



# Transportmodeller mot fremtiden

## Muligheter for forbedrede modeller med fokus på reiser i byområder

Stefan Flügel  
Anne Madslien  
Nina Hulleberg  
Christian Steinsland  
Bjørn Gjerde Johansen

Forsidebilde: Shutterstock

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.

ISSN 2535-5104 Elektronisk

ISBN 978-82-480-978-82-480-2347-0 Elektronisk

Oslo, april 2021

**Tittel:** Transportmodeller mot fremtiden. Muligheter for forbedrede modeller med fokus på reiser i byområder.

**Title:** A forward-looking perspective on Norwegian transport models. Opportunities for improved models with a focus on travel in urban areas.

**Forfattere:** Stefan Flügel  
Anne Madslien  
Nina Hulleberg  
Christian Steinsland  
Bjørn Gjerde Johansen

**Authors:** Stefan Flügel  
Anne Madslien  
Nina Hulleberg  
Christian Steinsland  
Bjørn Gjerde Johansen

**Dato:** 04.2021  
**TØI-rapport:** 1819/2021  
**Sider:** 56  
**ISSN elektronisk:** 2535-5104  
**ISBN elektronisk:** 978-82-480-2347-0  
**Finansieringskilde:** Statens vegvesen

**Date:** 04.2021  
**TØI Report:** 1819/2021  
**Pages:** 56  
**ISSN:** 2535-5104  
**ISBN Electronic:** 978-82-480-2347-0  
**Financed by:** Norwegian Public Road Administration

**Prosjekt:** 4979 transportmodeller for fremtiden  
**Prosjektleder:** Stefan Flügel  
**Kvalitetsansvarlig:** Kjell Werner Johansen  
**Fagfelt:** Transportmodeller  
**Emneord:** Transportmodeller, modellutvikling, mikrosimuleringer, robotaxi

**Project:** 4979 transport models for the future  
**Project Manager:** Stefan Flügel  
**Quality Manager:** Kjell Werner Johansen  
**Research Area:** Transport Methods  
**Keywords:** Transport models, model development, micro simulation, robotaxi

#### Sammendrag:

Rapporten beskriver behov og muligheter for modellutvikling for personreiser i Norge. Det identifiseres flere begrensninger i dagens transportmodellsystem grunnet den statiske og makroskopiske modelltilnærmingen. Rapporten omhandler blant annet agentbaserte modeller, som er en nyere type modell som kan bidra i transportanalyser i byer og for effektberegning av nye tiltak og transportformer som f.eks. robotaxier.

Det anbefales parallelle løp for modellutvikling der en både videreutvikler dagens transportmodellsystem på kort og mellomlang sikt og samtidig satser på nye mer dynamiske transportmodeller. Dette vil sikre at transportmodeller får økt relevans for å bidra til utvikling av transportsystemene i fremtiden.

#### Summary:

The report describes needs and opportunities for model development for passenger travel in Norway. It identifies several limitations in the current transport model system due to the static and macroscopic model approach. The report deals with, among other things, agent-based models, which is a newer type of model that can contribute to transport analysis in cities and for prediction of effects of new measures and modes of transport such as robotaxies. Parallel runs are recommended for model development, where the current transport model system is both further developed in the short and medium term and at the same time focuses on new, more dynamic transport models. This will ensure that transport models gain more relevance to contribute to the development of transport systems in the future.

**Language of report:** Norwegian

Transportøkonomisk Institutt  
Gaugstadalléen 21, 0349 Oslo  
Telefon 22 57 38 00 - [www.toi.no](http://www.toi.no)

Institute of Transport Economics  
Gaugstadalléen 21, N-0349 Oslo, Norway  
Telephone +47 22 57 38 00 - [www.toi.no](http://www.toi.no)

# Forord

TØI og fire andre forsknings- og utviklingsmiljø har fått i oppdrag av Statens vegvesen å skrive hver sin rapport om behov og muligheter for videreutvikling av dagens transportmodeller, samt eventuell annen modellutvikling som kan forbedre strategisk planlegging for byområder.

Fortetting, teknologisk framgang og sosiale trender øker behovet for finkornete og dynamiske analyser. Denne rapporten beskriver begrensninger og forbedringsmuligheter for klassiske transportmodeller, samt muligheter for nyere typer modeller til å ivareta analysebehovet i fremtiden. Rapporten beskriver bl.a. hvordan nye mobilitetsformer som robotaxier vil kreve nye typer transportmodeller. Det anbefales parallelle løp for modellutvikling der en både videreutvikler dagens transportmodellsystem på kort og mellomlang sikt og samtidig satser på nye (mer dynamiske) transportmodeller. Dette vil sikre at transportmodeller beholder sin relevans for effektberegning i fremtiden.

Stefan Flügel har vært prosjektleder for arbeidet med rapporten. Anne Madslie, Nina Hulleberg, Christian Steinsland og Bjørn G. Johansen har bidratt med diskusjoner og rapportskrivning. Kjell Werner Johansen har kvalitetssikret rapporten.

Oppdragsgiver for prosjektet har vært Statens vegvesen, med Oskar A. Kleven som kontaktperson. Vi takker for et interessant oppdrag og for godt samarbeid.

Vi takker også Anne-Lene Sandberg for arbeidet med ferdigstilling av rapporten.

Oslo, april 2021

Transportøkonomisk institutt

*Bjørne Grimsrud*  
*Direktør*

*Kjell Werner Johansen*  
*Avdelingsleder*



# Innhold

## Sammendrag

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Bakgrunn</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Generelt om modeller og analysebehov</b> .....                   | <b>2</b>  |
| 2.1      | Typer modeller.....   | 2         |
| 2.2      | Topografi av transportmodeller.....                                 | 4         |
| 2.3      | Perspektiver på transportmodellering og paradigmeskifte.....        | 6         |
| 2.4      | Livssyklus for transportmodeller.....                               | 7         |
| 2.5      | Modellvalg i Norge.....   | 8         |
| 2.6      | Kanaler for modellutvikling i Norge.....                            | 10        |
| 2.7      | Trender som kan påvirke behov for transportmodellering.....         | 11        |
| <b>3</b> | <b>Videreutvikling av strategiske transportmodeller</b> .....       | <b>13</b> |
| 3.1      | Behov for videreutvikling.....                                      | 13        |
| 3.2      | Metodiske begrensinger.....   | 13        |
| 3.3      | Fleksibilitet i modellsystemet.....                                 | 15        |
| 3.4      | Mulige forbedringer i byer og byområder.....                        | 15        |
| 3.5      | Kobling mot andre verktøy og modeller.....                          | 22        |
| 3.6      | Nye datakilder.....   | 25        |
| <b>4</b> | <b>Nye metoder og modeller</b> .....                                | <b>27</b> |
| 4.1      | Motivasjon for nye modeller.....                                    | 27        |
| 4.2      | Metode for mikroskopisk og dynamisk trafikkavvikling.....           | 27        |
| 4.3      | Agent-baserte modeller (MATSim).....                                | 28        |
| 4.4      | LUTII-modeller.....   | 39        |
| 4.5      | Maskinlæring.....   | 39        |
| <b>5</b> | <b>Fremtiden og nye tiltak</b> .....                                | <b>41</b> |
| 5.1      | Nye transportformer, rammebetingelser og tiltak.....                | 41        |
| 5.2      | Robotaxier (delte autonome biler).....                              | 42        |
| <b>6</b> | <b>Anbefaling</b> .....   | <b>46</b> |
| <b>7</b> | <b>Referanser</b> .....   | <b>48</b> |
|          | <b>Vedlegg</b> .....  | <b>53</b> |
|          | Vedlegg A: Litt mer om aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller..... | 54        |
|          | Vedlegg B Metode for makroskopisk og statisk trafikkavvikling.....  | 56        |



## Sammenheng

# Transportmodeller mot fremtiden. Muligheter for forbedrede modeller med fokus på reiser i byområder

TØI rapport 1819/2020

Forfattere: Stefan Flügel, Anne Madslie, Nina Hulleberg, Christian Steinsland, Bjørn Gjerde Johansen  
Oslo 2021, 56 sider

*Matematiske transportmodeller som dekker alle reiser i Norge ble først utviklet fra 1989. Detaljeringsgrad, kvalitet på inndata og funksjonaliteten til transportmodellene er betydelig forbedret gjennom de 30 årene siden den gang, men den grunnleggende metodikken er uendret. Denne rapporten beskriver muligheter for modellutvikling for personreiser i Norge basert på dagens og fremtidens behov for transportanalyser. Rapporten omhandler bl. annet agentbaserte modeller som er en nyere type modell som kan være verdt å satse på videre, spesielt med tanke på reiser i by og byområder.*

## Bakgrunn og metode

TØI og fire andre forsknings- og utviklingsmiljø har fått i oppdrag av Statens vegvesen å skrive hver sin rapport om behov og muligheter for videreutvikling av dagens transportmodeller, samt eventuell annen modellutvikling som kan forbedre strategisk planlegging for byområder. TØI er bedt om å dekke fire av temaene:

### Byer og byområder

- Nye metoder og modeller
- Videreutvikling av dagens modellsystem
- Fremtiden

Metoden for denne rapporten har vært å sammenstille relevante bidrag fra tidligere arbeid (intern og ekstern litteratur), i tillegg til at behov og muligheter er diskutert med ulike forskere på TØI.

## Modellvalg og modellutvikling i Norge

Rapporten beskriver sentrale kjennetegn ved modeller i Norge (Pingo, RTM/NTM6, Trenklin, MATsim Aimsun) og poengterer at modellvalg ideelt sett bør ta utgangspunkt i analysebehovet: Forventer man store og langsiktige effekter bør man bruke generelle likevektsmodeller og/eller strategiske transportmodeller. Forventer man detaljerte og dynamiske effekter bør man bruke dynamiske modeller eller simuleringsmodeller.

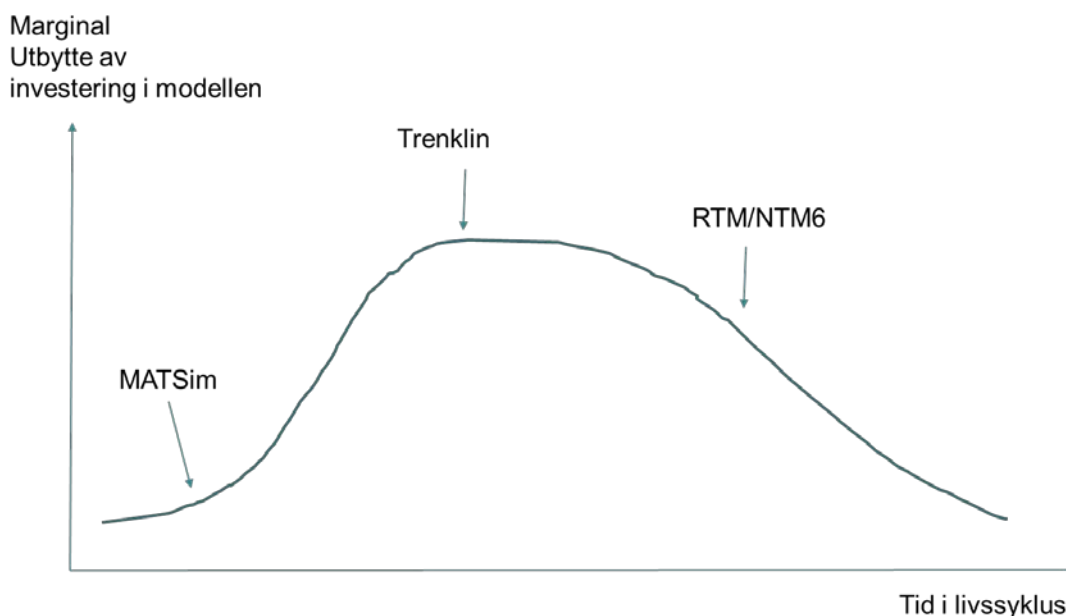
I Statens vegvesen og i NTP-arbeidet er strategiske transportmodellsystemer (RTM/NTM6) den desidert mest brukte type transportmodell. Ved mange analyser drar systemet bestående av RTM og NTM6 store fordeler av at det er et etablert opplegg for å ta modellresultatene videre inn i nytte-kostnadsanalyser. En annen stor fordel er at modellsystemet dekker alle reiser innenfor Norge (med bil, fly, kollektiv og gang/sykkel).

At RTM i dag ikke kan brukes til å modellere trengsel på kollektivturer har vært en hovedmotivasjon for Jernbanedirektoratet til å utvikle sin egen transportmodell, Trenklin.



Fra et forskerperspektiv kan RTM/NTM6 oppleves som lite attraktiv siden den grunnleggende metodikken (firetrinnsmodeller) er veletablert og gir lite rom for vitenskapelig og nyskapende publisering i modellorienterte/tekniske journaler. Forskningsfronten har i flere ti-år dreid seg om dynamiske/simuleringsbaserte modeller, og i nyere tid agent-baserte transportmodeller (som MATSim).

Figur S1 er en veldig forenklet illustrasjon av livssyklus for noen av modellene som brukes i Norge.



Figur S1: Illustrasjon av livssyklus og marginalt utbytte av utviklingsressurser for ulike transportmodeller.

MATSim i Norge er helt i startfasen og det er høye oppstartskostnader forbundet med etablering av modeller og opplæring av fagpersoner.

Trenklin er en relativt ung modell som har «overlevd» oppstartfasen og har vist seg relevant i praksis. Modellen har fortsatt rom for betydelige forbedringer. Forbedringer kan trolig gjennomføres med relativt lave utviklingskostnader (R&D) siden det finnes et tilstrekkelig antall fagpersoner som kan jobbe videre med modellen uten store opplæringskostnader.

RTM/NTM6 er en veletablert modell og det finnes mange fagpersoner som kan jobbe med forbedringer i systemet. Samtidig kan det argumenteres for at det kan være vanskelig å hente ut så mye mer med denne metodikken. Det er for eksempel veldig kostbart med tanke på ytterligere beregningstid å øke antall soner, segmenter eller tidsperioder. Når det er sagt så er fordelene med RTM/NTM6-systemet (se lenger opp) så sentrale at det er vanskelig å forestille seg at modellsystemet kan erstattes i Norge på kort og mellomlang sikt.

To viktige elementer i forbindelse med kanaler for utvikling av nye modeller i Norge er at 1) Norges forskningsråd (NFR) har tematiske utlysninger som kan gjøre det vanskelig å få finansiering for større prosjekter som har modellutvikling som hovedtema, 2) I motsetning til i Sverige og Danmark så finnes det i Norge ikke noe stort akademisk miljø som driver med transportmodeller og modellutvikling.

## Trender som kan påvirke behov for transportmodellering

Det er flere trender i transportsektoren som er relevante med tanke på videre modellutvikling:

- Fortetting og urbanisering
  - Bytransport blir relativt viktigere framover
  - Økt behov for å kunne modellere kø og trengsel på en tilfredsstillende måte
  - Mer fokus på sykling og gåing
  - Mulighetene for å parkere innskrenkes og det blir dyrere
- Elektrifisering
  - Heterogenitet i bilparken (effekt på transportkostnader mm)
  - Forbud/utfasing av personbiler med forbrenningsmotor
- Automatisering og nye egenskaper ved transportmidler
  - Førerløse biler og deres effekt på tidsverdi, trafikkavvikling, og etterspørsel etter bil
  - Automatisering innenfor kollektivtransport
- Delingsøkonomi / Mobility-as-a-service
  - Tradisjonell bildeling (uten automatisering)
  - Effekt på bilhold og biltilgang
  - Robotaxier (gitt automatisering) som nytt transportmiddel
    - Redusert transportkostnad
    - Økt biltilgang og etterspørsel
    - Tomkjøring
    - Tilgjengelighet /ventetid for robotaxier gitt (komplekst/dynamisk) samspill mellom etterspørsel og transporttilbud
    - Forbedret tilbringertransport til kollektivruter
- Mikromobilitet (elektriske sparkesykler el.)
  - Nye transportmidler, økt fleksibilitet
- Teknologitviking for øvrig
  - GPS-tracking og mulighet for dynamisk veiprisering
  - 5G mobilnett og superrask oppkobling av personer og kjøretøy
  - Nye muligheter for management og kontroll av trafikkavvikling
  - Nye underholdningsformer som kan brukes mens man reiser (VR-briller)
  - Økt konnektivitet (for eksempel økt mulighet for å organisere samkjøring («ride-sharing»))
- Mer fleksible arbeidsformer
  - Færre reiser til/fra arbeid, modellering av valg mellom hjemmekontor og «kontor-kontor»
  - Modellering av valg av reisetidspunkt
- Flere sammensatte reiser
  - Sanntidsinformasjon
  - Nye forretningsmodeller
- Arealpolitikk. Byvekstavtalene er blant annet basert på et samspill mellom transporttiltak og arealtiltak
  - Knutepunktutvikling

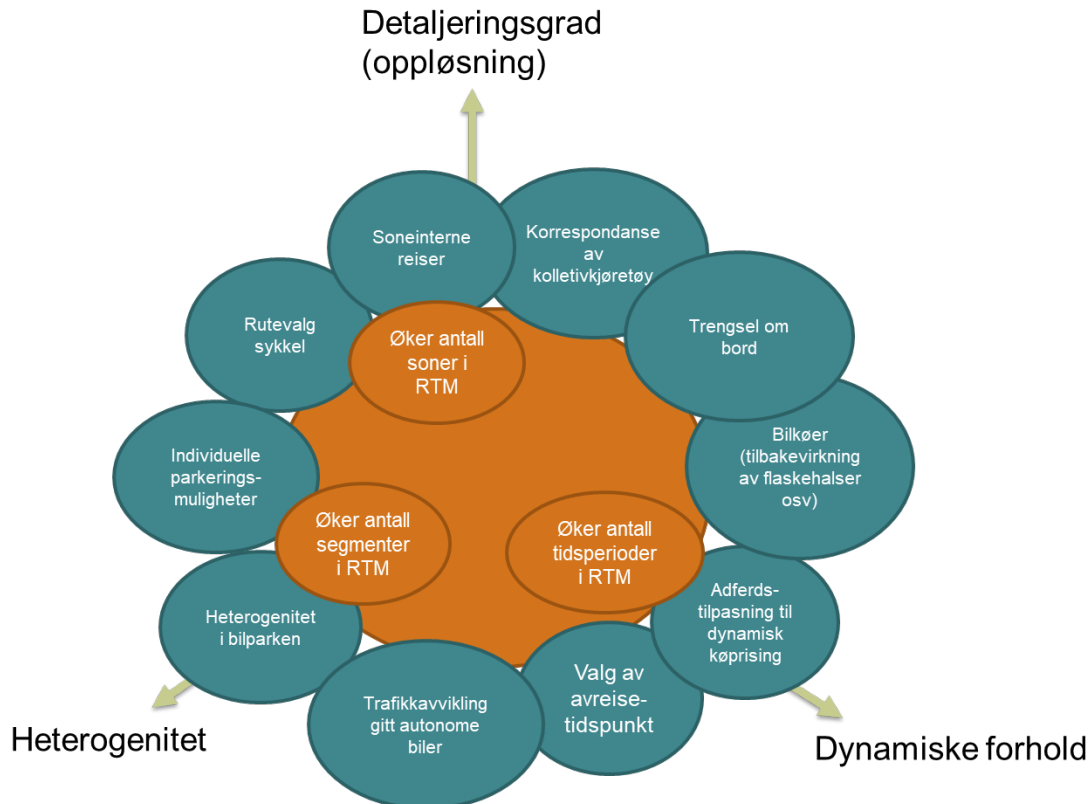
Den generelle tendensen er at tiltak i by og tiltak som har en dynamisk karakter blir mer etterspurt.

Rapporten beskriver at RTM er et noe ufleksibelt modellsystem og at den er kalibrert mot dagens adferd og teknologi. Det kan derfor være utfordrende å modellere trendbrudd i RTM.

