). Dette innebærer at:
 - Reisen til arbeidsplassen er lengre (5 nettverkslenker) enn tilbake til hjemmet (3 lenker)
 - Den finnes kun ett (fornuftig) rutevalg per agent

- Agenter kan bare velge bil som transportmiddel (ingen modellering av transportmiddelvalg)
- I de opprinnelige reiseplanene reiser alle agenter til jobb kl 07:30:00 og aktivitetsvarigheten på jobben er spesifisert til 8 timer

Figur 4.2 viser eksempler på reiseplaner for to personer i MATSim.

```

</plans>
<person id="1">
  <plan>
    <act type="h" link="21" end_time="07:30" />
    <leg mode="car">
      <route> 1 2 4 6 8 </route>
    </leg>
    <act type="w" link="87" dur="08:00" />
    <leg mode="car">
      <route> 7 8 2 </route>
    </leg>
    <act type="h" link="21" />
  </plan>
</person>

[...]

<person id="1200">
  <plan>
    <act type="h" link="87" end_time="07:30" />
    <leg mode="car">
      <route> 7 8 2 4 6 </route>
    </leg>
    <act type="w" link="65" dur="08:00" />
    <leg mode="car">
      <route> 5 6 8 </route>
    </leg>
    <act type="h" link="87" />
  </plan>
</person>

</plans>

```

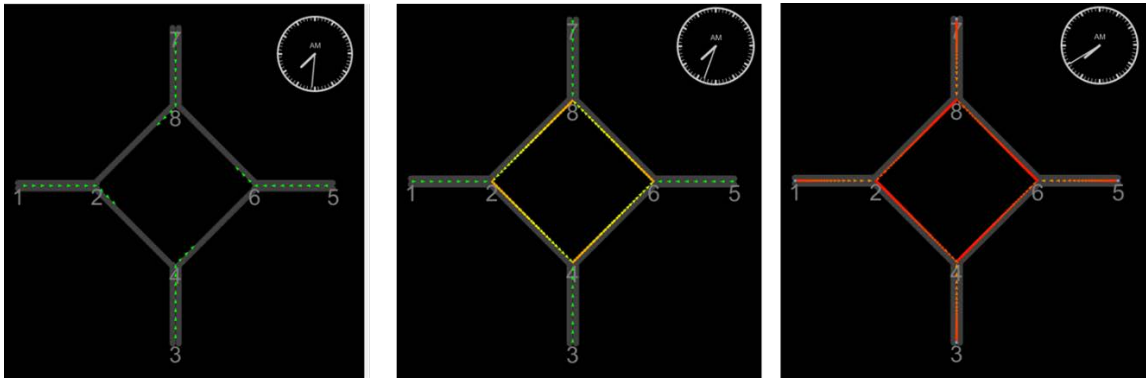
Figur 4.2: Utsnitt av hypotetiske reiseplaner fra plan.xml fil (første og siste agent).

4.1.2 Trafikksimulering uten adferdstilpasning

Ved første iterasjon («iterasjon 0») legges alle reiseplaner ut på nettverket, og agentene velger de rutene som tar kortest mulig tid. Som nevnt tidligere er det kun én meningsfull rute for hver reise i dette stiliserte caset.

Siden alle agenter reiser kl. 7:30 oppstår det fort kø i nettverket, og det er bare de aller første agentene i rekken som kommer frem til arbeidsplassen sin uten kø.

Simuleringsresultater for morgenrush er illustrert i figur 4.3. Røde biler har en redusert fart på minst 50%.

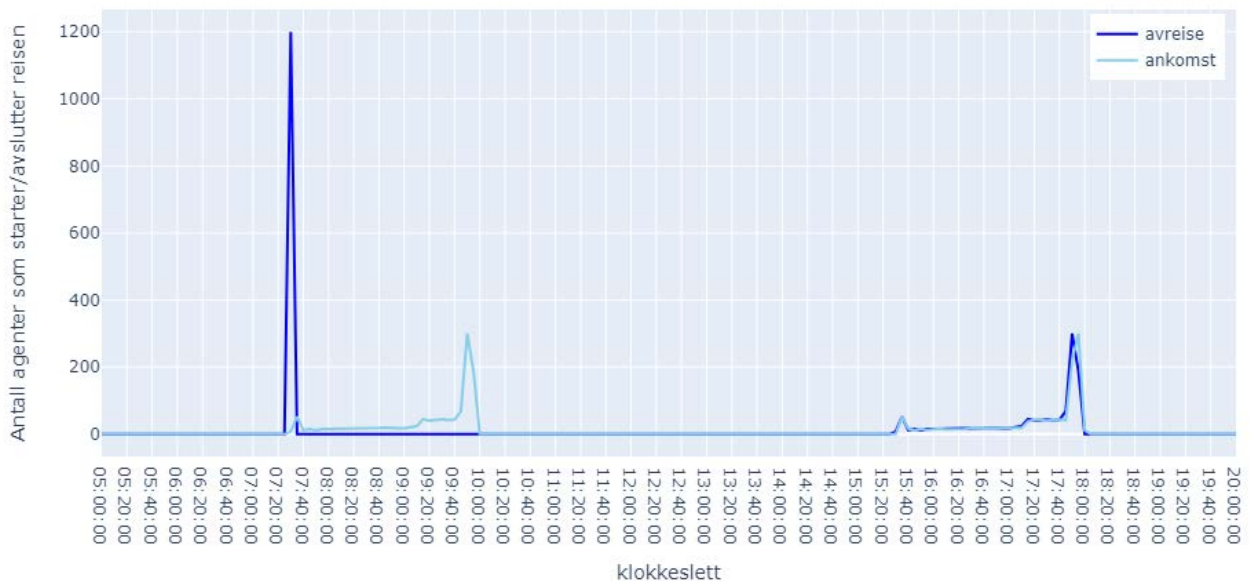


Figur 4.3: Illustrasjon av en trafikksimulering uten tilpasning av avreisetidspunkt med tanke på kø ved tidspunktene 7:31, 7:34 og 7:40.

Figur 4.4 viser fordeling av reisetidspunkt og ankomsttid for reiser til arbeidsplassen (på morgenen) og reiser tilbake til hjemmet (på ettermiddagen). Merk at tallverdien på y-aksen er antall agenter som starter/avslutter reisen sin innenfor et 5-minutters intervall. Dette er aggregert fra sekund-nivå i MATSim.

Fra figuren kan vi se at de fleste agentene står rundt 2 timer og 20 minutter i kø og ankommer jobben rundt kl. 9:50. Siden det er spesifisert i reiseplanene at agenter skal være på jobb i 8 timer, reiser de fleste agentene tilbake rundt kl. 17:50. Bare noen få agenter slipper unna køen i morgenrushet, og kan dra hjem rundt kl. 15:30.

Dette er naturligvis ikke et realistisk scenario og situasjonen er ikke i likevekt.



Figur 4.4: Avreisetidspunkt og ankomsttid uten tilpasning av avreisetidspunkt (iterasjon 0).

4.2 Valg av avreisetidspunkt

4.2.1 Modellering av avreisetidspunkt

Ved å aktivere strategimodulen «TimeAllocationMutator» kan agenter generere nye reiseplaner med alternative avreisetidspunktet. Det skjer døgn-for-døgn der et døgn tilsvarer en iterasjon. For å unngå at alle agentene endrer avreisetidspunktet sitt samtidig tillater vi kun at 10% av agentene endrer avreisetidspunkt per iterasjon. De øvrige 90% av agentene velger den reiseplanen som har høyest nytteverdi av

alle tilgjengelige reiseplaner (uten endret avreisetid). Maks antall reiseplaner en agent kan ha er satt fast til 5 i dette eksempelet (parameter: "maxAgentPlanMemorySize"), ved maksimalt antall alternative reiseplaner forkaster agentene den med lavest nytte når de genererer en ny plan.

Alternative avreisetidspunkter er tilfeldig valgt innenfor et forhåndsbestemt intervall. Parameterne som angir størrelsen på dette intervallet ("mutationRange") kan endres i konfigurasjonsfilen. Vi valgte her å beholde defaultverdien som er 1800 sekunder (=3 minutter). Merk at en agent over simuleringsforløpet (her 200 iterasjoner) kan tilpasse avreisetidspunkt flere ganger slik at endring i avreisetidspunkt kan bli betydelig større enn 3 minutter.

Agentene evaluerer reiseplaner som utført i simuleringen basert på nyttefunksjoner (også kalt «scoringsfunksjoner» i MATSim.) Disse funksjoner summerer opp nytten til alle aktiviteter og ulempen ved alle reiser på en hel dag (Horni et al 2016):

$$(1) U_{plan} = \sum_{q=0}^{N-1} U_{act,q} + \sum_{q=0}^{N-1} U_{trav,mode(q)}$$

Reise q er reisen som kommer etter aktivitet $q=[1, \dots, N]$. Merk at den første og siste aktiviteten (typisk «hjemme») er sammenslått. I vårt enkle eksempel er $N-1 = 2$ for alle agenter. Det vil si at nyttefunksjonen vil se slik ut: $U_{plan} = U_{act,hjem} + U_{trav,hjem} + U_{act,work} + U_{trav,work}$.

I vårt eksempel består $U_{act,q}$ av to komponenter (de 3 øvrige komponentene er deaktivert¹⁷), som angir nytten en agent får fra aktiviteter:

$$(2) U_{act,q} = U_{dur,q} + U_{late,q}$$

Der $U_{dur,q}$ er nytten en agent får fra å gjennomføre selve aktiviteten (se Tabell 4.1 for forklaring av variablene):

$$(3) U_{dur,q} = \beta_{dur} * t_{typ,q} * \ln \left(\frac{t_{dur,q}}{t_{0,q}} \right)$$

$t_{0,q}$ er varigheten der nytten av å utføre en aktivitet blir positiv. I vårt tilfelle¹⁸ er den antatt å være proporsjonal med typisk aktivitetstid $t_{typ,q}$.

$U_{late,q}$ er (negativ) nytte av å komme for sent til en aktivitet:

$$(4) U_{late,q} = \begin{cases} \beta_{late} * (t_{start,q} - t_{latest,q}) & \text{if } t_{start,q} > t_{latest,q} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

Dette gjelder i vårt eksempel bare for arbeidsreisen.

Nytten av en reise er i vårt enkle eksempel, uten transportmiddelvalg og rutevalg¹⁹, gitt som:

$$(5) U_{trav,q} = \beta_{trav} * t_{trav,q} + \beta_m * \Delta m_q$$

¹⁷ Disse komponentene gir (negativ) nytte for 1) ventetid, 2) for å komme for tidlig, 3) for å utføre en aktivitet kortere enn spesifisert «minimum varighet».

¹⁸ Vi bruker her varianten der "typicalDurationScoreComputation" er satt til "relative". Se forklaring på side 538 i Horni et al (2016).

¹⁹ I en full modell med transportmiddelvalg vil det være konstantledd for hvert transportmiddel og β_{trav} vil typisk variere med transportmiddel. Siden eksempelet bare handler om biltransport er også nytten for omstigning ikke relevant. Og siden rutevalget er forhåndsdefinert i dette eksempelet ser vi også bort fra distanseavhengige reisekostnader.

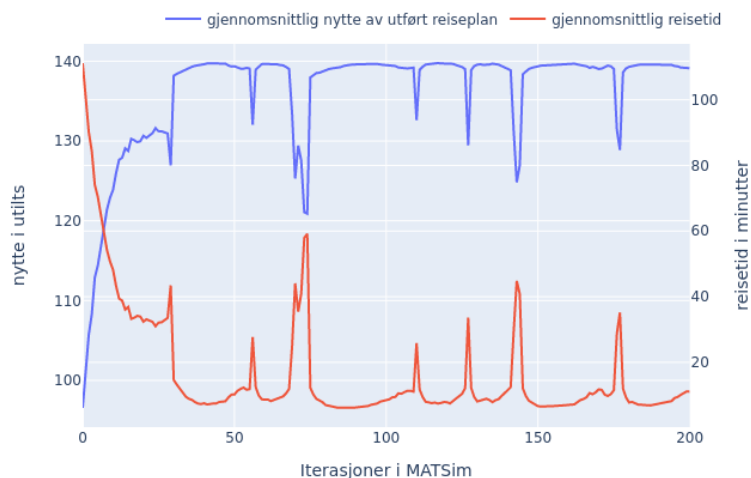
Variablene i likning (3-5) er forklart i tabell 4.1. I dette eksempelet har vi brukt defaultverdier som ligger i MATSim's konfigurasjonsfil. I senere avsnitt demonstrerer vi noen følsomhetsanalyser der noen av disse parameterverdier varieres.