## Videreutvikling av RTM

Muligheter og utfordringer ved videreutvikling av RTM er knyttet til begrensninger som ligger i et statisk og makroskopisk rammeverk.

Innenfor det metodiske rammeverket kan RTM forbedres på dimensjonene detaljeringsgrad, heterogenitet og dynamiske forhold ved at en henholdsvis kan øke antall soner, øke antall befolkningssegmenter og øke antall tidsperioder. Disse forbedringer kan bidra til at RTM blir bedre, men det vil ikke føre til det ønskede presisjonsnivå for flere elementer og tiltak. Det er illustrert i figur S2.



Figur S2: Illustrasjon av noen elementer som det kan være vanskelig å oppnå høyt presisjonsnivå på, selv om man øker antall soner, segmenter og tidsperioder i RTM.

Vi har likevel skissert noen videreutviklingsmuligheter for byområder knyttet til:

- *Gang og sykkel*
  - En modell basert på soneinndeling er ikke ideelt for å analysere gang/sykkel, men vi tror at det ligger et forbedringspotensial i hvordan GS-turer nettutlegges og hvilken rutevalgsalgoritme som brukes i CUBE.
- *Kollektiv*
  - Også for kollektivreiser er sonestrukturen en utfordring, spesielt der det er store soner. Det kan også være nyttig å se nærmere på ventetidsberegning for ruter med lav frekvens, og muligens på nytt vurdere om tidtabeller kan være nyttig. Dette forutsetter at en tidligere «bug» knyttet til denne funksjonaliteten er rettet i Cube.

- *Bompenger*
  - Fremvekst av avanserte bompengesystemer i noen av de store byene stiller høyere krav til modellering av bompengene i modellen, spesielt knyttet til håndtering av timesregel. Det er også en utfordring at det gjøres gjennomsnittsbetraktninger for biler med ulike takster, som elbiler og biler med forbrenningsmotor. På sikt kan dette endre seg, dersom det blir en vridning mot andre betalingsystemer som dynamisk vegprising.
- *Parkering*
  - Siden parkeringstilgjengelighet og parkeringskostnader er blant de viktigste forklaringsvariabler for valg av transportmiddel (og bilhold), anbefaler vi at det gjøres en oppdatering av kostnader i dagens modellversjon og en ny vurdering av muligheter til en mer presis og enhetlig modellering av parkeringstiltak .
- *Mobile tjenesteytere*
  - God oversikt over transportmønsteret for mobile tjenesteytere er viktig i forbindelse med beregninger knyttet til nullvekstmålet. Det er imidlertid vanskelig å skille ut disse turene fra dagens RVU, men kunnskapen kan forbedres ved at en også tar i bruk andre datakilder. I forbindelse med Bylogistikkprogrammet jobbes det noe med problemstillingen og vi anbefaler en samordning med arbeidet som gjøres der.
- *Skolereiser*
  - Dagens skolemodell er svært forenklet og det er stort rom for forbedring, bl.a. bør den videreutvikles på en slik måte at transportmiddelfordelingen vil påvirkes av tiltak i transporttilbudet. Det bør også undersøkes om det finnes data som kan bidra til bedre estimering av bosted for studenter.
- *Sammensetting av bilparken*
  - Bruk av nye RVU data til å lage en segmentering etter drivstofftyper i bilholdsmodellen og modell for destinasjon- og transportportmiddelvalg.

Vi beskriver også muligheter for kobling av RTM mot andre verktøy/modeller som Aimsun, areabruksmodeller (LUTI) og modeller for forskyvning av tidsperioder.

Nye og bedre inndata er et satsningsområde man har jobbet mye med tidligere og hvor det fortsatt kan være behov for forbedringer og innovasjoner. Rapporten nevner flere nye datakilder som kan tenkes brukt for modellkalibrering. Rapporten omtaler også behov for mer detaljerte og representative reisevanedata.

## **Agentbaserte transportmodeller**

MATSim, som er et åpen-kilde rammeverk for agentbasert transportmodellering, er nærmere omtalt i rapporten, og vi har oppsummert noen fordeler og ulemper.

Fordelene ved MATSim ligger i:

- Metodiske fordeler som følge av dynamisk og mikroskopisk tilnærming, deriblant:
  - Modellering av avreisetidspunkt
  - Eksplisitt modellering av kødannelse, for eksempel tilbakevirkning av flaskehalser
  - Modellering av soneinterne reiser og reiser mellom nabosoner. En bruker eksakte koordinater og ikke sone som start- og endepunkt for reisene.
  - Realistisk modellering av rutevalg
  - Man kan segmentere resultater etter alle ønskede dimensjoner som det foreligger data for

- Fleksibel modellstruktur
  - Relativt enkelt å videreutvikle modellen
  - Eksisterende opplegg («extensions») for autonome taxier
  - Mulighet for å erstatte enkelte modellkomponenter
  - Fleksibel aggregering av resultater
- Åpen-kilde og gratis (men uten brukersupport)
- Forsøker å etterligne virkelige prosesser, og fremstår dermed som intuitiv.

Ulemper med MATSim inkluderer:

- Ingen langsiktig adferdsmodellering i standardmodellen (reisefrekvens og destinasjonsvalg)
- Intet etablert opplegg for å ta modellresultater videre til nytteberegning
- Mer krevende kalibrering
- Kan være vanskelig å avlede underliggende årsak-virkningsmekanismer
- Lite erfaring med bruk i Norge

### Fremtiden

Teknologiske og sosiale trender vil medføre nye transportformer og nye politiske tiltak. Dette innebærer flere utfordringer for transportmodelleringen, noe som forsøksvis er sammenfattet i tabell S1.

Tabell S1: Forventete utfordringer ved modellering av nye transportformer, rammebetingelser og tiltak i RTM.

| Nye transportformer, rammebetingelser og tiltak       | Sannsynlige effekter på transportmarkedet                         | Utfordring for transportmodellering i strategiske transportmodeller (RTM)                                     |
|---|---|---|
| Mer differensierte timesregler for bompenger          | * Mindre etterspørselseffekter<br>* Endrede bompenginntekter      | * Identifikasjon av hvem som er berørt av timersregelen<br>* Mobile tjenesteytere                             |
| Dynamisk køprising                                    | * Etterspørselsvirkninger<br>* Endring i avreisetidspunkt         | * Ingen/begrenset overføring mellom tidsperioder  |
| Restriksjoner for bruk av biler med forbrenningsmotor | * Effekter på bilhold og el-bilandel                              | * Ingen heterogenitet av biler ved nettutlegging<br>* Valg av drivstofftype ikke del av etterspørselsmodellen |
| Sykkeltiltak (Sykkel-ekspressvei mm)                  | * Overført trafikk (og helse-gevinster)<br>* Endring i rutevalg   | * Problem med soneinterne reiser i regioner med grov soneinndeling  |
| Delte autonome biler (robotaxi)                       | * Bilhold<br>* Utforming av parkeringsplasser<br>* Trafikkflyt mm | * se under  |
| Øvrig «mobility-as-a-service» / bildeling             | * Redusert bilhold, men økt tilgang til bil                       | * Forbedringer i bilholdsmodell nødvendig mm  |

Robotaxier er nærmere omtalt i rapporten. Det kan forventes at RTM kan fange opp noen av effektene av autonome biler/robotaxier:

- Lavere tidsverdi
- Økt biltilgang
- Lavere kjørekostnader
- Bedre trafikkflyt (hvis enkelt modellert ved justering av VDF-funksjoner)

Andre effekter vil være vanskelige eller umulige å fange opp:

- Dynamikken mellom etterspørsel og tilbud som resulterer i
  - Ventetid for autonome taxier
  - Omfang av tomkjøring
- Potensial og omfang av ride-sharing
- Frigjøring av parkeringsarealer
- Detaljerte effekter på trafikkflyten
  - Løsning av flaskehalser
  - Effekten av at konvensjonelle biler og autonome biler deler veien
- Korrespondanse mellom autonome biler og tog/t-bane

Rapporten viser til en litteraturgjennomgang som har sammenstilt 26 internasjonale artikler som bruker transportmodeller for å analysere effekter av autonome biler. Av de 26 studiene er 17 gjennomført med agent-baserte modeller og kun 2 med makroskopiske modeller.

## Anbefaling

En satsing på transportmodeller for fremtiden bør ikke være bestemt av historiske forhold, men ta utgangspunkt i dagens og fremtidig behov for transportanalyse.

Vi har i denne rapporten prøvd å beskrive fremtidens utfordringer for transportmodellering, med spesielt fokus på reiser i byområder. Trafikken i byområder er dynamisk, og ønsket om å kunne modellere transport med dynamiske modeller kommer trolig til å øke ut fra teknologiske trender som for eksempel automatisering, og sosiale trender som etterspørsel etter mer individuell og tilpasset transport.

Tiltaksanalyser i byer kan også kreve et mer finkornet modellsystem som f.eks. bedre dekker gang- og sykkeltiltak. Agentbaserte simuleringsmodeller som ikke trenger et sonesystem og som modellerer adferd på enkeltperson(agent)-nivå virker attraktive for detaljerte analyseformål.

Behovet for mikroskopiske etterspørselsmodeller er noe lavere for «vanlige» nyttekostnadsanalyser som bruker enhetspriser for forbedringer i transport (f.eks. bruker samme tidsverdi for reisetidsbesparelser med et gitt transportmiddel). En makroskopisk modelltilnærming synes tilstrekkelig for dette formålet, så lenge den kan gi nøyaktige aggregerte estimater (f. eks. nettotidsbesparelse). Siden de fleste makroskopiske modeller er statiske, kan beregningen av reisetider i købelastede områder imidlertid være grov og unøyaktig.

Vi anbefaler en (langsiktig) satsning på dynamiske modeller med en meso-/eller mikroskopisk tilnærming for trafikkavvikling. Det er naturligvis avgjørende å ha fagfolk med tilstrekkelig kunnskap tilgjengelig. Dette stiller visse krav til utdanning og videreutdanning av forskerne og konsulenter i transportsektoren.

Det kan være ulike mål forbundet med modellutvikling. Flere mål kan ha et mer kortsiktig perspektiv og dreie seg om konkrete ting som skal forbedres i forbindelse med utredninger eller neste NTP. Andre mål har en mer langsiktig karakter. Ett mål kan for eksempel være å

lage en modell som kan analysere autonome biler/robotaxier på en god måte. **Eller** mer generelt at man bygger et modellsystem som bruker state-of-the-art metoder.

Tabell S2 skisserer noen mulige løp for modellutvikling som kan gjennomføres parallelt.

Tabell S2: Anbefalte løp for modellutvikling.

|  | Kortsiktig løp (RTM)  | Mellomlangt løp (RTM)  | Mellomlangt løp (andre modeller)  | Langt løp  |
|--|---|--|---|--|
| Tids-perspektiv  | < 4 år (til neste NTP)  | 4-10 år  | 4-10 år   | > 10 år  |
| Generelt mål   | Konkrete forbedringer i dagens modell-system med tanke på neste NTP   | Etablere ny og re-estimert versjon av modellsystemet   | Demonstrere egnethet og gjennomførbarhet av «state-of-the-art» modeller   | Etablering av et fullverdig modell-system basert på «state-of-the-art» metoder   |
| Eksempler på mulige konkrete mål                             | 1. Øke konsistens mellom transportmodeller og nytteberegning<br>2. Forbedre kvalitet/omfang av kalibrering og inndata | 1. El-biler som eget transportmiddel<br>2. Integrering av skolemodell i hovedmodell<br>3. Fange opp mikromobilitet | 1. Etablere agentbaserte modeller for de største 10 by-områder<br>2. Nettverks-simulering av biler, kollektiv og sykkel | 1. Etablere agentbaserte modell-systemer som dekker alle reiser og godstransport i Norge<br>2. Kobling mot mikroskopiske LUTI-modeller og /eller ABDM* |
| Sentrale stakeholders/ finansieringskilder                   | NTP-analysegruppe, SVV (modell- og nyttekostnads-gruppe)  | Ny rammeavtale for utvikling av neste versjon av RTM   | Forskningsråd, ulike nasjonale og regionale aktører (inkl. RUTER og PROSAM)   | Forskningsråd, Transportetater   |
| Sentrale aktører   | Konsulenter   | Transportforskere med god innsikt i RTM-systemet   | Transportforskere med relevant erfaring i dynamiske modeller, enkelte PhD-prosjekter                                    | Universitetssektor**, transportforskere  |
| Viktige elementer som kan bidra til vellykket implementering | Etablert kompetanse i Norge   | Samordning av prosjekter i felles prosjekt/rammeavtale   | Samarbeid med internasjonale eksperter  | Økt regnekraft, tilgang til (big) data og kunstig intelligens  |
| Foreslått bidrag fra et mulig etats-program i SVV 2021-2024  | Finansiering av enkelte prosjekter  | Forprosjekter  | Forprosjekter som bidrar til prosjekter som fremmer nye metoder   | Bidrag via mellomlangt løp   |

\* activity based demand models

\*\*for utdanning av personer som kan utvikle, bruke og vedlikeholde et state-of-the-art modellsystem

# 1 Bakgrunn

TØI og fire andre forsknings- og utviklingsmiljø har fått i oppdrag av Statens vegvesen å skrive hver sin rapport om behov og muligheter for videreutvikling av dagens transportmodeller, samt eventuell annen modellutvikling som kan forbedre strategisk planlegging for byområder. TØI er bedt om å dekke fire av temaene som er skissert i en lengre momentliste mottatt fra Statens vegvesen 4.12.2020. Disse fire temaene er:

- Byer og byområder
- Nye metoder og modeller
- Videreutvikling av dagens modellsystem
- Fremtiden

Rapporten konsentrerer seg om tre sentrale spørsmål som er nevnt i momentlisten i forbindelse med temaene, hvor vi har kombinert temaene *Byer og byområder* og *Videreutvikling av dagens modellsystem* i et felles punkt:

- Bruk og videreutvikling av modellsystemet, og da med spesielt fokus på byer og byområder. Hvordan kan modellsystemet forbedres?
- Bør vi tenke nytt når det gjelder hele eller deler av modellsystemet vårt? Hvilke nye metoder/modeller kan være aktuelle?
- Hvilke [nye] tiltak og effekter vil bli etterspurt i fremtiden og hvilke effekter er ønskelig for å bedre presisjonen på beregningene?

Disse spørsmålene er diskutert i henholdsvis kapittel 3, 4 og 5. Vi innleder med en oversikt over modeller og analysebehov i kapittel 2 og avslutter med anbefalinger i kapittel 6.

Metoden for denne rapporten har vært å sammenstille relevante bidrag fra tidligere arbeid (intern og ekstern litteratur), i tillegg til at behov og muligheter er diskutert med ulike forskere på TØI. Ideelt sett burde en ha intervjuet andre forskere og sentrale brukere/«stakeholders» i transportmodellmiljøet i Norge for å få en bedre oversikt over behov og muligheter for modellutvikling. Dette var ikke mulig innenfor rammene av dette prosjektet. Rapporten er dermed til en viss grad preget av forfatterens egen erfaring med modellutvikling.

Denne rapporten har en del overlapp med et tidligere notat, TØI arbeidsdokument 51533, datert 8.11.2019. Rapporten er imidlertid utvidet og tilpasset kravene fra oppdragsgiver, spesielt med tanke på forbedringer i dagens modellsystem (kapittel 3).



## 2 Generelt om modeller og analysebehov

### 2.1 Typer modeller

I dette kapittelet beskriver vi modeller på et overordnet nivå.

For å studere transporttiltak i Norge brukes det ulike modeller. De fleste transporttiltak som er geografisk spesifisert og har en form for nettverkseffekt<sup>1</sup>, analyseres med én (eller en kombinasjon) av disse typene modeller:

- Generelle likevektsmodeller (SCGE<sup>2</sup>)
- Strategiske transportmodellsystemer
- Dynamiske transportmodeller
- (Klassiske) trafikksimuleringsmodeller

Begrepet «dynamiske transportmodeller» er ikke vel etablert. Med dette mener vi her modeller som representerer transporttilbudet tidsavhengig, for eksempel med eksakte rute-tabeller (med minutt som enhet) eller med en «sekund-for-sekund» beskrivelse av trafikk-flyt. I motsetning til klassiske trafikksimuleringsmodeller, inkluderer «dynamiske transportmodeller» en (forenklet) etterspørselsmodellering. Dette gjelder både Trenklin (Ranheim 2016, Flügel og Ukkonen 2020) og MATSim (Horni mfl (2016a), Flügel mfl 2016).

Tabell 2.1 viser noen overordnede kjennetegn ved ulike type modeller, med utgangspunkt i de «norske» modeller.

---

<sup>1</sup> Vi ser altså bort fra 1) overordnede beregninger basert på elastisitetsberegninger og 2) modeller som ikke er nettverks/geografisk spesifisert, som f.eks. bilkjøpsmodellen BIG eller Ruter sin forenklet etterspørselsmodell MPM23.

<sup>2</sup> Spatial, computable, general equilibrium model

Tabell 2.1: Typiske kjennetegn ved modelltypene.

|   | Generelle likevektsmodeller                    | Strategiske transportmodeller  | Dynamiske transportmodeller  | Trafikk-simuleringsmodeller                              |
|---|--|--|--|--|
| Eksempler i Norge                       | Pingo  | RTM, RTM23+, NTM6  | Trenklin og MATSim   | Aimsun   |
| Typisk modellområde                     | Nasjonal                                       | Nasjonal/regional  | Regional/by  | By/lyskryss  |
| Adferdselementer                        | Bosetting, pendlermønstre, næringsstruktur, mm | Bilhold, reise-frekvens, valg av transportmiddel og destinasjon, rutevalg                    | Rutevalg, valg av avreisetidspunkt, valg av transportmiddel, valg av avgang (kollektiv)                                | Rutevalg, elementer ved bilkjøring («gap acceptance» ol) |
| Tidsoppløsning                          | År   | Døgn/time  | Minutt/sekund  | Sekund eller mindre                                      |
| Geografisk oppløsning                   | 90 regioner (i Pingo)                          | Grunnkretser (etterspørsel), lenker/noder (trafikkavvikling)                                 | Trenklin: Togstasjoner<br>MATSim: koordinater  | Lenke/enkelte infrastruktur (som lyanlegg)               |
| Representasjon av transporttilbud       | Eksogene endringer (via OD-matriser)           | Transportnettverk, Level-of-Service matriser, Volume-delay funksjoner                        | Rutetabeller, transportnettverk, materiell (kollektiv), veikapasitet   | Transportnettverk, veikapasitet, trafikklysanlegg        |
| Representasjon av transportetterspørsel | Eksogene OD-matriser (fra RTM/NTM6)            | Befolkning i segmenter/grunnkretser, Endogene OD-matriser                                    | Trenklin: referansematriser basert på passasjertelldata.<br>MATSim: Syntetisk reisebefolkning.                         | Eksogene OD-matriser                                     |
| Likevekt                                | Hele samfunnsøkonomien                         | Etterspørsel (inkl. reise-frekvens) og rutevalg  | Etterspørsel og rutevalg   | Ingen/kun rutevalg                                       |
| Typisk modellresultat ved anvendelse    | Ringvirkninger, mernytte                       | Etterspørsel, trafikkbelastning, trafikanntytte (i kombinasjon med TNM/Trafikant-NytteModul) | Trenklin: belegg og trengsel, trafikanntytte.<br>MATSim: rutevalg, utbredelse av kø, reisetider, etterspørselseffekter | Reisetider og utbredelse av kø, kapasitetsutnyttning     |

Når vi går fra venstre til høyre i tabellen så blir typisk a) modellområdet mindre, b) tidsgeografisk oppløsning mer finkornet, c) adferdstilpasningen mer kortsiktig og d) likevekten mer spesifikk/begrenset.

Disse generelle kjennetegnene er sentrale når man vil vurdere hvilken type modell som har de beste forutsetningene til å predikere effekten av transporttiltak.