Tabell 4.1: Forklaring av sentrale variabler i modellering av avreisetidspunkt.

Symbol	Kort beskrivelse	Parameternavn i MATSim	Enhet	Parameterverdi brukt i eksempel
$t_{typ,q}$	Typisk varighet av aktivitet q (kan tolkes som hva som er den foretrukne varigheten)	" typicalDuration "	Sekunder (skrevet (hh:mm:ss))	8:00:00 for q=arbeid og 16:00:00 for q=hjemme
$t_{dur,q}$	Simulert varighet av aktiviteten q	-	Sekunder	
β_{dur}	Marginal nytte av å utføre en aktivitet	" performing "	Utils/hour	6
$t_{latest,q}$	Klokkeslett der forsinket på jobb inntre	" latestStartTime "	Sekunder (skrevet (hh:mm:ss))	8:00:00 for q=arbeid og "undefined" for q=hjemme
$t_{start,q}$	Simulert tidspunkt der agenten starter aktivitet q	-	Sekunder (skrevet (hh:mm:ss))	
β_{late}	Marginal nytte av å komme forsinket til en aktivitet	" lateArrival "	Utils/hour	-18
$t_{trav,q}$	Simulert reisetid av en reise fra aktivitet q til aktivitet q+1		Sekunder	
β_{trav}	Marginal nytte av tid i transport	" marginalUtilityOfTraveling_util_hr "	Utils/hour	-6
Δm_q	Simulert endring i tilgjengelige penger (se bompenger i avsnitt 4.2.)		Euro (implisitt)	
β_m	Marginal nytte av penger	" marginalUtilityOfMoney "	Utils/euro	1

Figur 4.5 viser utviklingen av gjennomsnittlig nytte over 200 iterasjoner. Vi ser at nytten når en topp allerede ved iterasjon 30. Deretter prøver agenten å forbedre planene (avreisetidspunktet videre) uten å lykkes. Fra den røde kurven som viser gjennomsnittlig reisetid ser vi at det oppstår kø i noen av iterasjonene, men disse er løst opp igjen ved senere iterasjoner.

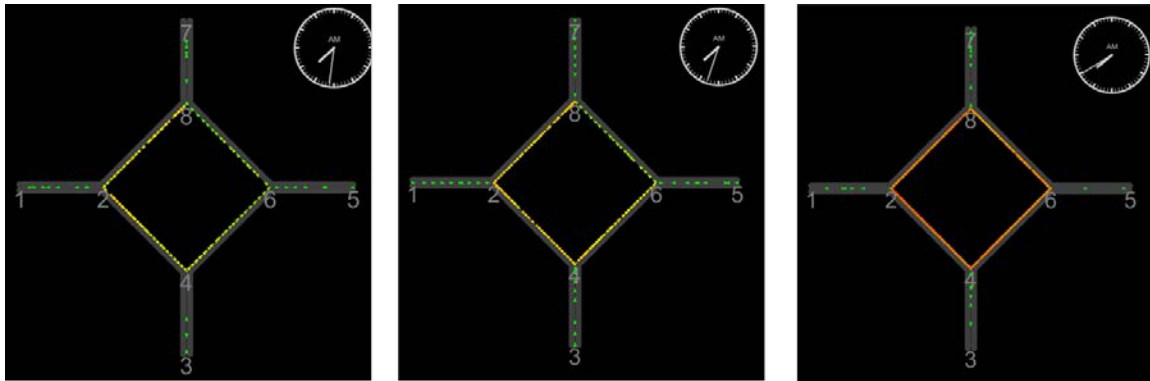
Ellers ser vi at gjennomsnittlig reisetid reduseres fra over 140 minutter ved iterasjon 0 til rundt 10 minutter ved iterasjon 200. Husk at agentene ikke bare minimerer reisetiden, men også vurderer forsinkelse opp mot ønsket avreisetidspunkt.



Figur 4.5: Forløp av nytte og reisetid over 200 iterasjoner.

4.2.2 Avreisetidspunkt etter adferdsendring

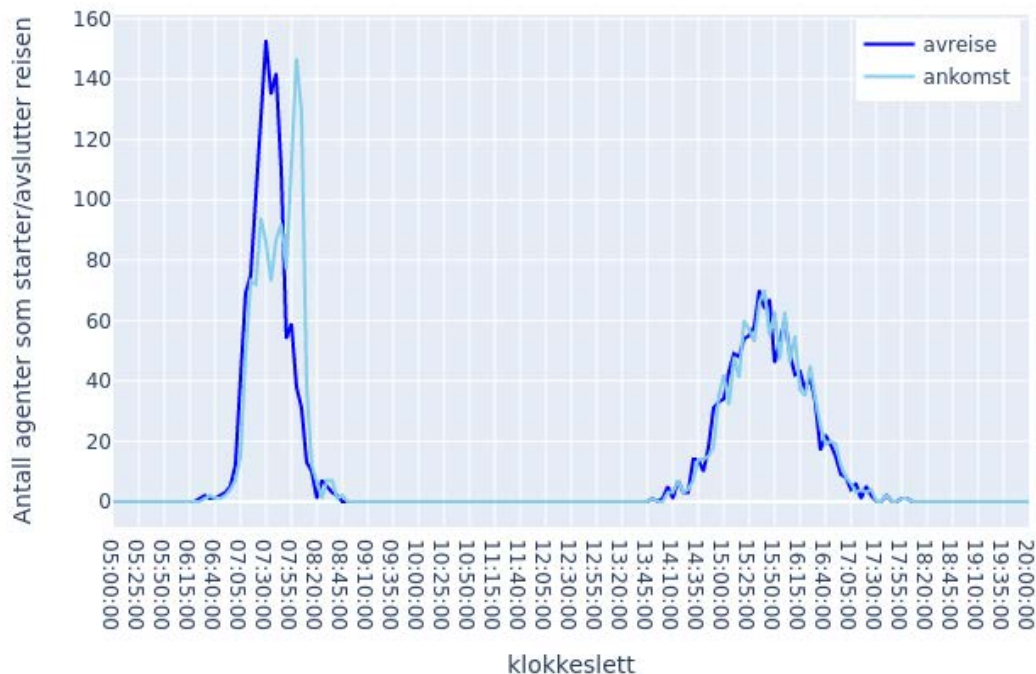
Figur 4.6 viser simulert trafikk i 3 tidspunkter i morgenrushet ved iterasjon 200. I motsetning til i figur 4.3 (for iterasjon 0) er det en tydelig nedgang i kø etter kl. 07:31, noe som skyldes at flere biler har startet reisen før kl. 07:30 (se venstre side av figur 4.6).



Figur 4.6: Illustrasjon av trafikkavvikling i morgenrush etter endring i avreisetidspunkt (iterasjon 200).

Figur 4.7 viser fordeling over avreisetidspunkt ved iterasjon 200. Merk at skalaen på y-aksen er forskjellig fra Figur 4.4 som viste tilsvarende fordeling for iterasjon 0.

Fra Figur 4.7 ser vi at agenter har tilpasset avreisetidspunkt både på formiddagen (til arbeid) og på ettermiddagen (tilbake til hjemmet). Vi ser at fordelingen om morgenen er spissere enn om ettermiddagen. Dette henger sammen med at agenter får en unytte ($U_{late,q}$) når de kommer på jobb etter kl. 8:00.



Figur 4.7: Simulert avreisetidspunkt og ankomsttid etter 200 iterasjoner.

Som vist over er køene betydelig redusert etter at agentene har tilpasset avreisetidspunktet sitt. Fra figur 4.7 ser vi at køene oppstår når rundt 90 agenter starter reisen sin samtidig innenfor ett 5 minutters

intervall. Merk at 90 agenter på 5 minutter, tilsvarer kapasitetsmaksimumet på 1800 biler per time som ble satt i nettverket (figur 4.1).

4.2.3 Følsomhetsanalyser

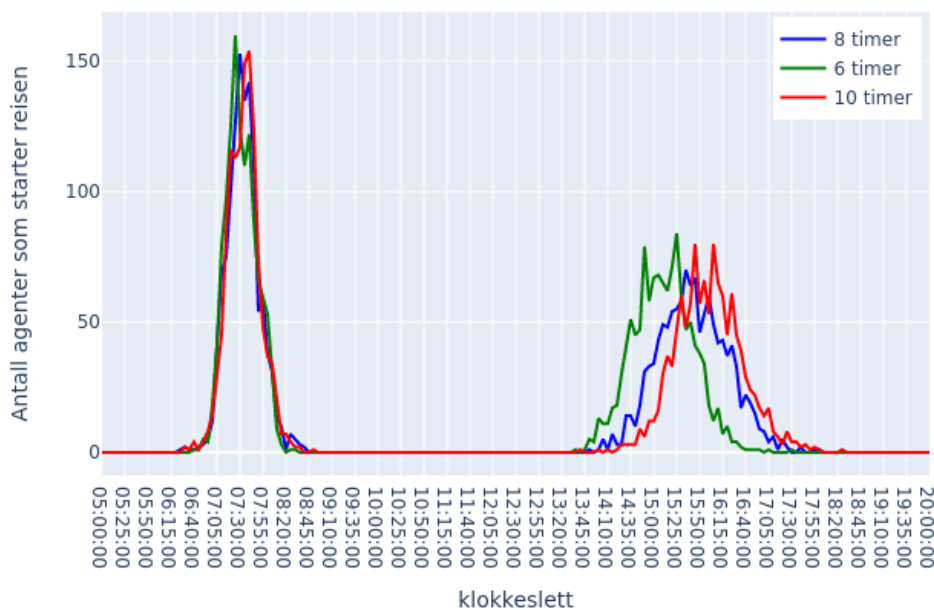
Å gjøre en følsomhetsanalyse med hypotetiske data har liten praktisk nytte. Formålet med dette avsnittet er å illustrere hvordan noen av mekanismene rundt avreisetidspunkt virker i MATSim.

Tabell 4.2 gir en kort oversikt over testene som ble gjort.

Tabell 4.2: Oversikt over tester.

Test Nr.	Endret variabel (alle andre ting likt)	Verdi i default	Alternative verdier
1	Foretrukket («typisk») aktivitetsvarighet, $t_{typ,q}$	8 timer (jobb) 16 timer (hjemme)	1) 6 / 18 timer 2) 10 / 14 timer
2	Marginal nytte av tid i transport, β_{trav}	-6 utils/time	1) 0 utils/time 2) -12 utils/time
3	Klokkeslett der forsinkelser inntreffer, $t_{latest,work}$	8:00	1) 9:00 2) 10:00
4	Marginal nytte av å komme forsinket på jobben ($t_{trav,q}$)	-18 utils/time	1) 0 utils/time 2) -36 utils/time

Figur 4.8 viser resultatet ved Test 1, der vi justerer foretrukket aktivitetslengde for jobb fra 8 timer til henholdsvis 6 eller 10 timer.

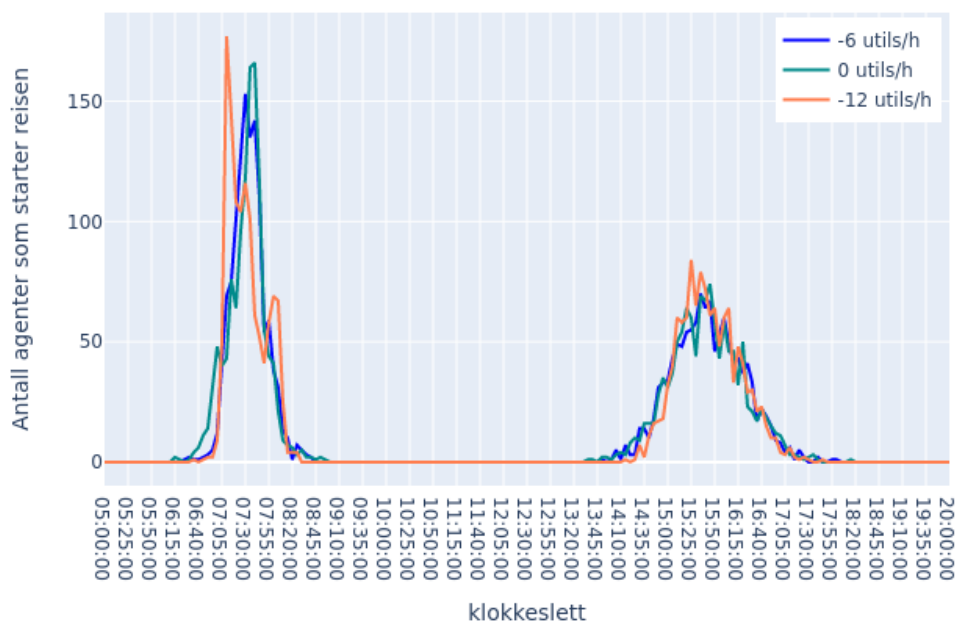


Figur 4.8: Effekt på avreisetidspunkt av endring av foretrukket aktivitetsvarighet.