Forventer man store og langsiktige effekter burde man bruke generelle likevektsmodeller og/eller strategiske transportmodeller. Forventer man detaljerte og dynamiske effekter bør man bruke dynamiske modeller eller simuleringsmodeller.

I praksis avhenger modellvalg ofte av tilgjengeligheten til modeller og kunnskap om bruken av modellene (se avsnitt 2.5).

## 2.2 Topografi av transportmodeller

Forrige avsnitt beskrev typer modeller basert på deres representasjon av tilbud og etterspørsel, inkludert adferdselementer og modellresultater. Vi kan også beskrive modeller basert på deres overordnede metodiske egenskaper. Dette er gjengitt i dette avsnittet (for mer informasjon viser vi til Flügel et al 2014).

Generelt kan transportmodeller klassifiseres etter 1) hvordan de representerer tid (statiske eller dynamiske modeller), 2) modellopløsningen (makro-, meso- eller mikromodeller), og 3) hvordan de håndterer usikkerhet i prosessene som modelleres (deterministiske eller stokastiske modeller).

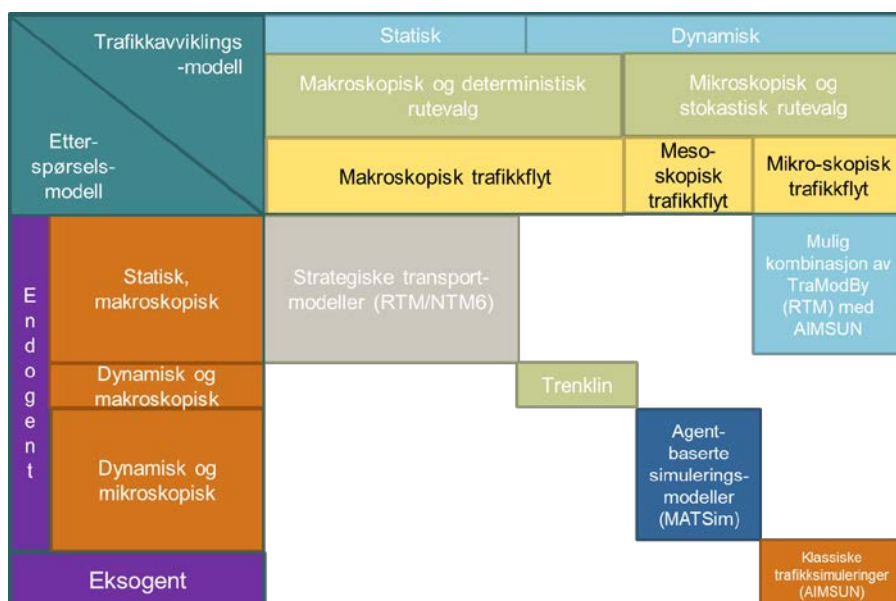
Etterspørselsmodeller klassifiseres ytterligere i (a) hvordan de forklarer reisens opphav (soneattraksjons-baserte modeller eller aktivitetsbaserte modeller), (b) hvordan tidsmessig avhengighet mellom enkeltreiser er etablert (tur-basert eller modeller for hele dagen), og (c) hvordan heterogeniteten i reisebefolkningen er tatt hensyn til (segmenteringsmodeller og modeller basert på en syntetisk befolkning).

TraModBy (etterspørselsmodellen i RTM) bruker en modell basert på soneattraksjon, rundturer og en aggregering av personer i befolkningssegmenter, som vil beskrives som makroskopisk og statisk. I Trenklin brukes segmenter i etterspørselsberegningen (makroskopisk) men individuell adferd er basert på planleggingspreferanser (ønsket ankomsttid, skjult ventetid, valg av avreisetidspunkt) og har derfor en mer dynamisk karakter. Den agentbaserte modellen MATSim tar utgangspunkt i en syntetisk befolkning uten forhåndsbestemt segmentering (en agent i modellen representerer en person i virkeligheten) og man tar utgangspunkt i heldaglige aktivitetsplaner for agentene). Etterspørselsmodellen i MATSim kan derfor beskrives som mikroskopisk og dynamisk.

Når det gjelder trafikkavviklingsmodeller kan vi dele inn i tre hovedgrupper:

- Statisk, makroskopisk, deterministisk
  - Bilenes bevegelser er i form av aggregerte strømmer (makroskopisk).
  - Antar at den reisende velger alltid ruten med lavest (generalisert) kostnad i modellen (deterministisk rutevalg).
  - Antar momentane nettverksstrømmer og beregner bare forsinkelse i reisetider, men ikke omfanget av og romlig utbredelse av kø (statisk).
- Dynamisk, makroskopisk, deterministisk
  - Tilfører tidsmessig avhengighet i rutevalg og fanger opp den romlige, tidsmessige dynamikken i trafikkflyt; utleder forsinkelse gjennom å modellere kø eksplisitt (dynamisk).
- Dynamisk, mesoskopisk eller mikroskopisk, stokastisk
  - Definerer diskrete rutevalg for den enkelte reisende/kjøretøy (mikroskopisk rutevalg).
  - Antar at reisende velger ruten med lavest subjektiv kostnad. Usikkerheten rundt denne subjektive oppfatningen er representert (stokastisk rutevalg).
  - Representerer kjøretøy-kjøretøy og kjøretøy-infrastruktur interaksjoner på det enkelte kjøretøynivå (mikroskopisk trafikkflyt) eller aggregerer noen bevegelser innenfor en mikroskopisk modell, men lar den disaggregerte representasjonen av kjøretøyene være intakt (mesoskopisk trafikkflyt).

Strategiske transportmodeller som RTM kombinerer altså en statisk og makroskopisk etterspørselsmodell med en statistisk og makroskopisk trafikkavviklingsmodell. Dette er illustrert i figur 2.1.



Figur 2.1: Kobling mellom etterspørsels- og trafikkavviklingsmodeller.

Den statiske avviklingsmodellen i RTM kan i prinsippet erstattes med en dynamisk avviklingsmodell. Høyem mfl (2020) testet ut en kobling mellom RTM og Aimsun og konklusjonene derfra er gjengitt i avsnitt 3.3.

Trenklin bruker en dynamisk (minutt for minutt) tilnærming for etterspørselsmodellering (som inkluderer valg av togavgang) og for avviklingsmodellen (avviklingsmodellen har fokus på trengsel om bord og ikke på tetthet av kjøretøyene). Trenklin er makroskopisk siden den representerer etterspørsel og trengsel i aggregerte mengder, men avviklingsmodellen er nokså detaljert siden en beregner trengselen etter hver stasjon på nytt, basert på antall av- og påstigninger.

Agentbaserte modeller som MATSim (se mer i avsnitt 4.2) kombinerer en dynamisk (sekund for sekund) og mikroskopisk etterspørselsmodell med en dynamisk og mesoskopisk trafikkflytmodell (rutevalget er mikroskopisk, men teknisk sett en del av etterspørselsmodellen i MATSim).

Vi avsluttet avsnittet med en forklaring av begrepene «aktivitetsbasert» og «agentbasert», som noen ganger er brukt om hverandre.

Det som er mest vanlig er å bruke «aktivitetsbasert» med henvisning til etterspørselsmodeller (uten trafikkavvikling). Det er en egen klasse av etterspørselsmodeller som på engelsk kalles «activity-based demand models» (ABDM). Disse er basert på et paradigmeskifte om at reizens opphav er knyttet til aktiviteter som skal utføres ved destinasjon (se neste avsnitt). ABDM er kort omtalt i vedlegg A.

Med «agentbaserte» modeller mener man en veldig bred klasse av modeller (også utenom transport) der modelleringsprosessen (både etterspørsels- og trafikkavviklingsmodellering i transport) er basert på simulering av agentens adferd uten at man aggregerer agenter (dvs. enkeltindivider) opp i grupper, soner eller segmenter. De fleste agentbaserte transportmodeller er aktivitetsbaserte, men man bruker gjerne en forenklet etterspørselsmodellering sammenlignet med rene ABDM. Agentbaserte modeller som MATSim omtales derfor også som «aktivitets-orienterte». Begrepet «orientert» innebærer at man tar utgangspunkt i aktivitetsplaner til agenter, men ikke at man nødvendigvis modellerer endringen i antall og type aktiviteter. Agentbaserte transportmodeller er nærmere omtalt i avsnitt 4.4.

Både aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller og agentbasert transportmodeller er typisk mikroskopiske, dynamiske og stokastiske.

## 2.3 Perspektiver på transportmodellering og paradigmeskifte

Som beskrevet av Jones (2012) startet den formelle utvikling av trafikk- og transportmodelleringen på 50- og 60-tallet med en kjøretøybasert tilnærming. Faget var dominert av ingeniører og modellene var direkte basert på fysiske lover (gravitasjonsmodell som beskriver trafikkflyten mellom to byer basert på avstand og størrelsen til byene) eller basert på optimeringen av fysiske størrelser (trafikkavvikling basert på korteste avstand eller korteste reisetid).

Den første utvidelsen av det kjøretøybaserte paradigmet kom på 70-tallet og var motivert av økonomer som innførte sentrale konsepter som tidsverdi, generaliserte reisekostnader, nytte og diskrete valg av reisealternativer. Perspektivet var her på personens valg av turer (og ikke på selve kjøretøyene), og er referert til som tur-baserte perspektiv. Flere sentrale modelltyper som baserer seg på maksimering av nytte eller minimering av generaliserte reisekostnader ble innført. Tur-generering, destinasjonsvalg og transportmiddelvalg ble (sammen med trafikkavvikling) knyttet sammen til såkalte firetrinnsmodeller.

Den neste utvidelsen som Jones (2012) beskriver er aktivitetsbasert modellering. Paradigmeskiftet ligger i tolkningen om at transportetterspørsel er avledet fra etterspørsel etter å utføre aktiviteter og ikke av å minimere reisekostnader som i tur-baserte modeller / klassiske firetrinnsmodeller. Den aktivitetsbaserte tilnærmingen prøver å «forstå» hvorfor enkeltpersoner reiser og hvordan personen planlegger sine reiser basert på sine heldaglige aktivitetsplaner. Såkalte aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller (ABDM) blir utviklet (se vedlegg A). Dette medførte noen metodiske forbedringer som modellering av valg av avreisetidspunkt, noe som ikke fanges opp i (statiske) firetrinnsmodeller. Til tross for den rike konseptuelle tilnærmingen har ABDM ikke slått gjennom som praktiske transportmodeller, men paradigmet om aktivitetsorientert modellering er blitt tatt opp i agent-baserte simuleringmodeller (se avsnitt 4.3).

Den tredje utvidelsen ifølge Jones (2012) er den såkalte holdningsbaserte tilnærmingen som er preget av innspill fra psykologer og markedsforskere. Et bidrag fra denne type forskning har vært å identifisere mer skjulte effekter (som miljøbevissthet) på reiseatferd, gjerne ved hjelp av stated preference metoder. Den holdningsbaserte tilnærmingen har ført til interessant forskning, men faller utenom de fleste operasjonelle transportmodellsystemer.

Til slutt identifiserer Jones (2012), det dynamiske perspektivet som påvirker alle øvrige paradigmer, som illustrert i figur 2.2.

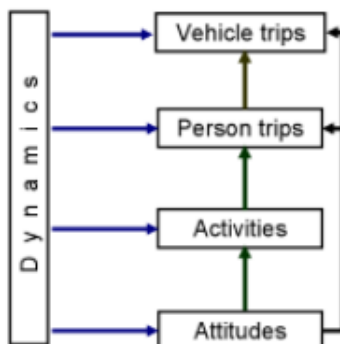


Figure 2. Relationships between the five perspectives

Figur 2.2: Samspill mellom 5 perspektiver på transportmodellering. Kilde: Jones (2012).

Det dynamiske perspektivet framhever tidsavhengighet i transportbeslutninger. På etterspørselssiden inkluderer dette at dagens valg (for eksempel å kjøpe en bil) vil ha stor effekt på framtidige beslutninger. På trafikkavviklingssiden oppfyller det dynamiske perspektivet behovet for å modellere (simulere) nettverksutnyttelse sekund-for-sekund. Dette førte til en overgang fra statiske trafikkavviklingsmodeller (vedlegg B) til dynamiske trafikksimulering-smodeller (avsnitt 4.2).

De ulike elementene i RTM/NTM6-systemet kan tilknyttes perspektivene som vist i figur 2.2.

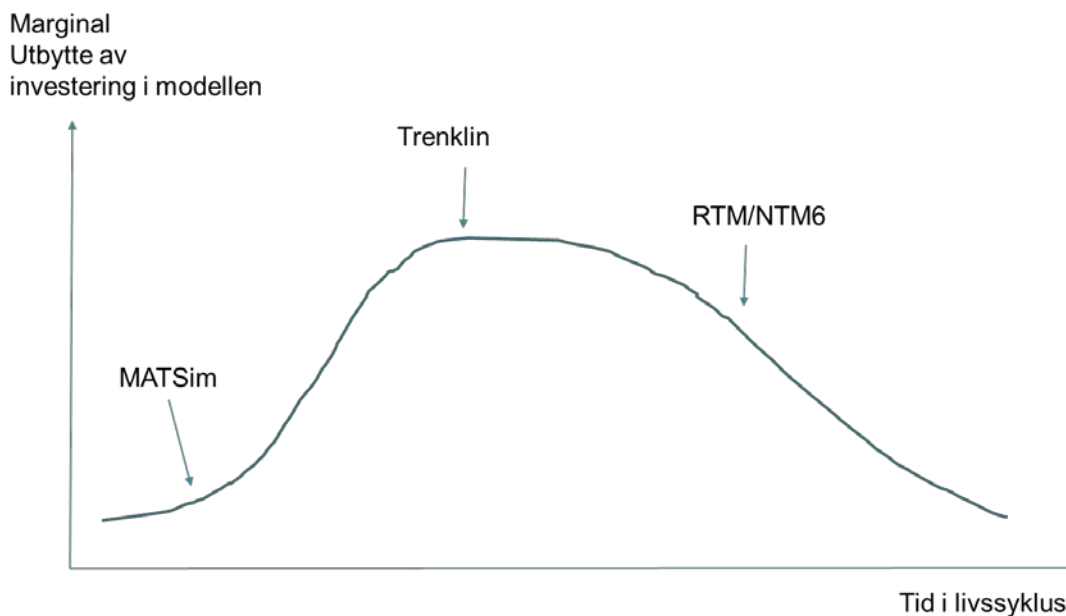
Tabell 2.2: RTM i lys av de fem skisserte perspektiver om transportmodellering.

| Perspektiv          | Inkludert i RTM/NTM  | Kommentar  |
|---------------------|--|--|
| Kjøretøy-basert     | Forenklet rutevalg basert på korteste vei/raskeste vei. Volume-delay-funksjoner.   |  |
| Tur-basert          | Gravitasjonsmodell for skolereiser<br>Rutevalg basert på generaliserte kostnader   | RTM modeller rundturer, NTM6 enkeltturer   |
| Aktivitets-basert   | Etterspørselsmodellering basert på nyttemaksimering (diskrete valg)<br>Segmentering av etterspørselsmodellen i reisehensikter; turkjeder | Ingen helhetlige reiseplaner; ingen modellering av reisetidspunkt/reiseplanlegging. Destinasjonsvalg basert på soneattraktivitet |
| Holdnings-basert    | Ikke tatt med  |  |
| Dynamiske elementer | Kohortmodell for førerkort/biltilgang; avhengighet innenfor turkjeder  | Ingen dynamisk modellering av trafikkavvikling, ingen modellering av reisetidspunkt  |

TM/NTM6 faller i stor grad i det tur-baserte perspektivet (som klassiske firetrinns-modeller), men har blitt utvidet med noen aspekter fra det aktivitetsbaserte perspektivet og har i etterspørselsmodelleringen også noen dynamiske elementer. På trafikkavviklingssiden er RTM en statisk modell uten dynamiske effekter og perspektivet er først og fremst «kjøretøybasert» (selv om bruk av generaliserte reisekostnader i rutevalget formelt sett passer inn i det tur-baserte perspektivet).

## 2.4 Livssyklus for transportmodeller

Transportmodeller kan tenkes å ha en livssyklus og har ulik marginalt utbytte av ressurser til utviklingsarbeid. Figur 2.3 er et forsøk på å illustrere dette. Figuren er nokså upresis og antar samme forløp for alle modeller, noe som selvfølgelig er en grov forenkling. Den absolute nytten vil nok også variere for de ulike transportmodellene med tanke på omfang i bruk.



Figur 2.3: Illustrasjon av livssyklus og marginalt utbytte av utviklingsressurser for ulike transportmodeller.

MATSim i Norge er helt i startfasen og det er høye oppstartskostnader forbundet med etablering av modeller og opplæring av fagpersoner.

Trenklin er en relativt ung modell som har «overlevd» oppstartfasen og har vist seg relevant i praksis. Modellen har fortsatt rom for betydelige forbedringer. Forbedringer kan trolig gjennomføres med relativt lave utviklingskostnader (R&D) siden det finnes et tilstrekkelig antall fagpersoner som kan jobbe videre med modellen uten store opplæringskostnader.

RTM/NTM6 er en veletablert modell og det finnes mange fagpersoner som kan jobbe med forbedringer i systemet. Samtidig kan det argumenteres for at metodikken er «maksimert ut» i stor grad. Det er for eksempel veldig kostbart med tanke på ytterligere beregningstid å øke antall soner, segmenter eller tidsperioder.

## 2.5 Modellvalg i Norge

I Statens vegvesen og i NTP-arbeidet er strategiske transportmodellsystemer (RTM/NTM6) den desidert mest brukte typen av transportmodeller. RTM/NTM6 brukes også av mange konsulenter som standardverktøy for transportrelaterte KVVU (og KS) prosjekter. Transportmodellsystemet har en sterk tilknytning til nytte-kostnadsanalyser.

RTM/NTM6-systemet brukes også til å lage «offisielle» framskrivingsbaner for persontransport. Disse brukes for eksempel i flere klimaberegninger. Modellsystemet har også blitt brukt til å effektberegne mange klimatiltak og har blitt vurdert av Fridstrøm mfl (2020) som egnede modeller til å beregne mange (langsiktige) klimatiltak.

**RTM** har en del sentrale **fordeler** sammenlignet med andre modeller i Norge

- Dekker alle viktige transportmidler
- Dekker alle korte reiser innenfor Norge (i samspill med NTM6 alle reiser uansett reiselengde)
- Veletablert i etatene og konsulentmiljøet
- Mange modellparameterne er estimert på faktiske reisevanedata
- Kan modellere turgenerering og destinasjonsvalg
- Opplegg for å ta modellresultater videre til nytteberegning

Disse fordeler er sentrale for at RTM kan brukes for å studere effekter av mange typer transporttiltak og at den anses som det «offisielle» transportmodellsystemet i Norge.

RTM har også noen **ulemper** som kan begrense egnethet for enkelte typer tiltak. Disse ulemper inkluderer:

- Metodiske begrensinger og svakheter som følge av statisk og makroskopisk tilnærming (se avsnitt 3.1), deriblant
  - Ingen modellering av avreisetidspunkt
  - Ingen eksplisitt modellering av kødannelse
  - Ingen modellering av trengsel på kollektivtransport
  - Ingen nettutlegging av soneinterne reiser
  - Forenklet modellering av rutevalg
  - Man er bundet til implementert segmentering ved analyse av resultater
- Visualisering av modellresultater kan være vanskelig
- Til dels lange beregningstider (timemodell med flere iterasjoner)
- Kommersiell trafikkavviklingsmodell (Cube)<sup>3</sup>
- Ufleksibel modellstruktur (se avsnitt 3.3)
  - Vanskelig å tilpasse modellen til nye trender som mikromobilitet og autonome biler (se kapittel 5)
  - Vanskelig å fange opp trendbrudd (f.eks. økt bruk av hjemmekontor)

At RTM i dag ikke kan brukes til å modellere trengsel på kollektivturer har vært en hovedmotivasjon for Jernbanedirektoratet til å utvikle sin egen transportmodell, Trenklin.