Vi ser at endringen påvirker når agentene velger å reise hjem fra jobb på ettermiddagen. Dette henger sammen med at foretrukket varighet ($t_{typ,q}$) påvirker nytten man får av å utføre aktiviteten (se ligning 3). Vi ser at endringene i avreisetidspunkt på ettermiddagen ikke fullt tilsvarer spesifisert endring i foretrukket aktivitetsvarighet (forskyvning mellom fordelingene på ettermiddagen er mindre enn 2 timer). Det er mulig at forskjellene hadde blitt større ved flere iterasjoner.

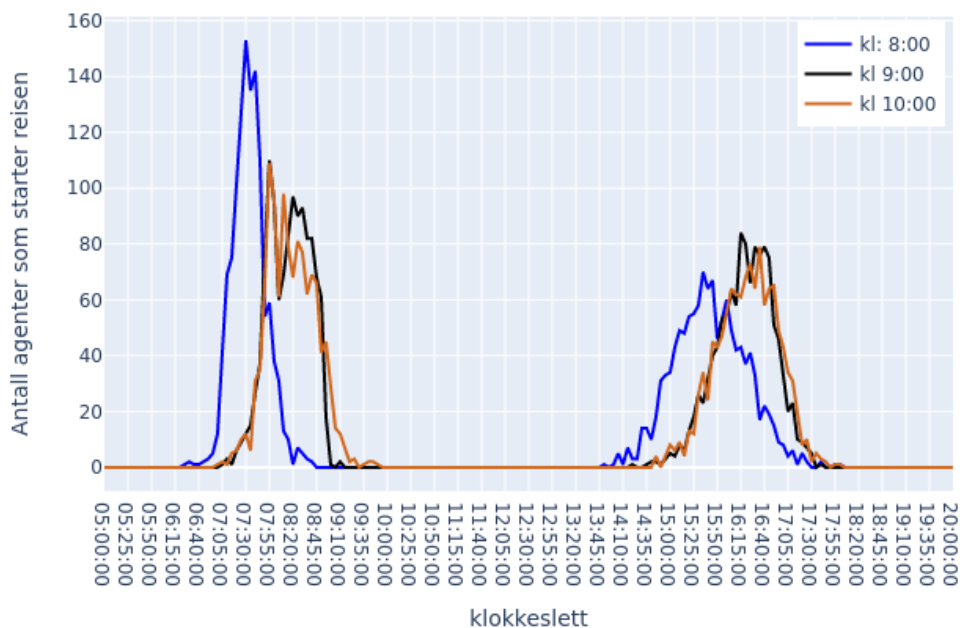
Figur 4.9 viser resultater fra Test 2 der vi varierer nytteverdien av reisetid. Når vi setter marginal nytte til 0 utils/time fører dette til en mindre ulempe for agentene av å kjøre bil. Det gir en litt spissere fordeling

og mer kø enn ved default-tidsverdi på -6 utils/time, men forskjellen er liten. Ved økt ulempe ved reisetid på -12 utils/time ser vi større spredning av agentene, der flere reiser tidlig (og noen senere) enn kl. 7:30 i et forsøk på å unngå kø i morgenrushet.



Figur 4.9: Effekt på avreisetidspunkt av endring i nytteverdi for reisetid.

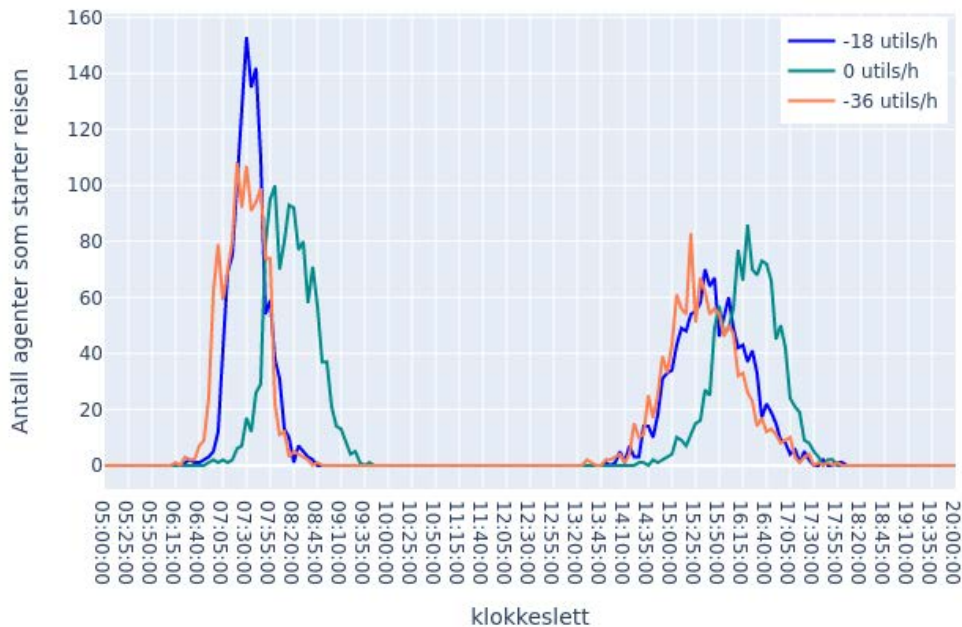
Figur 4.10 viser fordeling over avreisetidspunkt når vi endrer klokkeslett for når forsinkeleseulempe vil inntre. Det tilsvarer seneste tidspunkt agentene ønsker å starte på jobb. Vi ser at personer velger å tilpasse sine avreisetidspunkter til senere når dette klokkeslettet settes til kl. 9 eller kl. 10.



Figur 4.10: Effekt på avreisetidspunkt av endring for når man ønsker å starte på jobb.

For den siste testen (Test 4) bruker vi igjen defaultverdien kl. 8 som klokkeslett når forsinkeleseulempene inntre, og varierer graden av ulempe en agent opplever når den blir forsinket (figur 4.11). Når

forsinkeleseparameteren fjernes (dvs. settes til 0), forskyver fordelingen seg til høyre og de fleste agentene kommer «for sent» til jobben. En økning av kostnaden for forsinkelse til -36 utils/time fører til at de aller fleste agentene er på jobben til rett tid, og fordelingen er forskjøvet til venstre sammenlignet med default forsinkelsesparameter på -18 utils/time. Dette er trolig et resultat av at flere agenter godtar tidligere avreisetidspunkt for å «forsikre» seg om å ikke komme for sent.



Figur 4.11: Effekt på avreisetidspunkt av endring i marginal nytte av å komme for sent på jobben.

Som disse testene viser gir agent-basert metodikk kontinuerlige fordelinger for valg av avgangstid etter som agenter tilpasser sin adferd i form av endrede reisetidspunkter. Vi observerer stort sett logiske justeringer i valg av avgangstid basert på parameterne i et gitt scenario, som demonstrert i det forenklete eksempelet. Oppsettet er fleksibelt, og tilbyr et spekter av parametere som kan justeres fritt.

For realistiske scenarier har anvendelsen av denne tilnærmingen flere utfordringer. En betydelig utfordring er å etablere et empirisk grunnlag for det store antallet adferdsparametere. Det er også ønskelig å innføre systematisk variabilitet for å fange opp mangfoldet av adferder, som for eksempel varierende åpningstider for spesifikke aktivitetstyper. I tillegg blir kalibrering mot empiri utfordrende når valg av rute og transportmiddel modelleres samtidig.

4.3 Simulering av bompenger

4.3.1 Inndata

Bompenger defineres i MATSim med egne datafiler. Som alle datatyper i MATSim brukes også xml-formatet her. Videre må det aktiviseres en pakke i MATSim som heter «roadpricing»²⁰.

Bompengene defineres per lenke med et klokkeslett («start_time» og «end_time») og en kostnad («amount»). Boksen nedenfor viser hvordan datafilen ser ut for en fleksibel bomring som krever inn 2 Euro utenom rush og 4 Euro i rush.

²⁰ org.matsim.roadpricing (roadpricing 0.7.0 API)

```

<links>
  <link id="24">
    <cost start_time="00:00" end_time="06:59" amount="2"/>
    <cost start_time="07:00" end_time="08:59" amount="4"/>
    <cost start_time="09:00" end_time="14:59" amount="2"/>
    <cost start_time="15:00" end_time="16:59" amount="4"/>
    <cost start_time="17:00" end_time="23:59" amount="2"/>
  </link>
  <link id="46">
    <cost start_time="00:00" end_time="06:59" amount="2"/>
    <cost start_time="07:00" end_time="08:59" amount="4"/>
    <cost start_time="09:00" end_time="14:59" amount="2"/>
    <cost start_time="15:00" end_time="16:59" amount="4"/>
    <cost start_time="17:00" end_time="23:59" amount="2"/>
  </link>
  <link id="68">
    <cost start_time="00:00" end_time="06:59" amount="2"/>
    <cost start_time="07:00" end_time="08:59" amount="4"/>
    <cost start_time="09:00" end_time="14:59" amount="2"/>
    <cost start_time="15:00" end_time="16:59" amount="4"/>
    <cost start_time="17:00" end_time="23:59" amount="2"/>
  </link>
  <link id="82">
    <cost start_time="00:00" end_time="06:59" amount="2"/>
    <cost start_time="07:00" end_time="08:59" amount="4"/>
    <cost start_time="09:00" end_time="14:59" amount="2"/>
    <cost start_time="15:00" end_time="16:59" amount="4"/>
    <cost start_time="17:00" end_time="23:59" amount="2"/>
  </link>
</links>

```

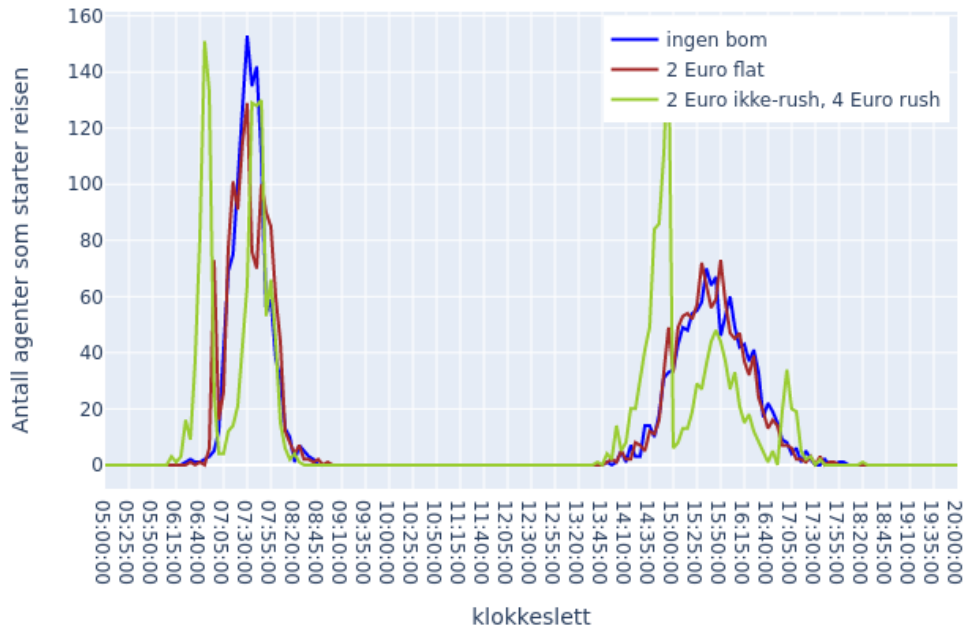
4.3.2 Avreisetidspunkt gitt bompenger

Vi har kjørt to bompengescenarier i vår casestudie med bruk av defaultinnstillinger som vist i tabell 4.1. Første scenario har en bomring med fast bompengesats på 2 Euro og det andre scenarioet har fleksible bompenger, som spesifisert i avsnittet over, med differensierte takster i rush og utenfor rush.

Figur 4.12 sammenligner valg av avreisetidspunkt i scenarioet uten bompenger og i de to bompengescenarioene ved iterasjon 200. Husk at agentene i modellen ikke kan velge noe annet transportmiddel enn bil i denne «lekemodellen».

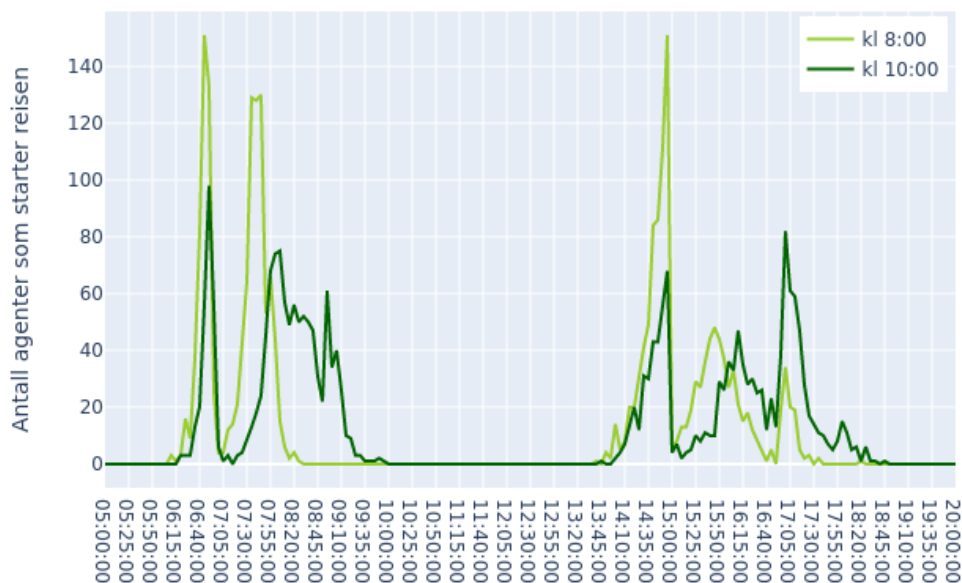
Vi ser at en flat bompengestruktur ikke fører til merkbare endringer i avreisetidspunktet sammenlignet med scenarioet uten bompenger.

I scenarioet med høy bomtakst i rushperioden ser vi derimot en tydelig adferdsendring. Agentene velger i stor grad å reise før morgenrushet og både før og etter ettermiddagsrushet. Om ettermiddagene er det også en del agenter som velger å reise i rush, spesielt rundt kl. 16. Disse agentene betaler høy bomtakst, men reiser på en tid med mindre kø og bedre tilpasning til ønsket avreisetidspunkt. I morgenrushet er en del agenter «nødt» til å betale høyere bomtakst. Husk at agentene ikke vil komme senere enn kl. 8 på jobb.



Figur 4.12: Effekt av bompengesatser på avreisetidspunkt.

Figur 4.13 viser resultater fra en følsomhetsanalyse der forsinkelsen først inntreer når agenter kommer senere enn kl. 10 på jobb. Da er det flere agenter som velger å reise etter rushperioden, dvs. etter kl. 9.



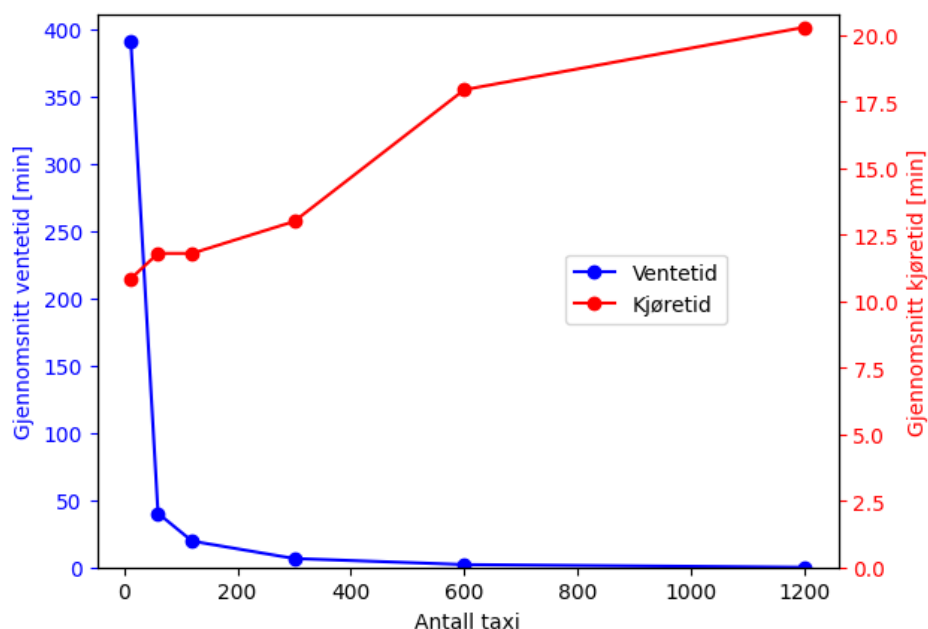
Figur 4.13: Effekter av at tidspunktet for når forsinkelse inntreer er endret til klokka 10 i scenarioet med fleksible bompenger.

4.4 Modellering av robotaxi

Som diskutert i avsnitt 3.6 er robotaxi et tiltak som er vanskelig å modellere i statiske modeller siden ventetiden til en robotaxi vil være et endogent resultat av samspill mellom tilbud (antall ledige robotaxier) og etterspørsel (agenter som ønsker en robotaxi på et gitt sted og tidspunkt).

Vi har anvendt modulen «[taxi](#)» med «[dvrp](#)» (dynamic vehicle routing problem) på samme nettverk og reiseplaner som i de øvrige eksemplene i avsnittene over. I 6 ulike simuleringer får populasjonen med 1200 agenter tilgang til hhv. 12, 60, 120, 300, 600 eller 1200 robotaxier. I plans.xml-filene (figur 4.2) er reisemiddelet byttet fra «car» til «taxi». Agentene vil da bestille en taxi, vente på den, bli kjørt til arbeidsplassen og gå ut av taxien. I likhet med følsomhetsberegningene har agentene ikke mulighet til å bytte transportmiddel. De velger kun når de bestiller en taxi som samsvarer med avreisetidspunktet i modellen. Overordnede parametere som kan måles er f.eks. ventetid og kjøretid, se figur 4.14.

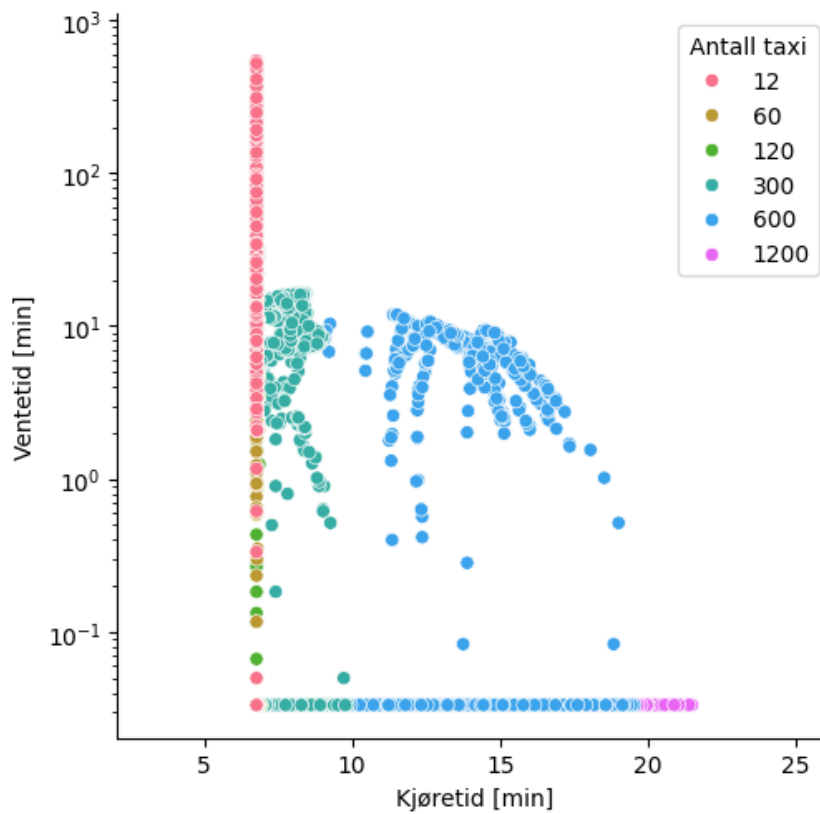
Vi diskuterer ikke de resulterende absoluttverdiene siden dette er et hypotetisk eksempel i et veldig enkelt nettverk. Vi opplever at mønsteret som vises i figur 4.14 ser logisk ut: Med økende antall taxier blir ventetiden redusert, det er ingen ventetid i en situasjon med 1200 taxier – her har hver agent sin «egen» taxi og taxier vil parkere der agenten befinner seg uten å måtte kjøre ut for å betjene andre agenter. I dette scenarioet er kønivået tilsvarende et scenario med 1200 private biler, og kjøretiden øker tilsvarende.



Figur 4.14: Gjennomsnittlig ventetid (blå) og kjøretid (rød) i minutter ved varierende antall taxier.

Figur 4.15 viser resultater på agentnivå der observasjoner fra ulike simuleringer er vist med ulike fargekoder. Med unntak av scenarioet med 1200 taxier (der ingen agent må vente), varierer ventetiden betydelig på tvers av agentene. I scenarioene med 600 taxier og 300 taxier vil ventetiden variere, men ikke overskride 20 minutter (i vårt hypotetiske scenario). For disse scenarioene varierer kønivået betydelig over tid og reisetiden varierer en del. For scenarioet med 120 eller færre taxier er det ikke betydelig kø i nettverket, men det er store forskjeller i ventetider.

Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by



Figur 4.15 Ventetid og reisetid per agent, for varierende antall taxier, logaritmisk skala for ventetid.

5 Oppsummering, diskusjon og anbefaling

5.1 Oppsummering av mulighetsstudien med utgangspunkt i RTM

Tabell 5.1 oppsummerer våre funn.

Kolonnen «mulig i RTM på lengre sikt» vil kreve ny estimering, og for flere tiltak også ny oppbygging av kildekoden i TraMod_By.

Tabell 5.1: Oppsummering av mulighetsstudien

Tiltak	Mulig i RTM på kort sikt	Mulig i RTM på lengre sikt (ny estimering, større endring i kildekoden)	Forbedringspotensial med dynamiske og agent-baserte modeller
Elbil som egen mode	Segmentering etter drivlinje; implementert i Hamre and Rekdal (2024)	Eget alternativ i MD-modellen* ved ny versjon; større endringer i segmenteringsmodellen (<i>uklart utbytte</i>)	Moderat (fordeler for elbiler mest mht. ladning)
Endre/forskyve reisetidspunkt	Tilleggsmodeller for forskyvning av reiseperiode; (pågående implementering av SINTEF i CUBE)	Større endringer i frekvensmodellen (tidsdifferensiert) (<i>uklart utbytte</i>)	Stort; gevinster fra modeller med eksplisitt representasjon av døgn tid
Flexibele bompenger/veiprisering	Tilpasninger i rutevalgmodellen; finere fordeling av LoS (per time)	Noen forbedringsmuligheter i kombinasjon med elbil og forskyvning av tidsperiode	Moderat; noe større hvis bompenger kan forventes å ha betydelige dynamiske effekter
Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader)	Ulike muligheter for rekalkibrering, f.eks. reisehensikter i frekvensmodellen	Estimering av «post korona»-preferanser ved re-estimering basert på nye RVU data	Moderat; noen fordelinger med aktivitetsbasert tilnærming, spesielt med tanke på hjemmekontor
Endring i trengselskostnader etter korona (eller under ny pandemi)	Funksjonalitet i CUBE for å «balansere» rutevalget	Begrenset mulighet/nytte av å ta det med i etterspørselsmodell --> tilpasse (PROSAM rapport)	Begrenset (mye kan dekkes av Trenklin)
Parkering og nullutslippssoner	Scenario-analyser ved manipulering av eksisterende sonedata / tilpasning av destinasjonsmodell i kombinasjon med elbil	Helhetlig integrering i ny-estimert destinasjonsmodell	Lite, med mindre man vil modellere tilgjengelighet av parkeringsplasser på mer detaljert/dynamisk måte
Bildeling/Robotaxier	Muligheter for justeringer/kalibrering i segmenteringsmodellen for å approksimere økt biltilgang	Større forbedringer i segmenteringsmodellen rundt bildeling; Robotaxier vanskelig å fange opp i fullt omfang	Veldig stor pga. mulighet for å fange opp dynamikken mellom tilbud og etterspørsel (endogen tilgjengelighet/ ventetider)
Mikromobilitet	Virker vanskelig (justerte analyser samlet med sykkel) --> justere hastighet	Egen mode i etterspørselsmodellen ved nyestimering, egen beregning av LoS; segmentering knyttet til tilbringertid (<i>uklart utbytte</i>)	Stort med tanke på mulig detaljeringsgrad og muligheten for å predikere tilgjengelighet endogen
Takstsystemer i kollektivtransport	Forbedringer innenfor eksisterende CUBE rammeverk	Utvidet funksjonalitet i spesifisering av takstsystemer; forbedret håndtering av periodekort i nyestimert modell (<i>noen begrensinger</i>)	Lite (noe større for tidsdifferensierte billetter; kjøp av periodekort kan muligens bedre forklares innenfor aktivitetsbaserte modeller)
Framkommelighet (super)buss	Tilrettelegging på nettverkssiden (dedikert fil for superbuss)	Kapasitetsavhengige reisetider med kollektivt (inkl. superbuss)	Moderat hvis fokus på reisetider; stort for kømodellering i byområder
Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling	Ekstern kopling mot Aimsun eller MATSim (<i>uklart utbytte</i>)	Kopling/integrering med andre verktøy; innenfor Cube kan <i>Cube Avenue</i> være en mulighet	Stort hvis vekt på samspill med etterspørselsiden