Trenklin (dagens versjon 3.2) har blitt brukt i flere NTP-analyser og har også blitt brukt av noen konsulenter i KS1- prosjekter (Steenberg mfl 2016)).

RTM har i liten grad blitt brukt for (rene) sykkelprosjekter og det har for eksempel blitt utviklet egne verktøy for å analysere effekten av sykkelekspressveier (Flügel og Madslie 2017).

Fra et forskerperspektiv kan RTM/NTM6 oppleves som lite attraktiv siden den grunnleggende metodikken (firetrinnsmodeller) er veletablert og gir lite rom for vitenskapelig og nyskapende publisering i modellorienterte/tekniske journaler.

Forskningsfronten har i flere tiår dreid seg om dynamiske/simuleringsbaserte modeller, og i nyere tid agent-baserte transportmodeller. I avsnitt 5.2.4 gis en litteraturgjennomgang i forbindelse med modellering av autonome biler. Der vises til at makroskopiske modeller ble bare brukt i 2 av 26 studier.

---

<sup>3</sup> Ulempe at lisensen koster en del, men fordel at det følger med en viss brukersupport



## 2.6 Kanaler for modellutvikling i Norge

RTM-systemet ble i perioden 2016-2019 reestimert og videreutviklet gjennom en rammeavtale mellom NTP-analyse og et samarbeid mellom flere sentrale forskningsinstitutt i Norge (TØI, SINTEF, Møreforskning Molde, Numerika og Transmod). Pga. utformingen og tidsplanen i prosjektet, som krevde at den reestimerte modellen var klar til uttesting i prosjektperioden, var det vanskelig å få til store konseptuelle forbedringer. Mye av ressursene gikk til forbedring av inndata (kvaliteten på veinettet, nyere RVU-data osv), selve reestimeringen av modellen og flere småprosjekter i etterkant av reestimeringen. Nye elementer var i stor grad begrenset til nye reisehensikter (arbeidsplassbaserte rundturer), nye inndata til etterspørselsmodelleringen (for eksempel tetthetsvariabler, parkeringsvariabler), samt forbedringer i nettverket (sykkelinfrastruktur, sykkelfartsmodell).

Modellsystemet (i stor grad inndata til modellen) ble også forbedret/videreutviklet gjennom SVVs etatsprogram Bedre By (2014-2019). Programmet hadde også fokus på nye metoder, hvor mye av metodeutviklingen var knyttet opp mot transportmodeller (for eksempel farts- og rutevalgmodell for sykkel). Dynamiske transportmodeller (MATSim) ble omtalt i starten av programmet (Flügel et al 2014, Johansen mfl 2015), men ble ikke tatt med videre i prosjektutlysninger innenfor Bedre By. Bedre By finansierte imidlertid et prosjekt som testet kobling mellom RTM og Aimsun (Høyem mfl 2020).

Det skjer også en del testing, tilpasning og forbedringer av RTM i enkelte prosjekter og hos enkelte bedrifter (konsulenter/forskningsinstitutter). Dette fører til bedre modellering og mer kunnskap hos bedriften som gjør tilpasningen, men bidrar ikke nødvendigvis til modellutviklingen som sådan fordi kunnskapen ofte ikke deles eller tas inn i selve modellsystemet. Her kunne man med fordel vurdere og teste ut nye/bedre måter å organisere overføring av kunnskap mellom bedrifter.

Andre aktører som bidrar til videreutvikling av transportmodeller inkluderer Jernbanedirektoratet (Jbdir), RUTER og – for Oslo/Akershus – PROSAM. Jbdir sin innsats til personmodellutvikling har i stor grad hatt fokus på Trenklin. RUTER har blant annet kjøpt modellanalyser fra utenlands miljøer (PIV Visum) for å gjennomføre en mobilitetsstudie for autonome biler/robotaxi (se også avsnitt 5.2.4).

Gjennom det siste tiåret har det skjedd store endringer i organiseringen av transportsektoren i Norge. Det er i dag langt flere aktører. Innen kollektivreiser er det store endringer knyttet til jernbane, luftfart og kollektivselskaper som RUTER. På veiinvesteringssiden har en gått fra en situasjon for fem år siden der over 80% av alle investeringer gikk gjennom Statens vegvesen, til dagens situasjon med 11 fylkeskommunale byggherrer og Nye veier i tillegg, hvor under 40% av veiinvesteringene er i Statens vegvesens regi. Det kan argumenteres for at dette betyr et større behov for et felles godt modellgrunnlag, spesielt med tanke på NTP-arbeidet.

Det har kommet forholdsvis lite penger direkte fra Samferdselsdepartementet til modellutviklingen etter at transportmodellene i 2001 ble overført fra Samferdselsdepartementet til transportetatene.

Norges forskningsråd (NFR) har tematiske utlysninger som kan gjøre det vanskelig å få finansiering for større prosjekter som har modellutvikling som hovedtema. I noen forskningsprosjekter (Bytrans, Electrans) er transportmodellutvikling i RTM med i en arbeidspakke, men ressursene i slike arbeidspakker er typisk begrenset kun til videreutvikling rettet mot det tematiske tema i hovedprosjektet. Disse prosjektene bidrar derfor i liten grad til en helhetlig modellutvikling. I Februar 2021, fikk TØI tilslag til et stort samarbeidsprosjekt gjennom IKT-pluss programmet som vil bidra til å ta i bruk nye metoder innenfor transportmodellfaget. Prosjektet er nærmere omtalt i avsnitt 4.5.

I motsetning til Sverige og Danmark finnes det i Norge ikke noe stort akademisk miljø som driver med modellutvikling. Miljøene ved NTNU og Høyskolen i Molde har etter det vi kjenner til ikke forsket på agentbaserte modeller. TØI har jobbet sammen med internasjonale studenter i forbindelse med implementering av den første agentbaserte MATSim modellen i Norge (Flügel mfl 2014).

## **2.7 Trender som kan påvirke behov for transportmodellering**

Det er flere trender i transportsektoren som er relevante med tanke på videre modellutvikling:

- Fortetting og urbanisering
  - Bytransport blir relativt viktigere framover
  - Økt behov for å kunne modellere kø og trengsel på en tilfredsstillende måte
  - Mer fokus på sykling og gåing
- Elektrifisering
  - Heterogenitet i bilparken (effekt på transportkostnader mm)
  - Forbudt/utfasing av personbiler med forbrenningsmotor
- Automatisering og nye egenskaper ved transportmidler
  - Førerløse biler og deres effekt på tidsverdi, trafikkavvikling, og etterspørsel etter bil
  - Automatisering innenfor kollektivtransport
- Delingsøkonomi / Mobility-as-a-service
  - Tradisjonell bildeling (uten automatisering)
  - Effekt på bilhold og biltilgang
  - Robotaxier (gitt automatisering) som nytt transportmiddel
    - Redusert transportkostnad
    - Økt biltilgang og etterspørsel
    - Tomkjøring
    - Tilgjengelighet / ventetid for robotaxier gitt (komplekst/dynamisk) samspill mellom etterspørsel og transporttilbud
    - Forbedret tilbringertransport til kollektivruter

- Mikromobilitet (elektriske sparkesykler el.)
- Nye transportmidler, økt fleksibilitet
- Teknologiutvikling for øvrig
  - GPS-tracking og mulighet for dynamisk veipricing
  - 5G mobilnett og superrask oppkobling av personer og kjøretøy
  - Nye muligheter for management og kontroll av trafikkavvikling
  - Nye underholdningsformer som kan brukes mens man reiser (VR-briller)
  - Økt konnektivitet (for eksempel økt mulighet for å organisere samkjøring («ride-sharing»))
- Mer fleksible arbeidsformer
  - Færre reiser til/fra arbeid, modellering av valg mellom hjemmekontor og «kontor-kontor»
  - Modellering av valg av reisetidspunkt
- Flere sammensatte reiser
  - Sanntidsinformasjon
  - Nye forretningsmodeller
- Arealpolitikk. Byvekstavtalene er blant annet basert på et samspill mellom transporttiltak og arealtiltak
  - Knutepunktutvikling

Den generelle tendensen er at tiltak i by og tiltak som har en dynamisk karakter vil bli mer etterspurt.

Koronaerfaringene vil trolig gi varige endringer i reisemønster og påvirke både valg av transportform og tidspunkt for reisen. Dette gjelder bruk av hjemmekontor kontra den daglige jobbreisen, bruk av videomøter i stedet for forretningsreiser, og netttjenester og hjemlevering i stedet for å reise til et sted for å kjøpe varer eller tjenester.

Som følge av koronapandemien kan grunnen til å reise - eller ikke reise - være enda mer sammensatt/individuell tilpasset og «aktivitetsbasert» (reiser til aktiviteter som absolutt må gjennomføres versus reiser til aktiviteter som kan erstattes). Koronapandemien kan også ha gjort det enklere å stimulere til forskyving av trafikk mellom perioder (vekk fra rush), noe som kan ha økt behovet for modeller som kan fange opp denne dynamikken og som kan bidra til å optimalisere veipricing og framkommelighet.

På litt lengre sikt kommer nye reisemåter som robotaxier og lignende til å prege transportmulighetene. Dette er beskrevet i mer detalj i avsnitt 5.2.

## 3 Videreutvikling av strategiske transportmodeller

### 3.1 Behov for videreutvikling

I forrige avsnitt (avsnitt 2.7) nevnte vi ulike trender som vil påvirke behovet for modellutviklingen. Ut fra disse trender (fortetting, aktiv transport, mikromobilitet, autonomi, delingsøkonomi, konnektivet) kan vi identifisere fire dimensjoner for modellutvikling.

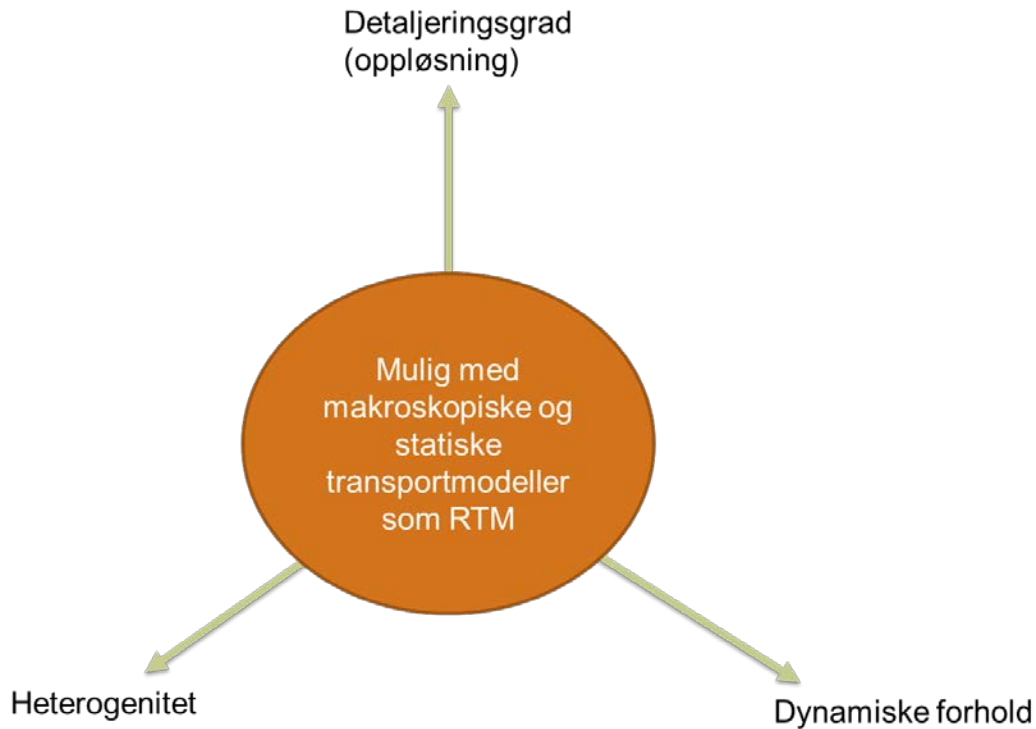
1. **Mulighet for dynamisk modellering** (kø, trengsel, ventetid for robotaxier, dynamisk veipricing)
2. **Mulighet for å øke den geografiske oppløsning** (reiser for sykling, gåing og annen mikromobilitet og deres rutevalg)
3. **Mulighet for å fange opp heterogenitet** (ulike preferanser for automatisering og bildeling, elektrifisering og annen heterogenitet i bilparken, ulik mulighet for hjemmekontor, tilgang til parkeringsplasser i byer)
4. **Fleksibilitet i modellen til å tilpasse seg nye trender** (nye transportmidler og nye transportløsninger, nye fenomener som tomkjøring, radikale endringer i biltilgang)

De første tre dimensjoner er nærmere beskrevet i neste avsnitt 3.2. Avsnitt 3.3. omtaler fleksibiliteten i RTM til å tilpasse seg nye trender. Avsnitt 3.4 ser på noen viktige modell-elementer for byanalyser, avsnitt 3.5 beskriver forbedringer i kobling mot eksterne modeller og i avsnitt 3.6 beskriver vi kort behov og muligheter knyttet til forbedrede/nye datakilder.

### 3.2 Metodiske begrensinger

Dagens transportmodell for korte reiser (RTM) består av en etterspørselsmodell (TraModBy) og en trafikkavviklingsmodell (EMME for RTM 23+ og Cube for øvrige modellområder).

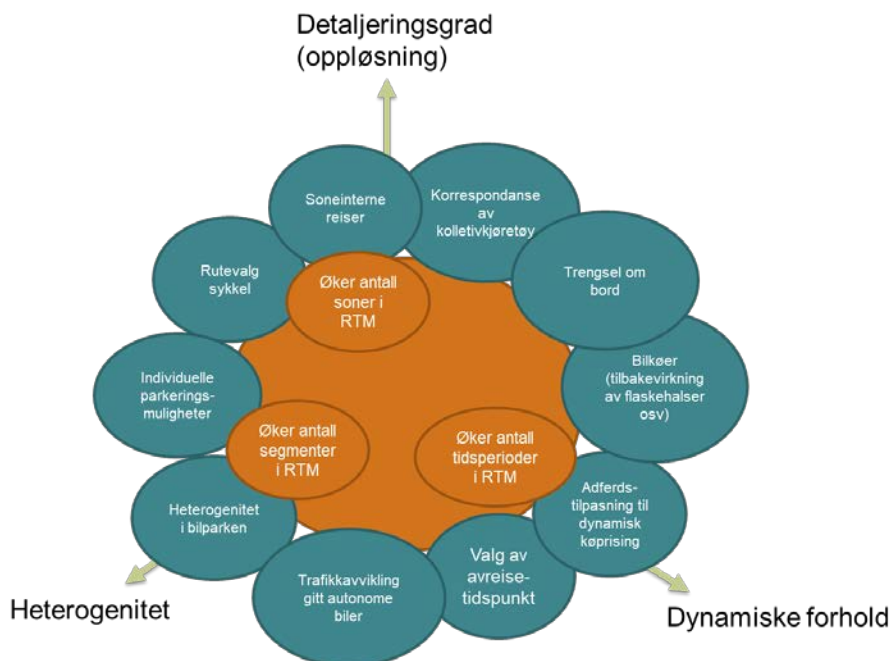
Som beskrevet i avsnitt 2.2, kan RTM omtales som en makroskopisk, statisk og deterministisk modell. Disse metodiske egenskaper fører til begrensinger som vi kan illustrere basert på dimensjonene: Detaljeringsgrad, dynamiske forhold og heterogenitet (figur 3.1)



Figur 3.1: Illustrasjon av dimensjoner for videreutvikling.

Innenfor det metodiske rammeverket kan RTM forbedres på dimensjonene detaljeringsgrad, heterogenitet og dynamiske forhold ved at en henholdsvis kan øke antall soner, øke antall befolkningssegmenter og øke antall tidsperioder.

Disse forbedringer kan bidra til at RTM blir bedre, men det vil ikke føre til det ønskede presisjonsnivå for flere elementer og tiltak. Dette er illustrert i figur 3.2.



Figur 3.2: Illustrasjon av noen elementer som det kan være vanskelig å oppnå høyt presisjonsnivå på, selv om man øker antall soner, segmenter og tidsperioder i RTM.

### 3.3 Fleksibilitet i modellsystemet

Som beskrevet tidligere er det ønskelig at et modellsystem kan tilpasse seg nye trender og fenomener. Dette inkluderer mulighet for å endre adferdsparametrene i modellen, og tilføre nye reisealternativer, befolkningssegmenter eller aktiviteter.

Teknisk sett er RTM et komplisert og relativt stringent modellsystem, og det har vist seg tids- og resurskrevende å gjøre endringer/videreutvikling i modellen. Den fundamentale modellstrukturen i dagens RTM er den samme som i den første versjonen fra 2005 (Madslie mfl 2005). Forbedringer i modellsystemet har i stor grad handlet om å forbedre inndata i modellen.

På etterspørselssiden (TraModBy) ligger en begrensning i at oppdelingen i befolkningssegmenter er forhåndsbestemt. Dette innebærer at man ikke kan fange opp heterogenitet (i modelleringen og resultatutskriften) som går utover denne forhåndsbestemte segmenteringen. Enkelte prosjekter har gjort tilpasninger i modellsystemet for å fange opp nye segmenter. For eksempel har TØI i forbindelse med analyser for Bompengeutvalget (Steinsland mfl. 2020) kjørt TraMod\_By separat for elbiler og andre biler. Slike tilpasninger trenger en dyp innsikt i modelloppbygging og virkemåte, samt teknisk know-how, noe som den vanlige bruker av RTM ikke nødvendigvis har.

RTM er implementert i CUBE som er et kommersielt verktøy for strategiske transportmodeller. For noen typer videreutvikling og med tanke på forskning på PhD-nivå kan det være en begrensning at man ikke har tilgang til kildekode for programvaren. Åpen-kilde transportmodeller som MATSim er på den måten mer attraktive og stimulerer i større grad til videreutvikling utover standardmodellen.

RTM er estimert og kalibrert på «dagens» reiseatferd og teknologi. I den grad endringer i adferd og teknologi kan oversettes på en tilstrekkelig god måte i de eksisterende parametrene i modellen, er det relativt enkelt å fange opp forventede effekter. Et eksempel er tidsverdien som forventes å falle ved innføring av autonome biler (Flügel mfl 2019). Det er mulig å endre de implisitte verdier i nyttefunksjonen i TraModBy slik at tidsverdien endres. Et annet eksempel er biltilgang som kan manipuleres ved å endre fordeling i befolkningssegmenter i alle grunnkretser. For andre ting, som nye transportløsninger som robotaxier, er det vanskelig å forestille seg en enkel og tilstrekkelig god måte å endre dagens modell på (se avsnitt 5.2.2).

### 3.4 Mulige forbedringer i byer og byområder

I dette avsnitt omtaler vi noen utfordringer og forbedringsmulighet i RTM-modellen, med fokus på elementer som er viktig i byer og byområder. Vi konsentrerer oss her om gang og sykkel, kollektivtransport, bompenger og parkering, og mobile tjenesteyter.

#### 3.4.1 Gang og sykkel

Betydningen av gang og sykkel (GS) og kravet om å kunne predikere effekten av tiltak rettet mot GS har økt mye i forbindelse med klima- og nullvekstmålene. Det kan forventes at GS-tiltakene blir enda mer viktig i framtiden. I tillegg har det kommet nye former for mikromobilitet (elektriske sparkesykler) som deler noen av problemstillingene med GS.

Et viktig moment i nytte-kostnadsanalyser ved GS-tiltak er helsegevinster. Disse utgjør ofte en stor del av nytten av et tiltak som øker omfanget av GS. For å kunne anslå helsegevins-

ter i forbindelse med et GS-infrastrukturiltak trenger man en god modellering av etterspørselseffekten, dvs hvilken overgang man får fra bil/kollektiv til GS. Denne effekten må skilles fra rene effekter på rutevalget, som i mindre grad medfører helsegevinster.