* MD-modellen refererer til nested logit-modellen for «mode» og «destinasjon» i TraMod_by

Vår mulighetsstudie viser at følgende tiltak/modelldimensjoner kan håndteres godt innenfor RTM-systemet:

- Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader)
- Parkerings- og nullutslippssoner
- Elbil som egen mode
- Fleksible bompenger (hvis fleksibilitet er begrenset til faste tidsperioder og hvis endring av reisetidspunkt ikke forventes å spille en stor rolle).

Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader) og *Parkerings- og nullutslippssoner* kan i stor grad fanges opp med forbedret kalibrering og/eller manipulering av nyttefunksjoner og sone-data.

Langsiktige preferanseendringer etter korona vil man på lengre sikt kunne fange opp ved en reestimering av TraMod_By med post-korona reisevanedata. På kort sikt burde økt hjemmekontor fanges opp via en kalibrering av frekvensmodellen (mindre arbeidsreiser).

I tilfellene *Elbil* og *Fleksible bompenger* har det blitt gjennomført videreutviklingsprosjekter etter oppstart av dette prosjektet. Disse har ført til forbedrede virkemåter i RTM, eller vil gjøre det i nær fremtid. Det kan argumenteres for at 1) de foreslåtte og delvis gjennomførte endringene i stor grad maksimerer potensialet i RTM og 2) at forslagene på lengre sikt har begrenset nytte innenfor statiske og makroskopiske modellsystemer.

For en god modellering av *Fleksible bompenger* og *Tidsdifferente takstsystemer* bør man fange opp bytting/forskyving av avreisetidspunkt. Forskyving av avreisetidspunkt kan implementeres i RTM til en viss grad, men det gjør modellen mye mer komplisert og beregningstung. Generelt vil tiltakene som har en mer dynamisk karakter bli bedre fanget opp i modeller som har en eksplisitt representasjon av tid.

Det samme gjelder tiltakene *Framkommelighet (super)buss* og *Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling*. Disse fanges bedre opp med andre typer modeller. Det er teknisk mulig å koble TraMod_By med en dynamisk og mikro-/mesoskopisk avviklingsmodell, men implementeringen vil nødvendigvis medføre transformasjoner av data for å håndtere ulike datastrukturer. Integreerte modeller som har samme datastruktur i etterspørselsmodellering og trafikkavvikling (som MATSim har) er foretrukket. *Framkommelighet (super)buss* kan muligens fanges opp greit nok i RTM/Cube Voyager hvis man er interessert i reisetider (og ikke romlig utbredelse av kø) og man legger ressurser i å kalibrere VDF-funksjoner og hastighetsmodeller.

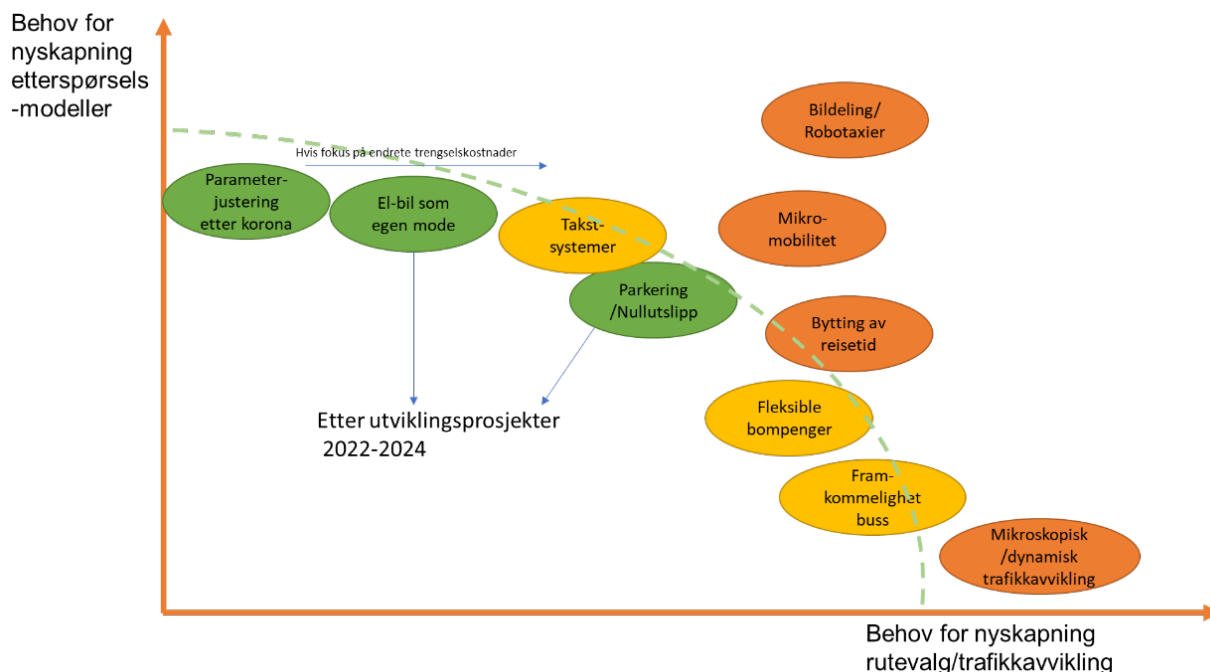
Modellering av *Robotaxier* (med endogen ventetid) og *Mikromobilitet* (med endogen tilgjengelighet) vil ikke kunne fanges opp i RTM-systemet på en god måte. Her vurderes behov for state-of-the-art modeller som nødvendig.

Innad i RTM-systemet kan man gjøre en videre oppdeling av behovene i 1) behov for nyskapning på etterspørselssiden (TraMod_By) og 2) på avviklingssiden (Cube-Voyager). Figur 5.1 prøver å illustrere dette.

Den grønne stiplede linjen indikerer vår vurdering av om tiltakene kan håndteres i RTM på en god måte. Tiltakene som ligger til høyre av den stiplede linjen håndteres best utenfor RTM.

Fargekodene indikerer hvor godt de ulike tiltakene i figur 5.1 (og i figur 5.2 og figur 5.3) kan fanges opp i RTM. **Grønn** – kan fanges opp i RTM på en god måte, evt. med forbedringer som kan iverksettes på kort sikt, **gul** – tiltakene kan analyseres i RTM på en tilfredsstillende måte, men det finnes noen fundamentale begrensninger som ikke lar seg løse godt i RTM og **rødt** – vanskelig å fange opp i RTM på en god måte. Merk at «endring i avreisetid» og «mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling» kan delvis løses med eksterne modeller som kan kobles mot RTM.

I forhold til arbeidsdokumentet 51874 som ble publisert i 2022 har vi tilført noen piler som indikerer status i 2024. I 2024 er behovet for nyskaping knyttet til «elbil som egen mode» mindre siden implementering av segmenter fanger opp mye av funksjonaliteten til dette tiltaket (se avsnitt 3.1.4).



Figur 5.1: Forenklet illustrering av behov for nyskaping i forhold til dagens RTM-system (den grønne stiplede buen).

Figur 5.1 viser at de fleste tiltakene som man vanskelig kan fange opp i RTM krever nyskaping både i etterspørselsmodellen og i trafikkavviklingsmodellen. Unntaket er *Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling*, der primært trafikkavviklingsmodellen trengs å forbedres. For robotaxier, mikromobilitet og endring i avreisetidspunkt vil det ikke være nok med justeringer i modellen eller å utvide eller erstatte enkelte deler av modellsystemet. For slike analyser er det behov for andre modellsystemer. Dette omtales nærmere i neste avsnitt.

5.2 Vurdering av behov for nye modeller

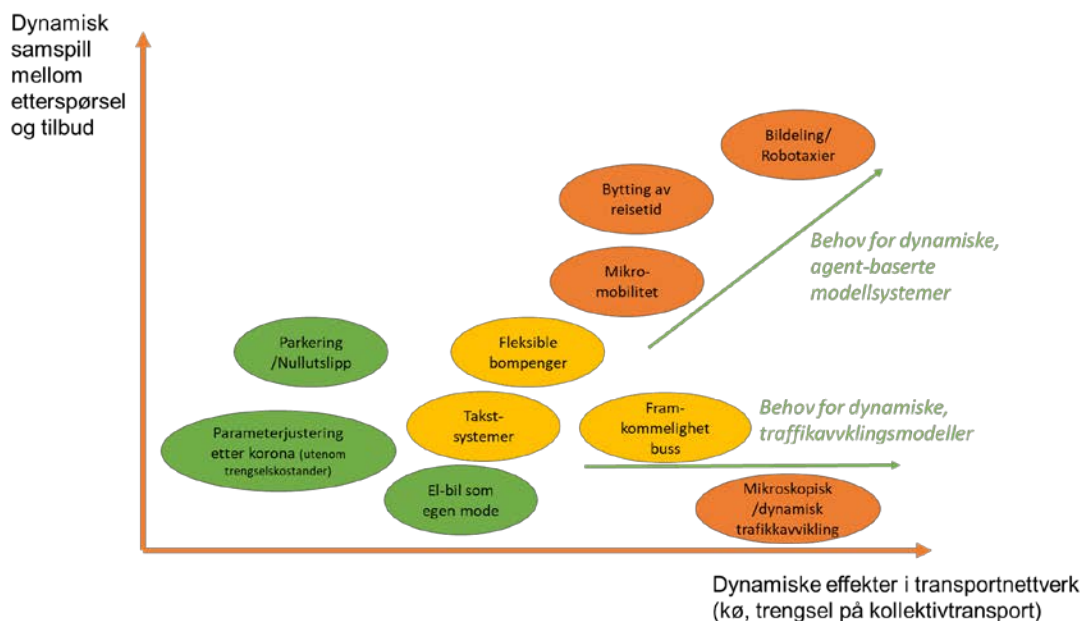
Som beskrevet i forrige avsnitt finnes det et behov for nye modeller for flere av de 10 analyserte tiltakene i denne rapporten. I dette avsnittet vurderer vi hvilke andre modeller som egner seg best til å fange opp tiltakene på sikt.

Vi tar utgangspunkt i modellene som er beskrevet i 2.4:

1. Dynamiske avviklingsmodeller (diskutert her i kombinasjon med TraMod_By)
2. Agent-baserte trafikksimuleringsmodeller
3. State-of-the-art-modell bestående av arealbruksmodell, aktivitetsbasert etterspørselsmodell og trafikksimuleringsmodell (kalt «M4» tidligere i rapporten).

Tilnærming 1 prøver å koble TraMod_by opp mot dynamiske avviklingsmodeller (som Aimsun, evt. Trenklin for tognettverket ²¹). Ulempen er at etterspørselsmodelleringen fortsatt vil være statisk og at endring i avreisetidspunkt ikke kan fanges opp uten tilleggsmoduler.²²

Denne utfordringen kan løses med agent-baserte trafikksimuleringsmodeller som MATSim. Her har man mulighet til å fange opp dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud. Som beskrevet i vår gjennomgang av tiltakene er dette mest sentralt for tiltakene *robotaxier*, endring i *avreisetidspunkt* og *mikromobilitet*. Figur 5.2 illustrerer dette.



Figur 5.2: Behov for dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud og behov for interaksjon mellom enkeltkjøretøy og/eller personer.

Ulempen med MATSim er at den ikke fanger opp langsiktige etterspørselsvirkninger. Dette kan prinsipielt løses med en state-of-the-art-modell som vi har beskrevet i avsnitt 2.4 («M4»). Det foreslåtte modellsystemet har to koblinger: 1) en aktivitetsbasert etterspørselsmodell med en agent-basert trafikksimuleringsmodell, 2) arealbruksmodell med reisekostnader fra trafikksimuleringsmodellen som inndata og som leverer arealbruksdata til den aktivitetsbaserte etterspørselsmodellen.

Som skissert i figur 2.7 vil et slikt modellsystem kunne predikere langsiktige transporttilpasninger på linje med RTM og (endogene) valg for arealbruk.

Tabell 5.2 oppsummerer vår vurdering rundt nye typer modeller for hvert tiltak.

²¹ Trenklin genererer et nettverk ut fra rutetabeller og det beregnes en likevekt i rutevalg. Rutevalget kan innebære hvor man bytter tog, men for mange relasjoner (uten bytte) er rutevalget det samme som valg av avgang.

²² Rutevalget i Trenklin handler i hovedsak om valg av togavgang og innebærer dermed implisitt valg av avreisetidspunkt. Det er noe uklart hvordan en kobling mellom TraModBy og Trenklin kunne foregå.

Tabell 5.2: Vurdering av muligheter og utfordringer ved andre modeller/metoder.

Tiltak	Muligheter med TraModBy , evt. i kombinasjon med andre modeller	Muligheter/utfordringer med «standard» MATSim (mer kortsiktige adferdsendringer)	Videre muligheter med State-of-the-art-modeller («M4») som inkluderer langsiktige adferdsendringer
Elbil som egen mode	Kan håndteres tilfredsstillende i TraMod_By etter siste forbedringer; evt mulighet for kobling mot bilkjøpsmodeller	Heterogenitet i bilparken, kan påvirke rutevalg og transportmiddelvalg, El-/bilholdsmoell eksogent	Integrasjon med bilkjøpsmodell prinsipielt mulig, men usikkert utbytte.
Endre/forskyve avreisetid	Eksterne modeller for å forskyve trafikken mellom tidsperioder (<i>noe uklart utbytte</i>)	Integrert i standard-modellen (fordeler heldaglige reiseplaner og følsomheten kan styres via «åpningstiden» til ulike aktiviteter)	En mer helhetlig modellering av ønskede ankomsttider med utgangspunkt i etterspørsel etter aktiviteter
Fleksible bompenger/veipricing	Tilfredsstillende, så lenge endring i avreisetid har underordnet effekt	Integrerte moduler for tidsdifferensiert pricing (videre tilpasninger mulig)	I motsetning til MATSim kan det fanges opp effekter for reisefrekvens og destinasjonsvalg
Parameterjustering etter korona (med unntak av trengselskostnader)	Kan håndteres godt ved rekalkulering og evt. reestimering	Tilpasninger i eksogene inndata, justering av parametere som påvirker tilbøyelighet for å endre avreisetidspunkt og transportmiddelvalg	Noen fordeler med aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller (effekt av hjemmekontor)
Endring i trengselskostnader etter korona (eller under ny pandemi)	Begrenset mulighet i Cube. Fanges godt opp i Trenklin	Kan fanges opp (krever først implementering av rutetilbudet)	I motsetning til MATSim kan det fanges opp effekter av reisefrekvens og destinasjonsvalg
Parkering og nullutslippssoner	Tilfredsstillende for de fleste strategiske analyser	Ingen kjente moduler, krever trolig egenutvikling	Noen forventede forbedringer ved integrert arealbruksmodell
Bildeling/Robotaxier	Veldig begrenset	Eksisterende moduler for robotaxier	Kan i tillegg fange opp effekter av reisefrekvens og destinasjonsvalg
Mikromobilitet	Begrensinger i romlig oppløsning	Kan trolig bygge på eksisterende moduler for elsykkel og delt mobilitet	Noen fordeler med høyere detaljeringsgrad
Takstsystemer i kollektivtransport	Kan forbedres, men noen forhold er vanskelige å fange opp	Vanskelig på kort sikt, uklart utbytte	Fordeler med aktivitetsbasert etterspørselsmodellering, spesielt i forhold til periodekort
Framkommelighet (super)buss	Endringer i nettverk / kollektivtilbud, samt kalibrering av reisetider gjennom VDF funksjoner (romlig modellering av kø)	Kan dedikere infrastruktur til heterogene kjøretøy (krever først implementering av rutetilbudet). Fordelaktig at romlig utbredelse av kø modelleres	Begrenset forbedring utover MATSim
Mikroskopisk/dynamisk trafikkavvikling	Kun med nye avviklingsmodeller. Cube kan kobles mot Aimsun eller MATSim (mesoskopisk)	Mikroskopisk rutevalg er i standardmodellen (mesoskopisk trafikkflyt)	Vil være integrert i et slikt modellsystem (trolig mesoskopisk). Begrenset forbedring utover Aimsun/MATSim

5.3 Bymodeller og regionale/nasjonale modeller

Rapporten omhandler transportmodeller for byer og byområder. Det er viktig å understreke at behovet for nye modeller varierer mellom analyser på bynivå og på regionalt/nasjonalt nivå. Tabell 5.3 viser forenklede vurderinger av behovene for ulike utviklingsdimensjoner.

Tabell 5.3: Forskjellige behov for utviklingsdimensjoner i bymodeller og modeller utenfor byer

Modellutviklingsdimensjon	Bymodeller	Regionale/Nasjonale modeller (utenom byer)
Økt heterogenitet i preferanser	Middels	Middels
Økt heterogenitet i kjøretøypark	Middels	Middels
Økt romlig oppløsning (nettverk og soner)	Høy	Lav
Dynamisk trafikkavvikling	Høy	Lav
Dynamiske effekter i etterspørsel	Høy	Middels
Aktivitetsbasert modellering	Middels	Lav
Mer fleksible transportmodeller	Høy	Middels
Bedre modellering av langsiktig arealbruk	Middels	Middels
Robusthet for Nytte-Kostnads-analyser	Middels	Høy

For bymodeller kan det identifiseres et behov for økt romlig oppløsning (tiltak: *mikromobilitet*, og generelt gang og sykkel), dynamisk trafikkavvikling (*flere tiltak*) og dynamiske effekter i etterspørselsberegningen (tiltakene endring i *avreisetid* og *robotaxier*). For analyser av taktisk karakter kan MATSim være et egnet rammeverk. MATSim tilbyr videre et fleksibelt rammeverk og aktivitetsorientert modellering, noe som kan være fordelaktig for byanalyser. For strategiske analyser der man ønsker endogene effekter av reisefrekvens, reisehensiktsfordeling og destinasjonsvalg er MATSim i mindre grad egnet. Her er behovet for aktivitetsbasert etterspørselsmodellering og arealbruksmodellering (skissert som «M4» i avsnitt 2.4) større.

For regionale/nasjonale analyser er modellutviklingskravene lavere og dagens RTM-system (inkl. NTM6) virker velegnet for mange analyseformål. At man har etablert en helhetlig infrastruktur for analyser med RTM/NTM6-systemet, og har mye erfaring med nytte-kostnadsanalyser i over 20 år, er en stor fordel med tanke på konsistens av modellresultater over tid.

Hvordan man vil prioritere videreutvikling mot de 10 tiltakene/modelleringsgrepene som er beskrevet i rapporten bør sees i sammenheng med forventet betydning for transportmarkedene generelt. I denne rapporten har vi diskutert de 10 tiltakene med utgangspunkt i analyser for byområder. Men flere tiltak er også viktige for motorveiprosjekter og langdistansetransport, der det er mer relevant med regionale/nasjonale analyser.

Figur 5.3 illustrerer at ulike tiltak vil ha ulik betydning for byanalyser og for mer regionale/nasjonale analyser.



Figur 5.3: Vurdert betydning for fremtidige analyser i byer og på nasjonalt nivå

Fra figuren kan vi se at tiltakene som fanges godt opp i RTM har høyere betydning for analyser for hele landet, og som er av mer strategisk karakter.

At mange tiltak som har stor betydning for analyser i by er markert gul eller oransje kan brukes som et argument for utvikling av bymodeller basert på andre modeller.

Forskjellen mellom bymodeller og regionale/nasjonale modeller er videre diskutert i neste avsnitt.

5.4 Diskusjon og anbefaling rundt modellutvikling

I dette avsnittet diskuterer vi modellutvikling og hvordan mulighetsstudien vår kan bidra til å formulere anbefalinger rundt fremtidens transportmodeller.

Et krav til transportmodeller som har fått mye oppmerksomhet de senere år, er behovet for å fange opp effekter av ulike komplekse framtidsscenarier og at man synliggjør usikkerheten i det som ligger i implisitte og eksplisitte antakelser.²³

Dette medfører to overordnede mål: 1) å kunne analysere mange ulike framtidsscenarier inkludert effekter av ny teknologi, 2) raskere beregningstid slik at mange scenarier/kombinasjoner av scenarier kan testes.

Målene setter ulike – og til dels motstridende – krav til transportmodellene. Første mål krever fleksible transportmodeller, og for noen typer analyser detaljerte og dynamiske modeller. Andre mål krever forenklede transportmodeller for å redusere beregningstiden.

I denne sammenheng er det igjen interessant å se på forskjeller i analysebehov mellom byområder og på regionalt/nasjonalt nivå (se Tabell 5.3 i forrige avsnitt). Noen av framtidsscenariene vil trolig være mer

²³ Merk at disse antakelser typisk vil gjelde både referansescenario (null-alternativet) og tiltaksscenarioer (utbyggings-alternativene) og derfor er relevante for veldig mange utbyggingsprosjekter (ikke bare prosjekter som er direkte knyttet til teknologisk utvikling eller nye transportformer).

sentrale i byer og vil derfor kreve god representasjon i bymodeller, mens andre tiltak vil være mer relevant for regionale analyser, f.eks. motorveiprosjekter. Et annet eksempel er mikromobilitet som vil kreve eksplisitt representasjon i byanalyser, mens tiltaket kan forsøkes fanget opp på en forenklet måte ved regionale analyser/i regionale modeller, f.eks. ved å justere ned tilbringertiden til tog og langdistansebusser.

På grunn av høyere oppløsning og krav om å beregne nettverksavhengige reisetider, vil bymodeller ofte innebære lange beregningstider. Det er vanskelig å unngå uten at man kaster ut nødvendige detaljer fra modellen. En mulig løsning på sikt kan være at man lager meta-modeller basert på maskinlæring eller andre teknikker. Spesialmodeller som selvstendige etterspørselsmodeller (som MPM23 eller ADA) kan være egnet for noen typer analyser (disse tar forholdsvis lite tid å kjøre gjennom siden de ikke nettutlegger reisene). Et annet eksempel på en spesialmodell er Trenklin, som har forholdsvis kort beregningstid og kan brukes for noen typer analyser.

Som diskutert i forrige avsnitt er RTM/NTM6-modellsystemet godt egnet for regionale/nasjonale analyser med strategisk karakter. For målsetting 1 kan det tenkes at TraMod_by kan gjøres enda mer fleksibel²⁴. For mål 2 bør man vurdere å forenkle RTM-modellen (f.eks. færre soner, færre segmenter, ingen/færre iterasjoner). Noe av dette er allerede mulig å styre gjennom opsjoner som er programmert i brukergrensesnittet i Cube.

Denne diskusjon er oppsummert i tabell 5.4.

Tabell 5.4: Vurdering av utfordringer/muligheter knyttet til krav om å synliggjøre flere framtidsscenarier.