I makroskopiske modeller som bruker et sonesystem, behandles alle personer innenfor et segment og en reisehensikt likt. Geografisk sett legges alle personer i en sone i samme punkt og det brukes en felles veitilkobling.

Når sykkelreiser legges ut på nettverket fører det til noen grove reisetider, som i beste fall kun treffer gjennomsnittet, uten at det fanges opp at sykkelturner mellom to gitte grunnkretser vil variere en del. Dette gjelder spesielt i områder utenom byer der soneinndelingen er betydelig grovere enn i byer. Her kommer det også inn en utfordring om at soneinterne reiser som ikke nettutlegges og som ikke det beregnes etterspørselseffekter for soneinterne reiser. En annen ulempe med et grovt sonesystem er at det er relativ begrenset mulighet (grunnkretser) å sykle til i destinasjonsmodellen. I sum kan dette føre til en upresis modellering av sykkeltiltak som er geografisk spesifisert.

I den nye TraModBy-modellen som ble etablert i 2017-2018 har man forbedret spesifiseringen av nyttefunksjonene for gang og sykkel, med flere variabler enn i tidligere modellversjon. En av endringene for sykkel er at det brukes vektet tid i stedet for distanse, hvor sykkeltiden blir beregnet med TØIs sykkel-fartsmodell som tar hensyn til ulik sykkelinfrastruktur. En annen ny variabel sier at det er mindre sannsynlig å velge sykkel på en relasjon hvis det er mye motbakke på relasjonen (antall høydemeter motbakke).

Til tross for forbedringer i etterspørselsmodellen brukes det en forenklet kostnad (uavhengig av reisehensikt) for sykkel i nettutleggingen, noe som medfører at all sykkeltrafikken mellom to gitte grunnkretser får samme rutevalg. Denne «all-or-nothing» fordelingen har en tendens til å gi forholdsvis mye sykkeltrafikk på hovedveier og lite sykkeltrafikk på mindre veier.

Vi mener at det ligger en del forbedringspotensial i hvordan nettutlegging og rutevalg for sykkel gjøres i CUBE. Det ligger alternative algoritmer i CUBE som bør uttestes og vurderes tatt i bruk.

### 3.4.2 Kollektivtransport

Etterspørsel etter kollektivtransport beregnes samlet i den regionale persontransportmodellen. Det beregnes ikke turer for hver av de ulike kollektive transportformer, men turer for kollektivtransport samlet. Turproduksjonen er basert på generaliserte reisekostnader for de ulike kollektive transportformene som er en del av reisens rutevalg. Og når turene nettfordelles, fordeles de ut på ulike transportformer slik at ulike deler av kollektivreisen kan betjenes av ulike kollektive transportmidler.

Det hadde vært en fordel om modellen kunne skille mellom etterspørsel etter ulike kollektive transportformer i turproduksjonen. Slik sett ville det vært lettere å kontrollere at modellen gjenskaper reisemiddelfordelingen av kollektive transportmidler. Men foreløpig er datagrunnlaget fra den nasjonale reisevaneundersøkelsen for spinkelt til at man klarer å estimere etterspørsel etter ulike kollektive transportmidler separat.

Sonestrukturen i den regionale persontransportmodellen er på grunnkrets-nivå. I folkerike områder er grunnkretsene gjerne små i geografisk utstrekning, men de kan være ganske store i mer perifere strøk. Siden grunnkretsens befolkning og attraksjon anses å ligge i ett enkelt punkt, vil alle bosatte i grunnkretsen oppleve like transportkostnader knyttet til reiser. For store grunnkretser er dette en ganske grov tilnærming fordi grunnkretsens befolkning ofte vil bestå av både personer med svært kort vei til kollektiv holdeplass og personer som bor så langt unna at kollektiv ikke nødvendigvis er et attraktivt alternativ. Det

medfører også at alle personer i sonen vil gå om bord på det kollektive transportmiddelet på samme holdeplass selv om ruten er forbundet med flere alternative holdeplasser i sonen. Ventetiden beregnes i modellen som halvparten av tid mellom avganger, noe som er en tilfredsstillende tilnærming ved hyppige avganger, men fort blir en dårlig representasjon ved lav frekvens. For ved lav frekvens vil de reisende i større grad tilpasse seg rutetabellen og slik sett ankomme holdeplassen like før avgang. I slike tilfeller risikerer man at modellen beregner for dårlig transporttilbud og for lav etterspørsel etter kollektivtransport.

Det foreligger funksjonalitet i transportmodellverktøyet Cube Voyager til å beregne ventetid basert på koding av tidtabell. På denne måten kan man beregne mer realistiske ventetider i kollektivtransporten, og inkludere effekter av ruter som korresponderer. Denne funksjonaliteten har imidlertid vist seg å inneholde visse svakheter og bugs ved tidligere vurderinger. Metodikken inkluderer heller ikke beregning av første ventetid ved bruk, noe som vanskeliggjør beregning av transportkostnader til etterspørsel. Det er imidlertid mulig at funksjonaliteten kan ha noe for seg ved avsluttende nettfordeling av kollektivturene dersom feilene er korrigert i siste versjoner av programvaren.

Trengsel om bord i kollektive transportmidler er også noe man kan kanskje kan bruke mer aktivt i de regionale persontransportmodellene. Funksjonalitet for å beregne trengselskostnader ligger inne i modellsystemet i dag, men man trenger nok å jobbe med å få på plass riktig kapasitet i systemet samt å kalibrere inn resultatene mot billettstatistikk og passasjer-tellinger.

Det er svært omfattende og tidkrevende å kalibrere transportmodellene mot empiriske data for kollektivtransporten. Det ligger nok et vel så stort forbedringspotensial på dette området som på utvikling av bedre funksjonalitet.

### **3.4.3 Bompenger**

Algoritmene for å beregne rutevalg er svært sentrale bestanddeler i transportmodellene. De brukes blant annet til å fordele turer mellom reiserelasjoner og til å beregne transportkostnader til bruk ved beregning av etterspørsel og trafikantnytte.

Rutevalget beregnes med forutsetning om at trafikantene velger ruten som minimerer deres generaliserte kostnader. Reisekostnadene uttrykkes da som en vektet sum av ulike reisekostnadskomponenter.

For bilførere vil generaliserte reisekostnader typisk bestå av reisetid og distanseavhengige kostnader som for eksempel drivstofforbruk, samt eventuelle direkte utlegg til bompenger. Bompengene har historisk sett alltid vært litt utfordrende å representere på en tilfredsstillende måte i transportmodellene. Dette er nok delvis knyttet til at man i rutevalget forutsetter at alle trafikantene er rasjonelle og velger billigste rute ut fra full kjennskap til alle alternativer, mens virkelighetens trafikanter nok hverken er like rasjonelle eller opplyste som modellen legger til grunn. Følsomheten for bompenger har derfor en tendens til å bli betydelig større i modellene enn statistikken fra bomselskapene rapporterer om. Dette har man gjerne løst ganske enkelt ved å nedjustere betydningen av bompenger i generaliserte reisekostnader. De senere årene har imidlertid flere utfordringer dukket opp som følge av økt kompleksitet i den norske bompengerevidningen.

Transportmodellene beregner etterspørsel for ulike reisehensikter, transportformer og befolkningssegmenter, men skiller i utgangspunktet ikke mellom ulike biltyper.

Transportkostnadene og turproduksjonen mellom modellenes reiserelasjoner gjelder dermed for gjennomsnittsbilen, og skiller altså ikke mellom elbiler og biler med forbrenningsmotor. Fordi kostnader til drivstoff og bompenger er svært forskjellig for ulike



kjøretøyteknologier, vil slike gjennomsnittsbetraktninger potensielt skape en del utfordringer.

En annen utfordring er knyttet til månedstak og spesielt timesregel som transportmodellverktøyet pr i dag ikke har funksjonalitet for å håndtere.

Timesregel innebærer at bilistene kun trenger å betale for én bompassering dersom flere bomstasjoner passerer innenfor samme klokkeperiode. Transportmodellverktøyet har imidlertid ikke funksjonalitet for å beregne betingede generaliserte reisekostnader som avhenger av hvorvidt bomstasjonen man passerer er den første man passerer innenfor samme klokkeperiode, eller om man allerede har passert en bomstasjon i samme bomsystem.

Mangel av slik funksjonalitet løses nå ved at man utelater bompengekostnadene fra bomstasjoner med timesregel i rutevalget, men teller opp antall bompasseringer, og legger på bomtaksten til slutt slik at enhver tur som passerer bomsystemet får direkte utlegg tilsvarende én passering.

Det har til nå vært en tilfredsstillende løsning for de fleste bomsystemene i Norge, men fremveksten av mer avanserte systemer spesielt i de store byene stiller høyere krav. I Oslo er det nå for eksempel innført et system med tre bomringer der to har felles timesregel men ulike takster, mens Trondheim har syv ulike bomsystemer med ulike interne regler. I Trondheim er dessuten bomtakstene i bomsystemet tilpasset til å lede trafikken på omkjøringsveier, noe som er vanskelig å modellere med forutsetning om at bomstasjoner med timesregel ikke påvirker rutevalget.

Det finnes måter å tilpasse transportmodellene på slik at man bedre klarer å representere mer intrikate bompengesystemer, men det er nok hverken hensiktsmessig eller realistisk å gjøre dette innenfor de mer generelle formene som ligger til grunn for dagens modellapparat. Det er en stor styrke at dagens regionale transportmodellsystem er generisk og langt på vei likt for alle regionale modellområder og delområder. Slik sett er det neppe fornuftig å lage generell funksjonalitet for å representere spesielle bomsystemer som kun opptrer i én enkelt by. Da er det nok heller å foretrekke at slike tilpasninger vurderes i forbindelse med gjennomføring av konkrete analyser.

På sikt er det kanskje naturlig å tenke seg to grep som kan gjøre modellen bedre rustet til å møte fremtidens krav for å modellere bompenger. Etter hvert som elbilandelene øker får man stadig bedre reisevanedata for hvordan ulike kjøretøyteknologier påvirker reiseadferd. Slik sett er det naturlig at neste modellversjon behandler ulike kjøretøyteknologier separat.

I tillegg kan man kanskje vurdere muligheten for å videreutvikle modellverktøyet Cube Voyager til å håndtere timesregel i rutevalget sitt. Dette er i så fall noe som må tas opp med leverandøren.

Det er imidlertid vanskelig å forutsi hvilke behov som vil komme fremover. Bomstasjonene anses av mange som et dårlig verktøy for å kreve inn brukerbetaling, og mange ser nok for seg at dagens bompenger på sikt vil erstattes av en mer dynamisk form for veiprisning.

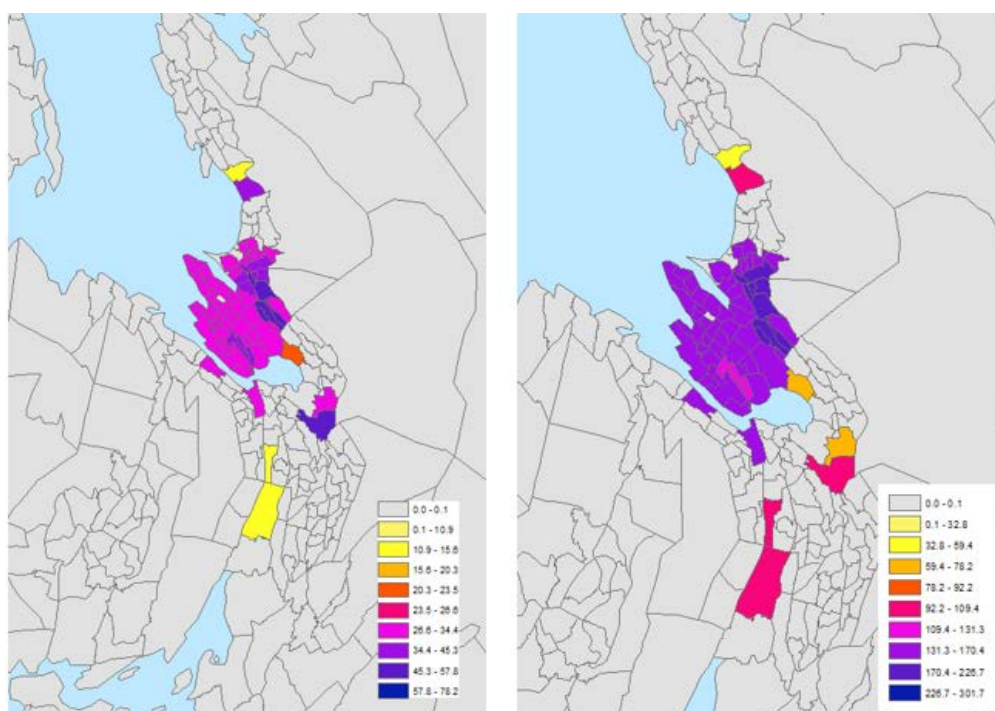
Det er jo også slik at flere politiske partier nå ser for seg å forby salg av diesel- og bensinbiler innen 2025, samtidig som nullutslippssoner skal innføres i flere storbyer innen kort tid. Denne utviklingen kan fort vise seg å stille lavere krav til modellering av bompenger enn dagens situasjon.

### 3.4.4 Parkering

#### Dagens RTM

I dagens RTM finnes det flere variabler knyttet til parkering. De mest direkte variablene er knyttet til takster for kort- og langtidsparkering, samt en variabel som angir andel som er uten parkering ved bosted.

Prisen for korttidsparkering gjelder per time, mens prisen for langtidsparkering gjelder per døgn. Hvordan taksten kan variere mellom grunnkretser er vist i følgende utsnitt for Bergen sentrum, hvor vi ser takst pr time til venstre og takst pr døgn til høyre.



Figur 3.3: Illustrasjon av takster for hhv. korttidsparkering (kr/time) og langtidsparkering (kr/døgn) for grunnkretser i Bergen sentrum.

Disse to parkeringsvariablene inngår i destinasjons- og transportmiddelvalget i etterspørselsmodellene via reisekostnader knyttet til bruk av bil, hvor reisehensikt styrer om det er kort- eller langtidsparkeringstaksten som benyttes. Informasjon om bostedsparkering inngår i modellene for bilhold og førerkort (BHFK-modellene), og påvirker dermed hvem som har bil som tilgjengelig transportmåte ved transportmiddelvalget.

I tillegg til de konkrete «parkeringsvariablene» inneholder modellen tetthetsvariable som tar utgangspunkt i grunnkretsens tetthet. For parkering vil en slik tetthetsvariabel fungere som en indikasjon på parkeringsulemper, for eksempel i form av svært dyr eller vanskelig parkering, og bidrar til mindre bilkjøring til «tette» soner.

I PROSAM-rapport 232 (Prosam 2019) har Norconsult testet hvordan det slår ut å øke andelen bosatte uten parkering ved hjemmet i tre områder med ulik grad av urbanitet (Grünerløkka, Asker sentrum og Hurum kommune). I deres test ble antall genererte bil-turer på Grünerløkka redusert betydelig mer enn ved tilsvarende endring i Asker sentrum og Hurum kommune. Årsaken til ulik respons på endring i parkeringsmulighet hjemme er trolig at omfanget av alternative reisemåter og alternative destinasjoner i nærheten er større på Grünerløkka enn på de to andre stedene.

Norconsult peker også på at parkeringsrestriksjoner ved bolig i liten grad påvirker reiser med bil **til** destinasjonen. Man kunne tenke seg å endre på en destinasjonssones tetthet som en «proxy» for å indikere økte parkeringsproblemer, jfr. det vi skriver om at tetthet kan være en indikasjon på parkeringsulempe i modellen. Det er imidlertid en utfordring at denne variabelen er sammensatt av flere variabler, og det kan være utfordrende å justere slik at en treffer riktig nivå av parkeringsulempe.

Det er dermed ingen variabel som direkte påvirker **antall** parkeringsplasser tilgjengelig ved destinasjon, noe som kan være utfordrende dersom vi ønsker å analysere tiltak som påvirker antall parkeringsplasser (f.eks. fjerning av parkering). Et alternativ vil være å øke kostnadene til kort- og langtidsparkering, samt øke andelen uten parkering, slik at parkering i praksis vil være utilgjengelig.

En annen utfordring er at parkeringsrestriksjoner i modellen vil være låst til et helt område (grunnkrets). Parkeringstilbudet vil ofte variere vesentlig innad i sonen, både pris- og reguleringsmessig, noe som gjør det utfordrende å sette riktig avgiftsnivå i hver sone. Modellen er også slik utformet at det er parkeringskostnader og tetthet i selve destinasjonssonen som vurderes, mens det i områder med små grunnkretser ofte kan være aktuelt å parkere i en annen sone enn der ærendet skal utføres hvis det der er enklere eller billigere parkering.

### Mulige forbedringer

På kort sikt er det naturlig å gå gjennom kostnadene som ligger inne for kort- og langtidsparkering. Mange av takstene begynner å bli gamle, og det er grunn til å tro at det mange steder (spesielt i byområder) har vært omfattende endringer i parkeringstilbudet, både i form av færre plasser og høyere takster. Den gang modellsystemet ble re-estimert var ikke parkeringsregisteret godt nok utviklet til å kunne brukes som datagrunnlag inn mot estimeringen. Det bør imidlertid gjennomgås på nytt med tanke på om det nå er mer dekkende for parkeringstilbudet i landet.

I og med at parkeringstilgjengelighet og parkeringskostnader er blant de viktigste parametrene ved valg av transportmiddel (og bilhold) bør det gjøres en grundig vurdering av mulighetene for å forbedre modellen på dette punktet. Det bør både gjøres en oppdatering av inngangsdata (hvis det ikke er gjort nylig) og vurderes hvilke muligheter en har for å tilpasse modellen til endringer i parkeringsregime rundt omkring, f.eks. ulike varianter av beoerparkering.

### 3.4.5 Mobile tjenesteytere og lett varetransport

Siden de mobile tjenesteyterne (håndverkere, hjemmehjelper, ulike typer servicepersonell etc) er unntatt fra nullvekstmålet, er det viktig å ha en god oversikt over hvilken transport som kan knyttes til denne gruppen.

Dagens RTM er estimert på data fra RVU. I prinsippet dekker RVU mye av transporten utført av mobile tjenesteytere, gjennom det som registreres som tjenestereiser. Det er imidlertid krevende å trekke ut og få oversikt over hvilke av disse reisene som er å regne som mobile tjenesteytere, med RVUs spørsmålsstilling, registrering av yrkeskode etc. Det er også usikkert i hvor stor grad disse reisene faktisk er representert i RVU, bl.a. fordi det er en lang og tidkrevende registrering for en respondent som har mange turer i løpet av en dag, slik tilfellet fort vil være for hjemmehjelper og ulike serviceyrker.

I tilknytning til Byutredningene ble det gjort et mindre arbeid for å anslå omfanget av mobile tjenesteytere i RVU2013/14 (Grue 2017). Ifølge Grue (2017) kjennetegnes mobile tjenesteytere ved at de har yrker som krever reise fordi arbeidsoppgavene i hovedsak utføres for kunder/brukere/oppdragsgivere på ulike adresser. Disse turene skal i prinsippet inngå i RVU, som tjenestereiser. Yrkessjåfører, det vil si de som jobber med transport av personer og gods hvor det er selve transporten som er tjenesten, inngår ikke i begrepet mobile tjenesteytere og denne type kjøring av yrkessjåfører er også unntatt fra registrering i RVU. En viktig konsekvens av dette er bl.a. at kjøring utført av f.eks. pizzabud og andre typer levering/distribusjon ikke omfattes av RTMs etterspørselsmodell, selv om det ofte er kjøring med personbiler og varebiler under 5.6 meter. Nettutlagt trafikk fra RTMs matriser dekker derfor ikke uten videre all trafikk av lette biler (< 5.6 m) i SVVs tellepunkt. Det vil

derfor være viktig for verifisering av modellresultater mot tellinger at en har god kontroll på hva som faktisk inngår i modellens resultater.

I persontransportmodellene er tjenestereiser én samlet trafikantgruppe, som også inkluderer de mobile tjenesteyterne, uavhengig av om disse reisene foregår med personbil eller varebil. Mobile tjenesteytere er altså ingen selvstendig spesifisert trafikantgruppe i persontransportmodellene, og heller ikke i nasjonal godstransportmodell (NGM). I NGM er heller ikke varebiler særlig godt representert. Det er derfor et stort behov for mer kunnskap om de mobile tjenesteyternes kjøring.

I en pågående mulighetsstudie for utvikling av en regional godstransportmodell for urbane områder vurderes det hvor egnet dagens godsmodell er til å svare ut problemstillinger i et lokalt og regionalt perspektiv, samtidig som en sonderer i hvilken grad øvrige datakilder dekker kunnskapsbehovet. Kunnskap om transportmønsteret både for den lette varetransporten og for de mobile tjenesteyterne er her vesentlige elementer.

I denne mulighetsstudien er det nylig utgitt et arbeidsdokument; *Kunnskap og data om mobile tjenesteytere*» (Mjøsund og Hovi, 2020) hvor en har kartlagt transporttylser **med varebiler** for trafikantgruppen mobile tjenesteytere. Med mobile tjenesteytere menes her håndverker- og servicetransporter der det er behov for å transportere personer, verktøy og materialer til oppdragsstedet. Denne type transport er betydelig i byområder og foregår i all hovedsak med bil. Arbeidsdokumentet gir en oversikt over kunnskap og data som finnes om dette transportsegmentet i SSBs undersøkelse *Transport med varebiler fra 2018*. Mobile tjenesteytere som bruker **personbil** er ikke inkludert i kartleggingen. Eksempler på dette er f.eks. hjemmesykepleien, renholdsarbeidere, salg og service, arbeidsledere innen håndverk og service, etc.

Kartleggingen gir bl.a. informasjon om følgende elementer:

- Hvordan kjøring med varebiler fordeler seg på mobile tjenesteytere, distribusjon, linjetransport og privat kjøring – nasjonalt og for Oslo/Viken.
- Transportomfang (km, tonn, turer, leveranser) utført av mobile tjenesteytere (med varebil) i Oslo og hvert av Vikens «gamle fylker», samt fordelt på enkelte byområder i Viken.
- Fordeling av disse transportene på biltyper ut fra kjennetegn som lengde og nyttelast (inndeling i kassebiler av ulik lengde, øvrige varebiler og små lastebiler). Også aggregert opp til over og under 5.6 meter).
- Trafikkarbeid med og uten gods (knyttet til om bilen normalt kjøres med eller uten gods, for å skille ulike typer mobile tjenesteytere).
- Godstyper (varegrupper).
- Fremdriftsteknologi/drivstofftype, med noe fordeling på regioner i Oslo/Viken.

En av konklusjonene fra arbeidet er at de mobile tjenesteyterne sin kjøring med varebiler utgjør en betydelig del av trafikkarbeidet som utføres av det vi kaller små godsbiler (nyttekjøretøy med maks tillatt nyttelast under 3.5 tonn). Gjennomsnittlig transportmengde per tur med last er lav og ble beregnet til ca 70 kg i SSBs undersøkelse. Det aller meste som fraktes er byggematerialer og maskiner og utstyr som skal benyttes i forbindelse med oppdrag.

Vår vurdering er at det er behov for å jobbe videre med dette temaet med målsetting å få et klarere skille mellom hvilke turer som inngår i persontransportmodellen og hva som inngår i godsmodellen. Det ønskelige vil være at alle turer inngår i *enten* personmodellsystemet eller i godsmodellen, uten noen form for dobbelttelling eller turer som ikke inngår i noen av

modellene. Eventuelle turer som ikke genereres av modellene direkte, må vurderes tatt med i form av faste matriser som er etablert fra best mulig data.

Vi anbefaler at videre arbeid med hvordan en bedre skal hensynta lett varetransport og mobile tjenesteytere i modellsystemene samordnes med og bygger videre på det arbeid som nå gjøres i tilknytning til Urban godstransportmodell og SVVs Bylogistikkprogram. Det må også vurderes om de datainnsamlinger som gjøres i dag (RVU, Varebilundersøkelse etc) bør endres eller utvides slik at en får bedre kunnskap om enkelte typer transporter.

## 3.5 Kobling mot andre verktøy og modeller

### 3.5.1 Skolemodell

#### Beskrivelse

I RTMs turgenereringsmodell er «Skole» med som eget formål, men de genererte «skolebesøk» (skolereiser) benyttes ikke videre i modellsystemet. De er kun med i turgenereringsmodellen fordi de kan bidra til å «forklare» antall besøk som foretas med andre formål. I stedet for skolereiser fra turgenereringsmodellen bruker RTM en noe forenklet modell hvor det tas utgangspunkt i skoleplasser i hhv grunnskole, videregående skole og universitet/høyskole i hver grunnkrets, samt antall barn/ungdom i ulike aldersklasser i grunnkretsene.

Modellen for skolereiser er dels beskrevet i rapporten fra estimering av første RTM-versjon (Madslie m.fl. 2005), dels i to korte arbeidsnotat av Odd I. Larsen fra hhv 2004 og 2007.

I skolemodellen gjøres det først en forenklet beregning av en OD-matrise (uten fordeling på transportmidler) for hver av skoletypene grunnskole, videregående skole og universitet/høyskole. Dette gjøres ved gravitasjonsmodeller under forutsetninger om reisemønsteret, f.eks. at reiser til grunnskoler er kommuneinterne og til videregående skoler fylkesinterne. En distansestandsparameter er tilpasset hver skoletype for å unngå for lange skolereiser.

For transportmiddelfordelingen er det lagt inn en enkel logitmodell som fordeler turene på skoleskyss/kollektivtransport og andre reisemåter for hhv grunnskolereiser og videregående reiser. Den eneste variabelen som er med og styrer valget mellom transportformene er distansen mellom hjem og skole, der sannsynligheten for å velge kollektivtransport synker med økende distanse. De videregående skolene får en høyere andel gang/sykkel enn grunnskolen, ved samme distanse.

For høyere utdanning er også bilkjøring aktuell. Her er det i tillegg tatt med en dummy for reiser med destinasjon i Oslo, ut fra en antakelse om dårligere parkeringsmuligheter ved studiestedet her enn andre steder i landet. Denne parameteren øker sannsynligheten for kollektivtransport. En vesentlig ulempe ved nyttefunksjonene som er brukt er at de ikke skiller på områder med f.eks. godt og dårlig kollektivtilbud, og de vil heller ikke være sensitive til policytiltak utover de som endrer distansen i vegnettet. Endringer i kollektivtilbud og priser vil f.eks. ikke endre transportmiddelvalget.

#### Utfordringer og mulige forbedringer

Innenfor dagens opplegg for skolereisematiser er det trolig mest å hente på å se nærmere på OD-matrisene til og fra høyere utdanning. I første omgang bør det sjekkes hvorvidt det finnes bedre datagrunnlag for hvor studentene ved de ulike utdanningsinstitusjonene bor. Hvis slike data finnes, kan det brukes til å etablere matriser med et riktigere transportmønster enn i dagens modell. Det kan også være behov for å vurdere matrisene til videregående skoler på nytt, f.eks. i hvilken grad en klarer å gjenskape reisene i områder med ulike

prinsipper for skolevalg (f.eks. om det er fritt skolevalg eller om nærskoleprinsippet gjelder). Store feil i matrisene for studenter og videregående elever kan bety relativt mye for hvilken belastning som beregnes i kollektivtrafikken i en by.

Et annet element man kanskje bør se nærmere på er hvilken oppmøteprosent som forutsettes for studenter ved universitet og høyskoler. Nye undervisningsformer, med større mulighet for å følge forelesninger digitalt, kan ha medført lavere oppmøteprosent enn på estimeringstidspunktet.

Når det gjelder fordelingen på transportmidler er det helt nødvendig å gjøre noe med dagens skolemodell, da ting tyder på at det er en feil i modellformuleringen for høyere utdanning. Denne feilen resulterer i at en altfor stor andel av studentene beregnes å kjøre bil til studiestedet, man får f.eks. en bilførerandel på hele 60% for turer på 3-4 kilometer. Det kan virke som det er blitt feil fortegn på en av parameterne i nyttefunksjonen for bilreiser, noe som spesielt påvirker forholdet mellom bil- og kollektivreiser. En test med Dom\_Agder-modellen, hvor en har lagt inn andre parametere i transportmiddelvalgmodellen for reiser til høyere utdanning (parametere etablert av Jens Rekdal i forbindelse med en studie av reiser til NTNU), viser at bilturer i skolereisemodellen reduseres med ca. 78% fra opprinnelig beregning, mens kollektivturer øker med ca. 22% og gang/sykkelturer øker med ca. 3%.

Vi observerer for øvrig at det ser ut til å være en betydelig usikkerhet i RVU knyttet til studenters skolereiser. Det er for eksempel veldig stor forskjell i bilføreandel mellom ulike årsganger av RVU, og vi ser også at det i RVU 2013/2014 er altfor mange studenter over 30 år som har besvart undersøkelsen i forhold til studenter i alderen 20-29 år.

En minimumsløsning for videre arbeid med skolemodellen vil være å fikse den feilen som ligger i transportmiddelvalget for universitets- og høyskolereiser. Det hadde imidlertid vært en fordel å forbedre skolereisemodellen på en slik måte at transportmiddelvalget påvirkes av tiltak som gjøres, f.eks. endringer i kollektivtakster eller kollektivruter, eller i parkeringssituasjonen ved studiestedet. Dette kan f.eks. gjøres ved å estimere transportmiddelvalget i alle skolemodellene på nytt, ved bruk av logitmodeller som bruker flere LoS-data enn kun distanse i nyttefunksjonen for de ulike transportmidlene. Så vidt vi kjenner til så har Jens Rekdal og Tom N. Hamre for et års tid siden levert en skisse til hvordan dette kan tenkes gjort.

### 3.5.2 Aimsun

SVV bruker Aimsun for mesoskopiske- og mikroskopiske analyser av trafikkflyt. Aimsun er et kommersielt verktøy og kommer med betydelige lisenskostnader.

Kobling av makroskopiske etterspørselsmodeller (TraModBy) mot dynamiske trafikkavviklingsmodeller/simuleringsverktøy (Aimsun) er et tema som er omtalt i rapport fra Flügel mfl (2014). Rapporten anbefalte en uttesting av kobling, men forutså utfordringer i dataflyten og informasjonstap på grunn av de ulike datastrukturer i RTM og Aimsun.

En fersk rapport fra Urbanet analyse (Høyem mfl 2020) har testet en kobling mellom RTM og Aimsun. Rapporten konkluderer med at integrering mellom TradModBy og Aimsun er teknisk mulig. Rapporten beskriver at integrering er ressurskrevende og at det er noen utfordringer i forbindelse med at RTM og Aimsun ikke har samme geografiske område, soneinndeling, nettverk og tidsperioder. Det beskrives også at Aimsun ikke produserer LoS-data for sonepar som ikke har bilreiser.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Dette kan ifølge Høyem mfl «løses» med mange simuleringer der det tilfeldig tildeles bilturer i Aimsun for å dekke opp for alle OD-par.

Utfordringen ved at etterspørselsmodellen og trafikksimuleringsmodellen ikke «snakker godt sammen» (pga ulik metodikk/datastruktur) unngås i agentbaserte simuleringsmodeller som bruker en integrert modellering med dynamisk etterspørselsmodellering (se avsnitt 4.3).

### 3.5.3 Bilparkmodell

For noen typer analyser kan det være ønskelig å predikere endringer i sammensetning av drivstofftyper.

I siste versjon av regional persontransportmodell ligger informasjon om bilparkens sammensetning i sonedatafilen på grunnkrets nivå, basert på informasjon fra kjøretøyregisteret (på kommunenivå). Dette betyr at hver grunnkrets er forbundet med (kommunens) andel elbiler, hybridbiler og biler med konvensjonelle forbrenningsmotorer. Hvis mer detaljerte data foreligger, kunne man tilordne ulike andeler for ulike grunnkretser i kommunen. For framtidige år kan en benytte framskrivninger på fylkesnivå fra beregninger med bilparkmodellen BIG (Fridstrøm og Østli 2018, Fridstrøm 2019).

Bilkostnader (basert på bilparkens sammensetning i startgrunnkrets) ligger som gjennomsnittverdier på grunnkrets nivå i modellen. Men selve biltypen er ikke tatt med videre i modellen for transportmiddel- og destinasjonsvalg. Man skiller heller ikke mellom type personbil i nettutleggingen. Man kan derfor ikke uten videre skille mellom elbiler og biler med konvensjonelle forbrenningsmotorer på strekningsnivå eller ved bompengesatsinger.

Ved siden av mulige aggregeringsfeil og manglende muligheter for segmentering av resultater, ligger en annen begrensning i at elbilandelen er eksogen og ikke påvirkes av tiltaksspesifisering.

For å oppnå en slags langsiktig likevekt mellom transportmarked og bilkjøpmarked kunne man se for seg en integrering mellom RTM og bilparkmodellen BIG. Det er flere utfordringer forbundet med det og en vellykket integrering ville trolig forutsette at datastruktur/segmentering i BIG tilpasses RTM.

Det som muligens er mer realistisk på kort/mellomlang sikt er å utvide bilholdsmodellen i RTM slik at den fanger opp bilhold segmentert etter type bil. Det kan også tenkes at bilalternativet i modellen for transportmiddel- og destinasjonsvalg kan splittes i typer biler. Dette krever trolig en reestimering av modellen med nye RVU-data. En utfordring ved forrige reestimering basert på RVU 2013-2014 var at elbilandelen fortsatt var altfor liten. Med de nyeste RVU data burde det derimot være fullt mulig.

### 3.5.4 Kobling mot modell for overføring av trafikk mellom tidsperioder

Den regionale transportmodellen, RTM, er en statisk modell innenfor forhåndsbestemte tidsperioder. Mens etterspørselsmodellen i RTM-systemet, Tramod\_By, predikerer reise-frekvens, transportmiddelvalg og destinasjonsvalg, kan den ikke predikere valg av avreisetidspunkt. Modellen kjøres enten med 1, 2 eller 4 tidsperioder. I forbindelse med noen analyser, spesielt i byområder, er det ønskelig å kunne beregne forventede effekter på valg av reisetidspunkt, særlig for biltrafikk. Dette kan typisk handle om at kostnader og restriktive tiltak rettet mot reiser i rush overfører trafikk til perioder utenom rush, eller fra makstimen til «skuldertimene» før og etter denne timen.

Flügel og Hamre (2019) har utviklet en modell for overføring av trafikk mellom tidsperiodene. Modellen har en del metodiske forbedringer sammenlignet med en tidligere modell (Rekdal mfl 2012). Den foreløpig implementerte modellkoden er tilpasset Oslo-

området (RTM23+) og bilturer, men kan ved mindre justeringer i koden også brukes for andre delområder og andre transportmidler.

Det kan være relevant å vurdere oppfølgingsprosjekter som jobber mot en implementering i modellsystemet. Man kan f.eks. se for seg et opplegg der brukerne kan kjøre en tilleggsmodul ved opsjon.

## 3.6 Nye datakilder

Når det gjelder data kan vi skille mellom data ved etablering av RTM og data som kan brukes til bedre kalibrering av RTM. Førstnevnte består i stor grad av datagrunnlag fra reisevaneundersøkelser som brukes til estimering av adferdsparameterne, segmentering i persongrupper og inndeling i reishensikter.

### 3.6.1 Behov for bedre reisevanedata

Spørreundersøkelser sliter generelt med utvalgsskjevhet, og utfordringen med å rekruttere et representativt utvalg har trolig økt de senere årene. Sammenligninger Jens Rekdal har gjort mot registerdata tyder f.eks. på at bilhold og førerkortinnhav er overrepresentert i RVU. Også personer med høyere utdanning er bedre representert i RVU enn i befolkningen. At det kan være vanskelig å rekruttere personer med lav utdanning og/eller innvandringsbakgrunn kan være et sentralt element i denne sammenhengen.

Det er også behov for bedre informasjon fra RVU angående enkelte variabler. Dette gjelder for eksempel variabler til å identifisere mobile tjenesteyter (se avsnitt 3.4.5) og skolereiser (se avsnitt 3.5.1).

En kombinasjon av (mer tradisjonelle) reisevanedata og mobildata kan også tenkes å forbedre datagrunnlaget til estimering og segmentering i RTM. Rene mobildata, uten informasjon om bakgrunnsvariabler, reishensikter, brukt transportmiddel mv, er mindre aktuelle til estimering, men kan være en kilde for mer detaljert modellkalibrering (se neste avsnitt).

### 3.6.2 Nye typer data til bedre kalibrering av modellen

Ved siden av mer tradisjonelle variabler (med opphav i SSB eller RVU) kan RTM-systemet benytte seg av nyere typer data.

For en bedre kalibrering av modellen kan følgende data være en viktig kilde:

- Flere og nye trafikktelepunkter
- Flere og nye sykkelstasjoner
- Mer omfattende passasjertellinger på kollektivt
- Sanntidsinformasjon kollektiv (forsinkelser) og faktisk kjøretid
- Fergedatabanken (antall kjøretøy)
- Bompengestasjoner (evt. både informasjon om antall biler og fart)
  - [www.reisetider.no](http://www.reisetider.no) (SVV) som benytter antenner som leser AutoPASS-brikker og fra dette beregner reisetider på hovedveger
- ATK-stasjoner (automatisk trafikkontroll)
- Data direkte fra biler/flåtestyringsdata



- Trafikkdata fra signalanlegg<sup>5</sup>
- Automatisk deteksjon av kjøretøy. F.eks. ved hjelp av bildeanalyser (maskinlæring).
- Mobildata/Appdata <sup>6</sup>

Mobildata og ATK-stasjoner som kan måle hastighet og trafikkmengde kan også brukes til kalibrering av Volume-Delay-Funksjoner.

Transportforskningen er veldig avhengig av tilgang til gode og omfattende data. I denne sammenheng kan det være fordelaktig å diskutere eierskap og deling av data og hvordan ansvar og roller fordeles mellom ulike interessenter og forskningsinstitutter/konsulenter.

---

<sup>5</sup> En del lysregulerte kryss er styrt av trafikkvolum. NB: hensikten er å måle lengden på køer, er ikke spesielt egnet til å telle trafikk som er stillestående.

<sup>6</sup> Mobildata kan kjøpes fra kommersielle aktører (Google, Telenor, Telia med mer). TØI har også utviklet en egen App som samler inn detaljerte transportdata via mobiltelefonen.

## 4 Nye metoder og modeller

### 4.1 Motivasjon for nye modeller

Motivasjonen for nye modeller avledes direkte fra de metodiske begrensinger ved klassiske transportmodeller. Det er ønskelig å modellere en (transport-)verden som er dynamisk, mikroskopisk og stokastisk med en modell som har de samme metodiske egenskaper. En mer realitets-nær modellering av adferd (mikroskopisk rutevalg) og fysiske prosesser (dynamisk trafikkflyt) vil gi høyere detaljeringsgrad og enklere inspeksjon (validering) av modellresultater, for eksempel basert på simuleringvideoer.

### 4.2 Metode for mikroskopisk og dynamisk trafikkavvikling

«State-of-the-art»-modeller innenfor trafikkavvikling er dynamiske, mikroskopiske og stokastiske.