Mål	Bymodeller	Regionale/Nasjonale modeller (utenom byer)
Å kunne analysere en større bredde av framtidsscenarier	Fleksible transportmodeller; en del framtidsscenarier vil kreve mer dynamiske og detaljerte modeller	Mulig å fange opp noen framtidsscenarier i RTM på en mer overordnet måte (ved justering av forutsetninger/inndata)
Raske beregningstider slik at mange scenarier kan testes	Detaljerte modeller er nødvendigvis beregningsintensive, men bruk av «meta»-modeller kan være en løsning	Behov for å forenkle RTM (f.eks. færre soner, færre segmenter, ingen/færre iterasjoner). Det ligger en del funksjonalitet for dette allerede i CUBE

I tillegg til målene om stor variasjon i framtidsscenarier og raskere beregningstid, er det også identifisert noen flere generelle mål rundt transportmodellutvikling:

- Mer intuitive transportmodeller
- Bedre visualisering av resultater
- Etterprøvbare og robuste beregninger (spesielt for NKA)

Agent-baserte og aktivitetsbaserte modeller kan oppfattes som mer intuitive for transportplanleggere og folk flest siden disse modellene prøver å etterligne faktiske prosesser (enkelt personer som reiser for å gjennomføre aktiviteter). RTM-modellen krever mye innsikt i de underliggende mekanismene og konseptene for å «forstå» hva som skjer i modellen. Et eksempel er «soneattraktivitet» (som styrer destinasjonsvalg i RTM), som er et mye mer abstrakt konsept enn plassering av aktiviteter (som styrer destinasjonsvalg i aktivitetsbaserte modeller).

Simuleringsbaserte modeller har trolig et bedre utgangspunkt for visualisering av resultater. Siden resultater kommer mer disaggregert og med eksplisitt tidsdimensjon, finnes det for eksempel bedre muligheter for å bruke videosnutter til å illustrere effektene i nettverk.

²⁴ Utover fleksibiliteten som allerede ligger i CUBE.

Simuleringsbaserte modeller er typisk stokastiske modeller. Det har en fordel ved at modellene kan synliggjøre ulike likevektssituasjoner. For å få robuste resultater som inndata i NKA, innebærer dette at man bør kjøre modellen flere ganger med samme inndata. Dette vil – andre ting likt - innebære lengre beregningstider og er en ulempe fra et praktisk perspektiv. På den andre siden er den metodiske framgangsmåten mer realistisk siden den fanger opp at det vil finnes mange ulike fremtidige likevektssituasjoner i virkeligheten.

Ved siden av spesifikke modellkrav knyttet til egenskaper ved selve tiltakene som skal analyseres, henger spørsmål om best egnet modell også sammen med det konkrete formålet ved analysen. Formålet med analyser varierer ofte mellom

1. steg i planleggingsprosessen (tidlig planleggingsfase, konseptutredning, nytte-kostnadsanalyse, følsomhetsanalyser)
2. overordnet prosess (analyser for Nasjonal transportplan, ruteplanlegging, detaljerte spesialanalyser for utslipp, effekter av nye transportformer osv.).

Merk også at personene som utfører analysene kan være forskjellige (transport-/ruteplanlegger, «modellekspert», akademiker).

Krav til modellene som brukervennlighet, beregningstid, detaljgrad, presisjonsnivå og robusthet kan være veldig forskjellige for ulike sammenhenger/formål (i tillegg til selve tiltaket). Dette taler egentlig for å ha en stor «verktøykasse», dvs. tilgang til mange ulike transportmodeller. Det finnes imidlertid begrenset med midler til modellutvikling og noen typer analyser (f.eks. NKA til Nasjonal transportplan) krever også etterprøvnbarhet i beregningene og forutsetningene. Dette kan fort bli vanskelig/umulig å opprettholde ved bruk av mange forskjellige modeller.

Med tanke på langsiktig modellutvikling er det derfor viktig å se videre på behovene som finnes, dvs. hvilke tiltak og framtidsscenarioer vi ønsker å kunne fange opp og hvilke brukerkrav som finnes til modellene. Deretter kan vi velge hvilke modelltyper vi bør satse på basert på hvordan ulike modeller kan møte disse behovene.

For detaljerte analyser i by anbefaler vi videreutvikling av agent-baserte modeller og – på sikt – integrering med aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller og arealbruksmodeller.

Dette står også i sammenheng med argumentet om at TraMod_By på mange måter har tatt ut sitt potensial, og at det ikke er hensiktsmessig å presse inn flere elementer i modellkonseptet og kildekoden.

Det finnes muligheter for å ta i bruk og utvikle mer funksjonalitet i Cube. Videre bruk av *Cube Voyager* har i midlertidig noen fundamentale begrensinger fordi modellen er statisk og makroskopisk. Innenfor Cube-rammeverket kan man vurdere å ta i bruk en mesoskopisk avviklingsmodell i form av *Cube Avenue*²⁵. Å ta i bruk et slikt system vil kreve at man øker (norsk) kompetanse på disse modellene, og at man på sikt utvikler dynamiske etterspørselsmodeller som kan koples opp mot slike typer modeller uten at det krever uheldige datatransformasjoner og informasjonstap.

For dynamiske etterspørselsmodeller anbefales det å utvikle modeller som er mikroskopiske (agent-baserte) og aktivitetsbaserte. Disse modellene har en rik, realitetsnær og intuitiv datastruktur. MATSim kan være et egnet rammeverk for å komme i gang med slike nye typer modeller. At rammeverket er åpen kildekode og har moduler som bygger på koder og erfaringer fra internasjonale miljøer gjør det mulig å ta i bruk modellen forholdsvis raskt. Nye datatyper (som «stordata RVU») vil på sikt også gi bedre og større datagrunnlag for å etablere og estimere aktivitetsplaner og underliggende adferdsparametere for agent-baserte og aktivitetsbaserte modeller. Videre har man i senere tid brukt en metode innenfor generativ KI til å generere slike aktivitetsplaner (Flügel et al., 2024).

²⁵ <https://www.bentley.com/en/products/product-line/mobility-simulation-and-analytics/cube-avenue>

Referanser

- ADL/TØI. (2021). *NY PRISMODELL I OSLO OG VIKEN*.
<https://ruter.no/globalassets/dokumenter/ruterrapporter/2022/ny-pris-og-betalingsmodell-vedlegg.pdf>
- Adnan, M., Pereira, F. C., Azevedo, C. L., Basak, K., Lovric, M., Raveau, S., Zhu, Y., Ferreira, J., Zegras, C., & Ben-Akiva, M. (2016). *SimMobility: A Multi-scale Integrated Agent-Based Simulation Platform*.
- Anda, C., Erath, A., & Fourie, P. J. (2017). Transport modelling in the age of big data. *International Journal of Urban Sciences*, 21(sup1), 19-42. <https://doi.org/10.1080/12265934.2017.1281150>
- Bischoff, J., Márquez-Fernández, F. J., Domingues-Olavarría, G., Maciejewski, M., & Nagel, K. (2019, 5-7 June 2019). Impacts of vehicle fleet electrification in Sweden – a simulation-based assessment of long-distance trips. 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS),
- Bischoff, J., & Nagel, K. (2017). Integrating explicit parking search into a transport simulation. *Procedia Computer Science*, 109, 881-886. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.414>
- Diallo, A. O., Gloriot, T., & Manout, O. (2023). Agent-based simulation of shared bikes and e-scooters: the case of Lyon. *Procedia Computer Science*, 220, 364-371.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.047>
- Flügel, S., Flötteröd, G., Ringdahl, R., & Weber, C. (2023). *TraModSim: an open-source tool to add dynamic traffic assignment to a traditional travel demand model*. 1993/2023.
- Flügel, S., Halse, A. H., Hulleberg, N., & Jordbakke, G. N. (2019). *Estimating the effect of vehicle automation on car drivers' and car passengers' valuation of travel time savings* 41th Annual Meeting of the Norwegian Association of Economists Tromsø.
- Flügel, S., & Hamre, T. N. (2019). *En ny modell for forskyvning av reisetidspunkt i regionale transportmodeller*. TØI-rapport, 1727/2019.
- Flügel, S., & Hulleberg, N. (2023). Aversion to In-vehicle Crowding before, during and after the COVID-19 pandemic – an update with post-COVID data from autumn 2022 [update of 2022 article published in Findings].
- Flügel, S., Kern, J., & Bockemühl, F. (2016). Trondheim. In A. e. a. Horni (Ed.), *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.5334/baw.94>
- Flügel, S., Madslie, A., Hulleberg, N., Steinsland, C., & G., J. B. (2021). *Transportmodeller mot fremtiden. Muligheter for forbedrede modeller med fokus på reiser i byområder*. TØI-rapport 1819/2021.
- Flügel, S., Weber, C., Klommestein, S. S., Korsmo, J., & Kielland, A. (2024). *Towards activity-based demand modelling for the Greater Oslo Area - Using machine learning to predict travel mode choice and activity plans*. Utkast til TØI-rapport.
- Flügel S., Caspersen E., Angell T., Fearnley N., & C.K., K. (2015). *Markedspotensialmodell for Oslo og Akershus (MPM23) – Dokumentasjon og brukerveiledning for versjon 1.0*. TØI-rapport, 1451/2015.
- Flügel S., & Jordbakke G.N. (2017). *Videreutvikling av markedspotensialmodell for Oslo og Akershus (MPM23 v2.0)*. TØI-rapport, 1596/2017.
- Fridstrøm, L., & Østli, V. (2018). *Etterspørselen etter nye personbiler analysert ved hjelp av modellen BIG*. 1665/2018.

- Fu, X., & Lam, W. H. K. (2018). Modelling joint activity-travel pattern scheduling problem in multi-modal transit networks. *Transportation*, 45(1), 23-49. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9720-8>
- Hamre, T. N., & Rekdal, J. (2024). *Videreutvikling av etterspørselsmodeller 2018-2024*
- Haraldsen, & Eriksson. (2020). *Rabatter och framtida prissättning av kollektivtrafiken i Östergötland. Genomgång av rabatter, scenarioanalys och dokumentation av prismodellen*. 138/2020.
- Hassine, S. B., Kooli, E., & Mraih, R. (2024). Dynamic Pricing and Route Guidance: A Multi-Agent System for Effective Parking and Traffic Management. *Transportation Research Record*, 0(0), 03611981241231802. <https://doi.org/10.1177/03611981241231802>
- Homleid, T., Wahlquist, H., & Bjørkås, E. (2022). *Ada. Disaggregert valgmodell for transportanalyser*.
- Hägerstrand, T. (1970). WHAT ABOUT PEOPLE IN REGIONAL SCIENCE?
- Høyem, H., Tørset, T., Berg, M., Birkeland, T., Alstad, S., Svorstøl, E., W. Haug, T. W., & Suleng, H. (2020). *Integrering av RTM og Aimsun - En vurdering og testing av muligheter*. 108/2020.
- Kaddoura, I. (2015). Marginal Congestion Cost Pricing in a Multi-agent Simulation Investigation of the Greater Berlin Area. *Journal of Transport Economics and Policy*, 49(4), 560-578. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:tpe:jtecpe:v:49:y:2015:i:4:p:560-578>
- Meland, S., Sondell, R. S., & Madero, A. (2020). *Regulering av mikromobilitet*. 2020:00191. S. Community.
- Meyer de Freitas, L., Schuemperlin, O., Balac, M., & Ciari, F. (2017). Equity Effects of Congestion Charges: An Exploratory Analysis with MATSim. *Transportation Research Record*, 2670(1), 75-82. <https://doi.org/10.3141/2670-10>
- Mitropoulos, L., Tzouras, P. G., Antoniou, E., Karolemeas, C., & Kepaptsoglou, K. (2023). An agent-based model approach for simulating e-scooter routing. *Transportation Research Procedia*, 72, 941-948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.521>
- Nguyen, J., Powers, S. T., Urquhart, N., Farrenkopf, T., & Guckert, M. (2021). An overview of agent-based traffic simulators. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 12, 100486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100486>
- Norconsult. (2020). *Bompenger og timesregel i RTM23+*. Prosam report, 236.
- Ranheim, P. (2017). *Trenklin versjon 3, Dokumentasjon og brukerveiledning*.
- Recker, W. W. (1995). The household activity pattern problem: General formulation and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(1), 61-77. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)00023-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)00023-S)
- Steinsland, C., Madslie, A., Johansen, K. W., & Wangsness, P. B. (2022). *Konseptvalgutredning veibruksavgift og bompenger, vedlegg 6-3 Transportmodellberegninger TØI-rapport, 1921/2022*.
- Tørset, T., Malmin, O. K., Flaata, E. H., & Hjelkrem, O. A. (2022). *Cube – Regional persontransportmodell versjon 4.4*
- Västberg, O. B., Karlström, A., Jonsson, D., & Sundberg, M. (2020). A Dynamic Discrete Choice Activity-Based Travel Demand Model. *Transportation Science*, 54(1). <https://EconPapers.repec.org/RePEc:inm:ortrsc:v:54:y:2020:i:1:p:21-41>
- Wegener, M. (2014). Land-Use Transport Interaction Models. In M. M. Fischer & P. Nijkamp (Eds.), *Handbook of Regional Science* (pp. 741-758). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23430-9_41