Overgangen fra statisk-makroskopisk (se vedlegg B) til dynamisk-mikroskopisk kan deles inn i overgang fra statisk-makro til dynamisk-makro, og fra dynamisk-makro til dynamisk-mikro. Når man går fra statisk-makro til dynamisk-makro, må etterspørselen lastes for hver relasjon i henhold til avreisetider. Fra dynamisk-makro til dynamisk-mikro trenger man å tilordne turer til enkeltindivider (ikke OD-par). Dermed fungerer en mikroskopisk og dynamisk rutevalgprosess som i følgende algoritme (se Nagel og Flötteröd 2012):

*Beregn innledende ruter som den beste ruten på et tomt nettverk for alle reisende.*

*Gjenta deretter følgende (a-c) mange ganger:*

- a) Last alle reisende på nettverk i henhold til avreisetider, la dem følge rutene sine og beregne nye reisetider/forsinkelse i nettverket og GK (generalisert kostnad)
- b) Beregne nye ruter basert på nettverksforsinkelser og GK
- c) Tilordne alle reisende til en rute basert på nettverksforsinkelser og GK.

Denne algoritmen resulterer i en mikroskopisk brukerlikevekt der ingen reisende ensidig kan forbedre adferden sin (tilsvarer Nash-likevekten i spillteori). Fra spillteori vet vi at det er situasjoner hvor «miksedede strategier» eksisterer i likevekt. Dette kan motivere til å modellere rutevalg stokastisk der reisende nummer  $n$ , velger rute nummer  $k$ , med en viss sannsynlighet:

Gitt forventningsverdi av kostnad  $c$ , gitt en funksjon av nettverk  $x$ , gitt trafikkvolumer på rute  $r_k^n$ .

Matematisk  $P_n(k) = P_n(k|E\{c(x\{r_k^n\})\})$  (Nagel and Flötteröd 2012).

En slik valगतferd fører til en mikroskopisk og stokastisk brukerlikevekt, der de reisende velger forskjellige ruter med forskjellige sannsynligheter gitt forventede reisekostnader som avhenger av forventede rutevalg for andre reisende.

Stokastisk rutevalg fører vanligvis til en mer balansert trafikkavvikling sammenlignet med deterministiske modeller (for eksempel unngås «alt-eller-ingenting» fordeling). Det kan

argumenteres for at stokastisk rutevalg er mer realistisk, ettersom rutevalg i virkeligheten er komplekse og avhenger av mange faktorer som ikke kan observeres av forskeren.

Beregningen av dynamiske nettverksforhold er ofte ikke mulig med analytiske beregningsmetoder. For å modellere de (svært komplekse) prosessene i dynamisk og mikroskopisk trafikkflyt er man derfor avhengig av simuleringsteknikker.

Som allerede kort beskrevet i avsnitt 2.2., kan simuleringsmodeller for trafikkavvikling klassifiseres etter deres oppløsning: makroskopisk, mikroskopisk og en mellomløsning av disse: mesoskopisk. Makroskopiske simuleringsmodeller beskriver tidsrom-utvikling for aggregerte mengder. Deres viktigste forbedring i forhold til VDF-modeller er at de introduserer dynamiske effekter. For en beskrivelse av state-of-the-art konsepter er det mer interessant å fokusere på mikroskopisk og mesoskopisk modellering.

I mikroskopiske trafikkflytmodeller er flyten basert på beskrivelsen av individuelle kjøretøy. Interaksjoner mellom kjøretøyene (at biler følger etter hverandre og holder en viss avstand til hverandre<sup>7</sup>) og interaksjoner mellom kjøretøyene og infrastrukturen (kjørefeltsendringer, stopp ved signalanlegg osv.) er modellert for individuelle kjøretøy (Barcelo 2010).

I mesoskopiske modeller kan kjøretøy grupperes. Et slikt grep kan for eksempel være at alle kjøretøy som kommer inn på en trafikklenke, kjører homogent (det vil si uten å interagere med hverandre) fram til de når slutten av køen. De fleste mesoskopiske modeller tillater ikke forbikjøring, og er derfor basert på prinsippet om "first-in-first out" (som i MATSim, se neste avsnitt). Mesoskopiske (og mikroskopiske) trafikkflytmodeller tar vare på kapasitetsbegrensningene til lenkene og kan modellere den romlige forplantningen av køer i nettverket. Når lenkekapasiteten er nådd, kan ikke ytterligere kjøretøy komme inn på lenken, og køen brer seg tilbake «oppstrøms» i nettverket.

Ved å utelate detaljert kjøreadferd, er mesoskopiske modeller vanligvis mye raskere enn mikroskopiske modeller og kan brukes på store områder (opp til rundt 10 millioner kjøretøy og mer). Dette gjør metoden høyst relevant for strategisk transportplanlegging, mens mikroskopiske trafikkflytmodeller med detaljert kjøreadferd og nettverksrepresentasjon er mer passende for spesifikke og lokale analyseformål (optimalisering av signalsystemer, utforming av rundkjøringer osv.).

## 4.3 Agent-baserte modeller (MATSim)

Et integrert modellsystem som har bevist sine evner i praksis og som har blitt brukt i mange land, er MATSim (Multi-Agent Transport SIMulation). MATSim er åpen-kilde og er utfyllende dokumentert i Horni mfl (2016). Med sin agentbaserte tilnærming tilbyr MATSim en dynamisk trafikksimulering med etterspørselsjusteringer. Dette modellsystemet gjennomgås mer detaljert og fra et mer praktisk perspektiv i de følgende avsnitt, basert på to prototyper for MATSim i Norge (Flügel et al 2014 og Flügel og Ævarsson 2018).

### 4.3.1 Metode

Den konseptuelle ideen til MATSim er at en dynamisk/mikroskopisk rutevalgsalgoritme (se avsnitt 4.2) utvides til å omfatte heldaglige aktivitetsplaner. Slike planer inkluderer når, hvor, med hvilket transportmiddel og via hvilken rute enkeltpersoner (agenter) skal reise for å utføre alle sine planlagte aktiviteter. Den typiske algoritmen er da:

---

<sup>7</sup> «car following and gap-acceptance»



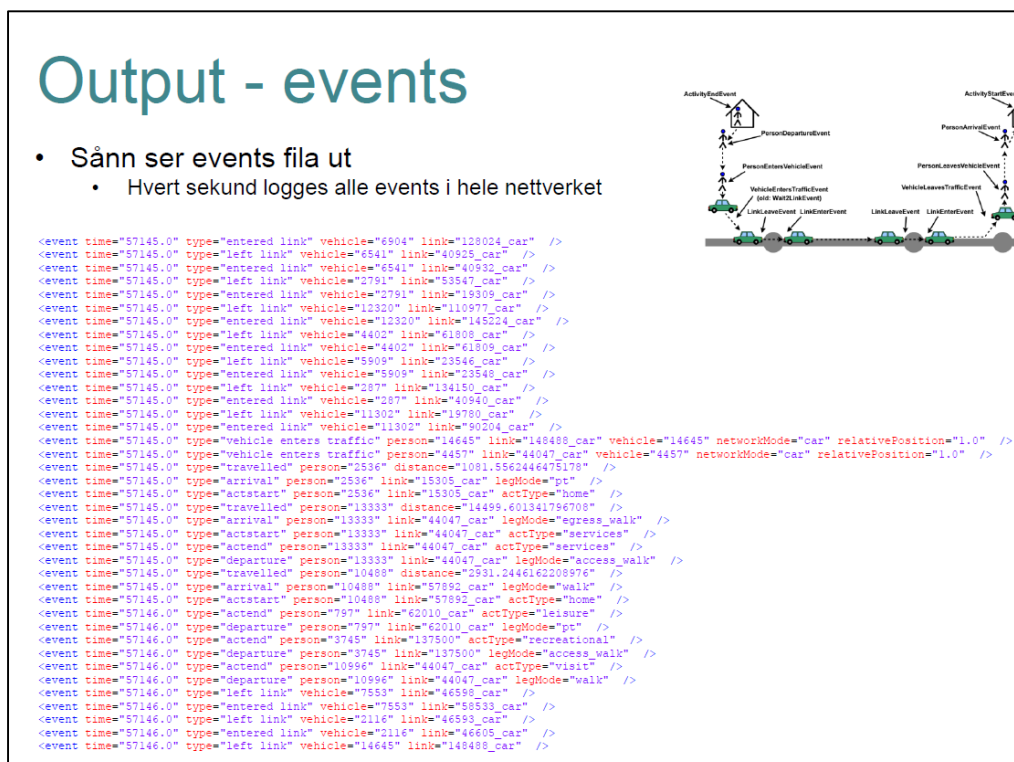
Som et første steg må en syntetisk populasjon genereres.<sup>8</sup> Sosiodemografi og den geografiske fordelingen skal være representativ for den virkelige befolkningen. Eksakte koordinater må tilordnes hjemme- og aktivitetssteder, da MATSim bruker koordinater i stedet for soner. For fremtidige scenarier kreves forventet befolkningsstørrelse og reise-mønster, f.eks. basert på grunnlag av befolkningsframskrivninger og arealbruksmodeller.

Sentrale inndata i modellen er aktivitetsplanene som inneholder aktivitetstype, beliggenhet (eksakte koordinater), varighet og (ønsket) starttid for alle (planlagte) aktiviteter i et døgn. Se figur 4.3 (i neste avsnitt) for et eksempel på en plan for én enkelt agent. Agent-baserte modeller har typisk mellom 100 000 og 10 millioner agenter.

Aktivitetsplaner leses inn i trafikksimuleringsmodellen (MOBSim) og den nødvendige transporten simuleres samtidig for alle agenter. Ettersom hver agent feilaktig forutser fri flyt i den første iterasjonen, er det typisk mye kø på enkelte deler av nettverket ved første iterasjon.

Trafikkflytmodellen i en standard MATSim modell er mesoskopisk (se tidligere). Selv om kjøretatferden på lenke-nivå er basert på et noe forenklet «first-in-first-out» prinsipp, har MOBSim muligheten til å etterligne og predikere mønster i kødanning ganske nøyaktig, i det minste med henblikk på et detaljeringsnivå som er tilstrekkelig for strategisk transport-planlegging. MOBSim virker å være nokså effektiv og kan simulere trafikstrømmer for hele land i nokså detaljerte nettverk (f.eks. hele Sveits som beskrevet i Meister et al (2010)).

Utdataene fra MOBSim er informasjon om reisetider på lenkenivå, samt monetære kostnader på lenker med bompenger. Dette lagres i veldig disaggregerte filer, såkalte event-filer som dokumenterer («sekund for sekund») hvor hver agent befant seg i løpet av dagen (figur 4.2).



Figur 4.2: Utdrag fra en eventfil (utdata) i MATSim (kilde: Flügel og Evarsson 2018).

<sup>8</sup> Det gjøres på den enkleste måte ved å skalere opp respondenter fra reisevaneundersøkelser (se avsnitt 4.3.4)

Basert på «eventfiler» beregnes det et poengtall (nytteverdi) for hver utførte aktivitetsplan. De underliggende nyttefunksjonene som brukes i etterspørselsmodelleringen er typisk spesifisert slik at agenter får positiv nytte av å utføre aktiviteter (til ønskete tider) og negativ nytte av å bruke tid på transport, og for å komme for sent til aktiviteter (se Nagel og Flötteröd 2012 for detaljer). MATSim gjør det mulig å justere nyttefunksjonene manuelt; Kickhöfer et al (2011) for eksempel endrer nyttefunksjonene slik at de avhenger av inntektsnivået til agentene.

Planen som skal gjennomføres "dagen etter" velges som følgende:

Med en viss sannsynlighet genereres den nye planen. I standardmodellen er det tre måter for hvordan nye planer kan genereres:

- 1) avreisetidspunkt endres
- 2) transportmiddelvalg endres
- 3) rutevalg endres.

Når en ny plan genereres, blir den automatisk valgt for utførelse på neste dag. Hvis det ikke blir generert en ny plan, velger agentene blant de eksisterende planene i hans/hennes valgsett. En sannsynlighetsfunksjon som ligner på en multinomial logit-modell brukes, og sannsynligheten for en plan som skal velges er basert på et poengsystem til hver plan. Dette innebærer at den "beste" planen har størst sannsynlighet.

De valgte, eller nylig genererte planene for alle agenter blir deretter lagt inn igjen i MOBSim. Den iterative prosedyren gjentas inntil nytteverdiene blir stabile. En situasjon med stabil nytteverdi (etter flere iterasjoner) tolkes som en likevektstilstand (agenter kan ikke forbedre sine planer gitt valg av planer for alle andre agenter).

### 4.3.2 Databehov

RTM og agentbaserte modeller som MATSim har nokså like databehov. I bunn trenger begge 1) reisevanedata/befolkningsdata og 2) nettverksdata for å etablere modellen. For kalibrering av modellen trenger begge modeller også trafikktegninger.