Vedlegg A: Liste over trafikksimuleringsmodeller

Kilde: Nguyen et al. (2021):

- **Fully Agent-Based:** MATSim (Horni et al., 2016), ITSUMO (Bazzan et al., 2010), MovSim (Treiber and Kesting, 2010), MASCAT (Guériau et al., 2016), MATISSE (Torabi et al., 2018), POLARIS (Auld et al., 2016), AgentPolis (Jakob and Moler, 2013), OPUS (Waddell et al., 2006), MOSAIC (Czura et al., 2015), MARS (Weyl et al., 2018), SimMobility (Adnan et al., 2016), SITRAS (Hidas, 1998), ArchiSim (Champion et al., 2001), SEMSim (CityMOS) (Xu et al., 2012), JTSS (Tao and Huang, 2009), Megaffic + XAXIS (Osogami et al., 2012), SD-Sim (Dumbuya et al., 2002), SM4T (Zargayouna et al., 2014), VCTS (Chaurasia et al., 2010), SIMTUR (Nakamiti et al., 2012), MUST (Pathania et al., 2013), CAMiCS (Levesque et al., 2008), OpEMCSS (Clymer, 2002), DEFACTO (Schurr et al., 2005), MAGE (Banos and Charpentier, 2007), CityScape (Ion et al., 2015), BAE Systems (Handford et al., 2011), AITSPS (Zhou and Zhao, 2010), SeSAm (Klügl et al., 2006), IMAGES (Yoo et al., 2009), Mobiliti (Chan et al., 2018), CUPSS (Wang et al., 2004), KLMTS1.0 (Chen and Pang, 2008), CARLA (Dosovitskiy et al., 2017), AgentStudio (Radecký and Gajdoš, 2008), ILUTE (Salvini and Miller, 2005), SIMULACRA (Batty et al., 2013), TransWorld (Wang, 2010)
- **Featuring Agent-Technology:** ATSim (Chu et al., 2011), FastTrans (Thulasidasan et al., 2009)
- **Not Agent-Based:** TRANSIMS (Institute, 1999), SUMO (Krajzewicz et al., 2002), OpenTraffic (Miska et al., 2011; Tamminga et al., 2014), CONTRAM (Taylor, 2003), PTV VISSIM/VISUM (Fellendorf, 1994), GETRAM/AIMSUN (Barceló and Casas, 2005), PARAMICS (Cameron and Duncan, 1996), MITSIM (Yang et al., 2000), FreeSim (Miller and Horowitz, 2007), TSIS/CORSIM (Owen et al., 2000), VATSIM (Lei et al., 2001), DRACULA (Liu, 2010), RENAISSANCE (Wang et al., 2006), SimTraffic (Sorenson and Collins, 2000), DynaMIT (Ben-Akiva et al., 1998), DYNASMART (Mahmassani and Peeta, 1993), MITSIMLab (Yang and Koutsopoulos, 1996), CUBE Voyager (Bentley Systems, 2021), PELOPS (Wallentowitz et al., 1999), TransModeler (Balakrishna et al., 2009), Dynameq (Mahut and Florian, 2010), CORFLO (Lieu et al., 1992), PACSIM (Cornelis and Platbrood, 2002), SIMSCRIPT II.5. (Bernhard and Portmann, 2000), CTSP (Elci and Zambakoğlu, 1982), CityMob (Martinez et al., 2008), VanetMobiSim (Härri et al., 2006), FIVIS (Schulzyk et al., 2007), THOREAU (Wang and Glassco, 1995), GENIVI (Wang et al., 2018), SLX (Henriksen, 2000), SALT (Song and Min, 2018), SIM-ENG (Creagh, 1999), KAIST (Kwon et al., 2001), UMTSM (Zhang et al., 2009), SES/MB (Chi et al., 1995), SISTM (Hardman, 1996), INTERGRATION (Van Aerde et al., 1996), MATDYMO (CHOI et al., 2006), TRANSYT (Byrne et al., 1982)

Vedlegg B: ridesharing as a cooperative game with agent-based models

We built a toy model for ridesharing to illustrate some game-theoretic aspects that can be important to consider in a situation where individuals face the decision of whether to drive alone, offer a ride-share or request to ride-share. The scenario echoes the intricate balance of choices and consequences reminiscent of the El Farol Bar Problem, as conceptualized by W. Brian Arthur, where no pure strategy Nash equilibrium exists. A predominant inclination to drive alone increases congestion, leading to increased travel times for everyone. While collectively, agents recognize the benefits of reduced congestion through ridesharing, individually, the prospect of ridesharing introduces disincentives. Offering a ride-share incurs transaction costs, and requesting one often means compromising on departure times²⁶. The paradoxical nature of this situation reveals that ridesharing becomes appealing only when a significant number of participants are willing to offer it. In isolation, an agent would prefer driving alone, especially if others are ridesharing, thus mitigating congestion. From a societal perspective, there exists an optimal proportion of ridesharing that minimizes overall costs and travel times, yet individually, agents are inclined towards driving alone, even at its optimum. Addressing this conundrum requires an "explore and learn" approach, facilitated by a co-evolutionary algorithm, to simulate and understand the evolving preferences and decisions of agents within this complex adaptive system.

In our toy model, we have 60 agents, each assigned a unique index from 1 to 60, with the intention to depart for work at a minute interval from 8:01 to 9:00 AM. Every agent possesses a car capable of accommodating three additional passengers, enabling a maximum of four agents per vehicle. The agents engage in a simultaneous play of strategies without prior knowledge of others' actions, choosing to either drive alone, offer a rideshare, or request a rideshare. Ridesharing requests are allocated to the nearest neighbor who has offered to share a ride, to minimize waiting times. However, requests can be rejected if the car is already at capacity, in this case the agent will drive alone, but still incur the transaction cost. The performance of each agent is measured by a negative sum of transaction costs for those offering or requesting ridesharing, travel costs which are uniform for all agents but vary inversely with the total number of cars (reflecting the reduction in travel time through ridesharing), and waiting time costs for those who request and are granted a ride (drivers leave at their preferred time). Over 200 days, agents update their strategies based on previous days' outcomes; initially, all agents drive alone. After the first day, 70% retain their last strategy, 10% randomly select one of the three strategies for whether they want to rideshare or not, and 20% adopt the best strategy based on their average score from the last ten days, allowing for a dynamic adjustment process that reflects both routine and adaptive behavior.

In the numerical example we set minimum (maximum) travel time to 20 (1200) minutes and assume that a minute of waiting times is equally bad as a minute of travel time.

We show results from two runs: a) with transactions costs of 100 NOK (Figure 0-1), b) without transaction costs (Figure 0-2).

²⁶ Although not explicitly considered here, it's assumed that any increase in travel time due to detours is offset by the savings in travel costs.

Muligheter for forbedret modellering av transporttiltak i by



Figure 0-1: Chosen strategies and resulting occupancy over 200 iterations; scenario with high transaction costs

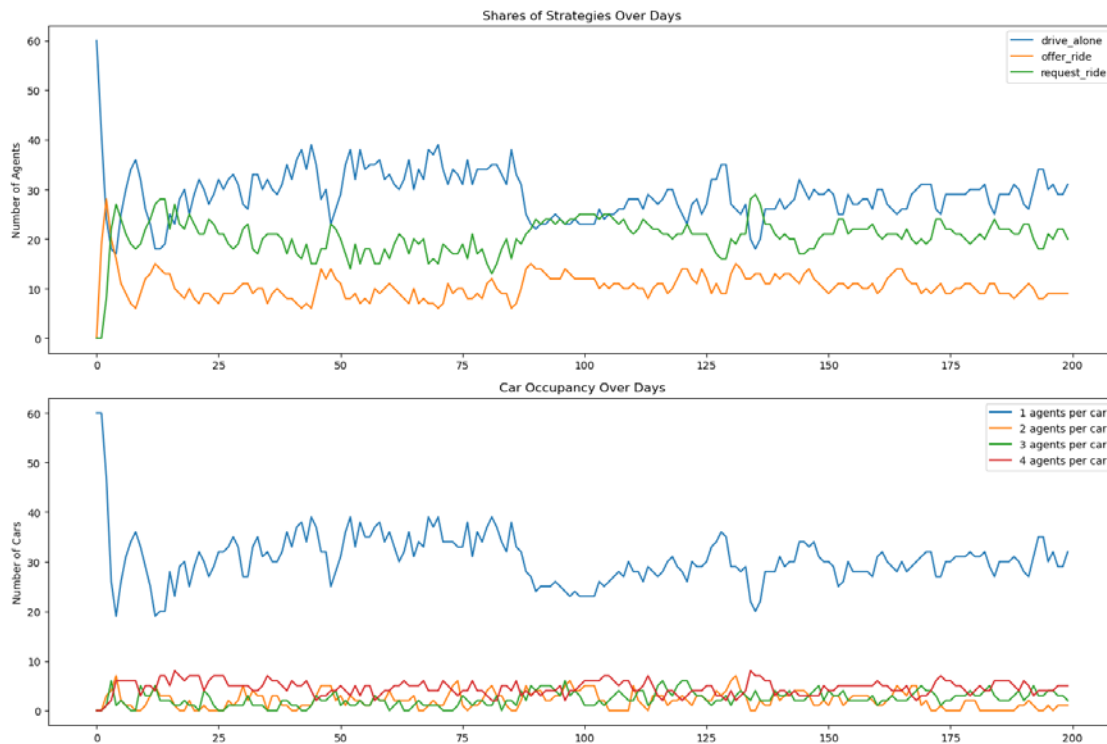


Figure 0-2: Chosen strategies and resulting occupancy over 200 iterations; scenario with no transaction costs.

In the scenario with high transaction costs, we see from Figure 0-1 that most agents play the “drive alone” strategy after a period of testing ridesharing. With numerical calibration it seems that transaction costs of offering or requesting ridesharing do not justify the reduced travel times.

In the “no transaction cost” scenario, we see that around $\frac{1}{2}$ of agents play “drive alone”, $\frac{1}{3}$ play “request drive” and $\frac{1}{6}$ play “offer write”. This yields to increased occupancy and less congestion.

The numerical example suggests that lowering transaction costs may yield to societal preferable outcomes. Lower transaction costs can be achieved with tools like ride-sharing apps that reduce the burden of coordination.

TØI er et anvendt forskningsinstitutt som mottar basisbevilgning fra Norges forskningsråd og gjennomfører forsknings- og utredningsoppdrag for næringsliv og offentlige etater. TØI ble opprettet i 1964 og er organisert som uavhengig stiftelse.

TØI utvikler og formidler kunnskap om samferdsel med vitenskapelig kvalitet og praktisk anvendelse. Instituttet har et tverrfaglig miljø med rundt 90 høyt spesialiserte forskere.

Instituttet driver forskningsformidling gjennom TØI-rapporter, artikler i vitenskapelige tidsskrifter, bøker, seminarer, samt innlegg og intervjuer i media. TØI-rapportene er gratis tilgjengelige på instituttets hjemmeside www.toi.no.

TØI dekker alle transportmidler og temaområder innen samferdsel, inkludert trafiksikkerhet, kollektivtransport, klima og miljø, reiseliv, reisevaner og reiseetterspørsel, arealplanlegging, ITS, offentlige beslutningsprosesser, næringslivets transportbehov og generell transportøkonomi. Instituttet deltar aktivt i internasjonalt forskningssamarbeid, med særlig vekt på EUs rammeprogrammer.

Transportøkonomisk institutt krever opphavsrett til egne arbeidere og legger vekt på å opptre uavhengig av oppdragsgiverne i alle faglige analyser og vurderinger.

Postadresse:

Transportøkonomisk institutt
Postboks 8600 Majorstua
0349 Oslo
Norge

Kontoradresse:

Forskningsparken
Gautstadalléen 21

E-post: toi@toi.no

Hjemmeside: www.toi.no