MATSim trenger i større grad tidsmessig avhengig informasjon. På etterspørselssiden må man knytte aktiviteter til eksakte klokkeslett. Figur 4.3 viser eksempel på en aktivitetsplan i MATSim.

```

<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 4.3: Eksempel på en aktivitetsplan (inndata) i MATSim (kilde: Fljigel og Evarsson 2018).

Vanligvis kommer denne informasjonen fra data fra reisevaneundersøkelser, fortrinnsvis fra undersøkelser der respondenten rapporterer heldaglige reisedagsbøker (som RVU eller RUTER-MIS).

For å etablere nettverket trenger man et system med lenker og noder, samt lenkeegenskaper som fri-flyt kjørehastighet, antall felt og kapasitet (per felt). For kollektivtransport må også kapasitet og størrelse på kjøretøy samt rutetabeller og lokasjon til holdeplassene spesifiseres.

Både RTM og MATSim trenger populasjonsdata til å lage et representativt befolkningsgrunnlag. For framtidige scenarier/kjøringer trenger begge modeller framskrivninger.

MATSim trenger ikke et sonesystem, men eksakte koordinater for destinasjoner. Disse kan genereres syntetisk ved behov, f.eks. ved randomisering av koordinater i RVU eller MIS som man påkoder basert på rapporterte adresser).

Kort oppsummer inngår følgende data i en MATSim modell.

- Etterspørselsdata
  - Reisedagsbøker (RVU eller MIS)
  - Bakgrunnsdata om personer (RVU eller MIS) gjerne kalibrert mot registerdata
- Tilbudsdata
  - Nødvendig: Veinettverk
  - Bompengestasjoner og prisstruktur
  - For simulering av kollektivtransport
    - Rutetabeller
    - Koordinater til stoppesteder
    - Ruter til kollektivlinjene
    - Priser for kollektivtransport
    - Materiell (antall stå- og sitteplasser)
- Øvrige data som kan øke presisjonsnivået
  - «Åpningstiden» til aktiviteter
  - Fasiliteter (skoler, kjøpesentre, ...)
  - Geografisk tilpassede adferdsparametre
  - Telledata (for kalibrering)

### 4.3.3 Styrker og svakheter

Fordeler og ulemper ved MATSim er i stor grad «speilvendte» i forhold til RTM.

#### Fordeler ved MATSim:

- Metodiske fordeler som følge av dynamisk og mikroskopisk tilnærming, deriblant:
  - Modellering av avreisetidspunkt
  - Eksplisitt modellering av kødannelse, for eksempel tilbakevirkning av flaskehals
  - Modellering av soneinterne reiser (bruk av eksakte koordinater)
  - Realistisk modellering av rutevalg
  - Man kan segmentere resultater etter alle ønskede dimensjoner (som det foreligger data for)

- Fleksibel modellstruktur
  - Relativt enkelt å videreutvikle modellen
  - Eksisterende opplegg («extensions») for autonome taxier
  - Mulighet for å erstatte enkelte modellkomponenter
  - Fleksibel aggregering av resultater
- Åpen-kilde og gratis (men uten brukersupport)
- Forsøker å etterligne virkelige prosesser, og resultatene fremstår dermed intuitive

### Ulemper med MATSim

- Ingen langsiktig adferdsmodellering i standardmodellen (reisefrekvens og destinasjonsvalg)
- Intet etablert opplegg for å ta modellresultater videre til nytteberegning<sup>9</sup>
- Mer krevende kalibrering
- Kan være vanskelig å avlede underliggende årsak-virkningsmekanismer
- Lite erfaring med bruk i Norge (se neste avsnitt)

Det kan diskuteres om de stokastiske modellegenskapene til MATSim er en fordel eller en ulempe. Stokastikk innebærer at enkelte modellkjøringer med identiske inndata fører til forskjellige modellresultater. For scenariosammenligning bør det derfor gjøres flere modellkjøringer/prediksjoner og fordeling over disse skal være utgangspunkt for evaluering. Dette kan være tidkrevende, men anses som den mest korrekte måten å vurdere komplekse systemer på (for hvilke det ikke finnes «perfekte» modeller).

Stokastikk må også sees i sammenheng med robusthet. Spesielt for nyttekostnadsanalyser hvor man direkte sammenligner scenarier, er det viktig at modellresultatene kan anees som robuste. Robusthet er tett knyttet til hvordan usikkerheten (stokastikken) tas med i modellen. Makroskopiske modeller som i all hovedsak er deterministiske, forutsier ingen usikkerhet i de endogene prosesser som beskrives av modellen. Usikkerhet i prediksjoner er i så fall bare uttrykt ved usikkerhet i eksogene inndata (befolkningsvekst, bensinpriser osv.). Dette gjør bruk av RTM for nyttekostnadsanalyser mer handterlig (siden resultater framstår som robuste) men medfører en fare til at fundamentale usikkerheten i prediksjonen blir undergravet.

Modellens beregningstid kan variere betydelig for ulike metoder, og anees som en viktig faktor i praksis. I utgangspunktet bruker dynamiske metoder lenger tid enn statiske modeller. En sammenligning mellom aggregerte modeller (segmenterte makromodeller som løses i matematiske programmer) og disaggregerte modeller (meso-/mikro-modeller som løses ved simulering på individnivå) avhenger sterkt av hvor mye heterogenitet man vil fange opp. En ikke-segmentert makromodell tar ikke lang tid å kjøre gjennom, men beregningstiden stiger (omtrent lineært) med antall segmenter. RTM, som kan inneholde flere hundre segmenter, kan derfor ta ganske lang tid. Simuleringsmodeller med en gitt syntetisk populasjon har en konstant beregningstid uavhengig av hvor mange bakgrunnsvariabler man tilordner beslutningstakerne eller kjøretøyene.

MATSim har i stor grad utviklet av et akademisk team noe som har kan har fordeler (høyt vitenskapelig kvalitet og god dokumentasjon) og ulemper (lite brukersupport).

---

<sup>9</sup> Men prinsipper for det er etablert i Kickerhöfer (2014)



#### 4.3.4 Bruk av MATSim i Norge

MATSim-modeller har blitt etablert for mange byområder rundt i verden (figur 4.4)



Figur 4.4: Kjente MATSim-modeller i verden (Kilde: matsim.org).

Ut fra vår kunnskap har det vært tre utviklingsprosjekter rundt MATSim i Norge:

- I 2014 ble det i regi av TØI etablert en modell for Trondheimsregionen som hovedsakelig ble brukt til å studere ulike bomringtakster<sup>10</sup> (se lenger ned)
- I 2017 etablerte TØI en MATSim modell for Oslo som, på oppdrag for PROSAM, ble brukt til å studere effekter av sykkelekspressveien mellom Bryn og Lillestrøm (se lenger ned)
- Et pågående prosjekt i samarbeid mellom TØI, RUTER og Jernbanedirektoratet jobber mot implementering av tog og T-baneruter i Oslo-området basert på ENTUR-data. Målet er å etablere en dynamisk representasjon av kollektivtransport i Oslo og å gjennomføre den første agent-baserte simulering av kollektivtransport i Norge

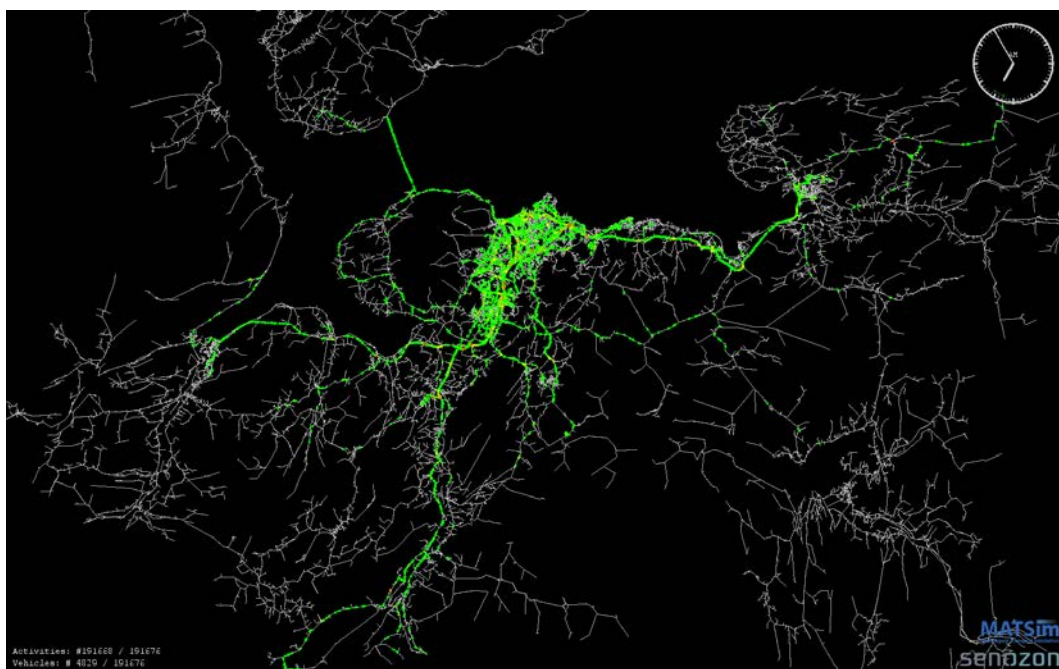
Alle tre prosjekter hadde/har forholdsvis små økonomiske rammer (under en halv million kroner i egen- og/eller ekstern finansiering)). TØI har søkt ulike forskningsrådsprosjekter med MATSim som hovedmodelltilnærming, men har foreløpig ikke lyktes med å sikre finansiering gjennom NFR.

Trondheim-modellen er omtalt i Flügel mfl (2014). Modellen består av 191 676 agenter og deres aktivitetsplaner, generert basert på reisedagbøker fra 4453 respondenter i RVU 2009/2010. Av personvern hensyn ble stedfesting og «tidsstempler» for aktiviteter randomisert rundt de faktisk rapporterte verdier, en unngår da «klumper» av agenter.

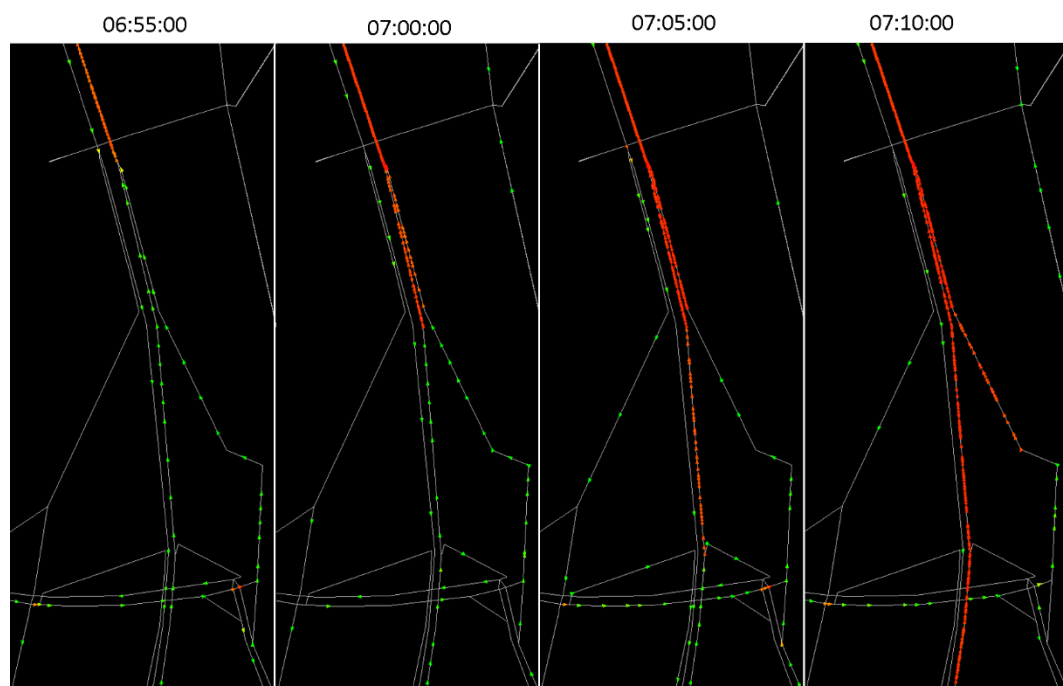
Veinettet ble generert basert på Elveg-nettverket der det ble antatt en fast veikapasitet per felt.

Figur 4.5 og figur 4.6 viser simulert trafikk i morgenrushet for hele området og for et utvalgt vegkryss.

<sup>10</sup> Trondheim-modellen ble også brukt i en masteroppgave som så på mulig modellering av destinasjonsvalg i MATSim (Bockemühl 2016).

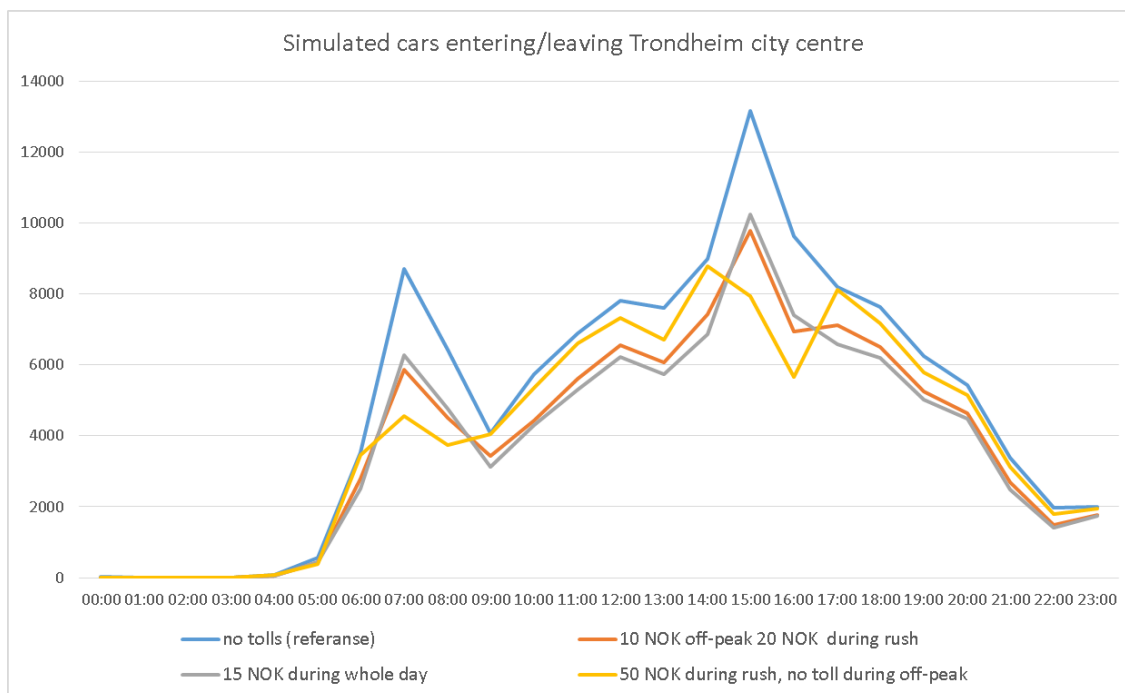


Figur 4.5: Nettverk og simulert biltrafikk i Trondheim klokken 06:55:00 (kilde Flügel mfl 2014).



Figur 4.6: Illustrasjon av kødannelse i MATSim-modellen på en motorveipåkjøring i Trondheim. Røde biler indikerer redusert hastighet (kilde Flügel et al 2014).

For å teste om MATSim forutsier rimelige atferdsendringer, ble det utført en liten case-studie. Nye bompengestasjoner til Trondheim sentrum ble kodet i nettverket og tre strukturer for prising ble testet. Figur 4.7 illustrerer effektene av å innføre de ulike bompengesatsene.

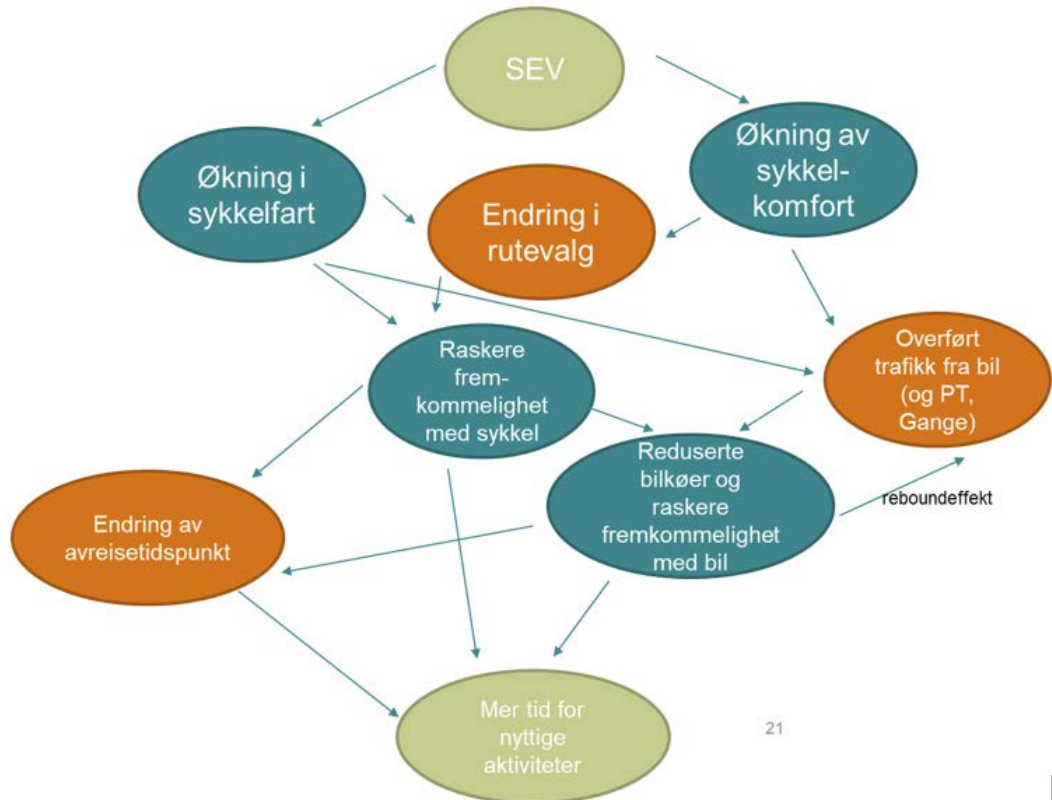


Figur 4.7: Biler som kjører inn/ut av Trondheim sentrum i referansesituasjonen (ikke bompenger) og med tre ulike prisstrukturer for kjøprising. (kilde Flügel et al 2016).

Sammenlignet med referansescenariet uten bompenger, reduseres antall biler i alle bompengescenariene. Noen agenter endrer transportmiddel (overgang fra bil til kollektiv, gange eller sykkel), og andre agenter som ellers ville ha kjørt gjennom Trondheim sentrum, endret rute. Ut fra en sammenligning av de tre ulike prisstrukturene, er det også tydelig at agenter endrer avreisetidspunkt. Forskjellen mellom en flat prisstruktur på 15 kr hele dagen og en prisstruktur med 10 kr utenom rush og 20 kr i rush er liten (relativt få agenter endrer avreisetidspunkt) mens effekten av 50 kr i rush (og ingen bompenger utenom rush) er betydelig. Faktisk er trafikken i dette scenariet høyere før og etter rushen (enn i rushen). Dette tyder på at mange agenter har endret avreisetidspunkt for å unngå høye bompenger. MATSim modellen for Oslo hadde fokus på sykkelturet og man brukte derfor Open Streetmap til å generere bil- og sykkelveinettet. Open Streetmap er noe mer detaljert enn NVBD med tanke på stier og snarveier som kan brukes av syklister og fotgjengerne. Oslo-modellen består av rundt 900 000 agenter (generert fra over 15 000 reisedagbøker fra reisevaneundersøkelsen RUTER-MIS).

Casestudien gikk ut på å studere endringer i transportmiddelvalg og rutevalg etter innføring av en sykkelekspressvei (SEV) mellom Bryn og Lillestrøm. SEV tillater økt sykkelfart og økt sykkelkomfort, noe som er kodet i MATSim på lenkenivå.

Økt sykkelfart og sykkelkomfort medfører endringer i rutevalg, reisemiddelvalg og endring i avreisetidspunkt, som illustrert i figur 4.8. Det simuleres også bilkøer i modellen og det kan måles en (veldig liten) rebound-effekt på transportmiddelvalget siden bilkøene blir (marginalt) mindre i et scenario med SEV.



Figur 4.8: Skjematisk illustrasjon av simulerte effekter av sykkelekspressvei (SEV) i MATSim modellen for Oslo.

MATSim tillater å studere individuelle rutevalg ved å sammenligne rutevalg for en gitt agent i to simuleringer. I figur 4.9 vises tre eksempler på dette.

| Scenario                    | Eksempel 1:<br>Samme rutevalg<br>men raskere framføringstid pga<br>SEV (66 minutter versus 60<br>minutter) | Eksempel 2:<br>Endring i rutevalg og<br>raskere framføringstid (14<br>min 46 sek versus 14 min 2<br>sek) | Eksempel 3:<br>Endring i rutevalg og<br>treigere framføringstid men<br>økt komfort (53 min 26 sek<br>versus 55 min 19 sek) |
|-----------------------------|--|--|--|
| Uten SEV                    |  |  |  |
| Med SEV<br>(rød<br>markert) |  |  |  |

Figur 4.9: Tre eksempler på simulert tilpasning av rutevalg før og etter åpning av SEV mellom Bryn og Lillestrøm.

Eksempel 3 er spennende siden dette viser at adferdsendringer kan føre til endring til rutevalg med lengre framføringstid. Dette trenger ikke å være irrasjonelt siden vi antar en

høyere sykkelkomfort på den nye ruten (pga høyere opplevd trygghet). Det kan dog hende at det stokastiske leddet i MATSim også har påvirket dette valget til en viss grad.

#### 4.3.5 Prinsipielle muligheter med MATSim til å modellere tiltak i byer

I dette avsnittet oppsummerer vi kort prinsipielle muligheter/fordeler ved å bruke en agentbasert tilnærming til å modellere tiltak i byområder. En vellykket implementering i en operasjonell modell vil for noen tiltak kreve større utviklingsjobb. De prinsipielle fordelene er kort beskrevet i tabellen under.

Tabell 4.1: Prinsipielle fordeler ved metodikken i MATSim til å modellere utvalgte tiltak.

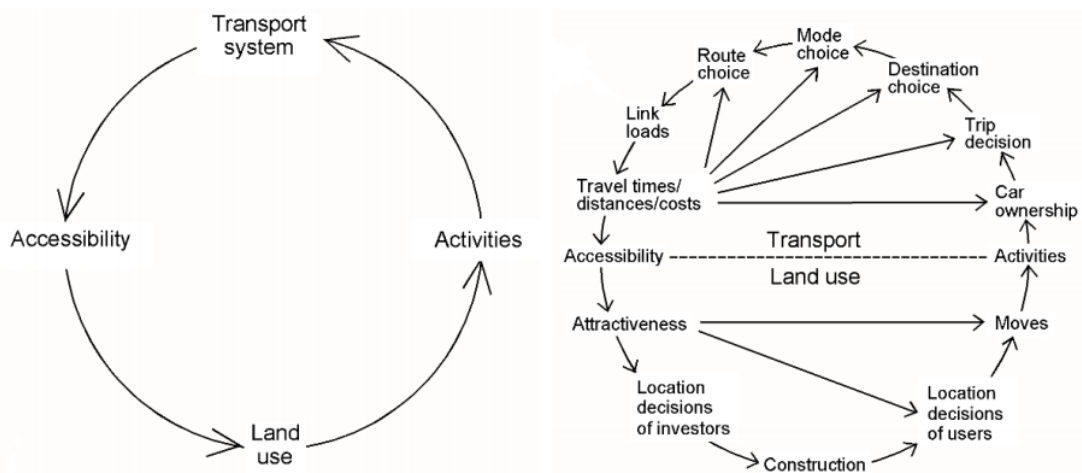
| Tiltak   | Prinsipielle fordeler  |
|--|--|
| Kapasitetsøkning for å løse opp flaskehals i veinettet | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Dynamisk trafikkavvikling</li> <li>* Eksplisitt modellering av kø og tilbakevirkning av flaskehals</li> <li>* Mikroskopisk og stokastisk rutevalg</li> </ul>  |
| Tidsdifferensierte bompenger                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Endring av avreisetidspunkt (i tillegg til endringer i transportmiddelvalg og rutevalg)</li> <li>* Gode muligheter til å fange opp timeregler mm</li> </ul>   |
| Sykkeltiltak   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Ingen utfordring med soneinterne reiser</li> <li>* Detaljert rutevalg</li> </ul>  |
| Parkering  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Mulighet for å knytte tilgjengelighet og priser til enkeltpersoner (agenter) basert på egenskaper ved personen, aktivitetsstedet (hjemmeparkering, jobbparkering), klokkeslett og biltype</li> <li>* Utnyttelse av el-bil lading ved parkeringsplasser</li> </ul> |
| Mobile tjenesteytere                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Individuelle leveringskjeder</li> <li>* Simulering av planlagt versus faktisk leveringstidspunkt</li> </ul>   |
| Endring i rutetilbud<br>Kollektivtransport             | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Dynamisk representasjon av kollektivtilbudet</li> <li>* Simulering av belegg og trengsel</li> <li>* Korrespondanse mellom kjøretøyene</li> <li>* Ingen påstigning på fulle busser</li> <li>* Simulering av ventetid på holdeplass</li> </ul>                      |
| Bildeling  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Identifikasjon av agenter som skal i samme retning på samme tidspunkt</li> <li>* Tilbud av ledige delte biler basert på dynamisk samspill mellom etterspørsel og tilbud</li> </ul>  |

Det kan videre nevnes at MATSim har blitt brukt til andre analyseformål enn konkrete transporttiltak. Det inkluderer evakueringsscenarier i Indonesia (Jha mfl 2014) og simulering av koronasmitte i Berlin (Müller mfl 2020). I begge tilfellene er det dynamiske, mikroskopiske rammeverket i MATSim en grunnforutsetning for realistisk modellering. MATSim brukes mest i byområder, men kan også brukes for lange reiser og lang varetransport. For eksempel har Bischoff mfl (2019) implementert en MATSim-modell for både person- og godstransport i hele Sverige.

## 4.4 LUTI-modeller

Siden transportmodellene gir detaljerte prediksjoner for trafikale endringer som følge av ulike tiltak, både når det gjelder arbeidsreiser og fritidsreiser, er de en naturlig del av informasjonsgrunnlaget i analyser om hvordan transporttiltak påvirker andre markeder som er tilstøtende til transportmarkedet. PINGO (Hansen og Johansen 2016) er et eksempel på en generell likevektsmodell som bruker resultater fra transportmodell-kjøring som input for å analysere ringvirkninger av infrastrukturinvesteringer, og hvordan de påvirker nærings-sammensetningen i ulike soner, selv om selve arealbruken ikke er eksplisitt modellert.

I transportmodellene ligger imidlertid arealbruken fast. Selv om bosteds- og arbeidsplass-lokaliseringer påvirker transportsystemet, vil ikke modellene si noe om hvordan endringer i trafikk eller infrastruktur påvirker arealbruken. Den gjensidige påvirkningen mellom transport og arealbruk er illustrert i figur 4.10.



Figur 4.10. Feedback mellom transport og arealbruk – enkel og kompleks framstilling (Wegener og Fiirst 2004).

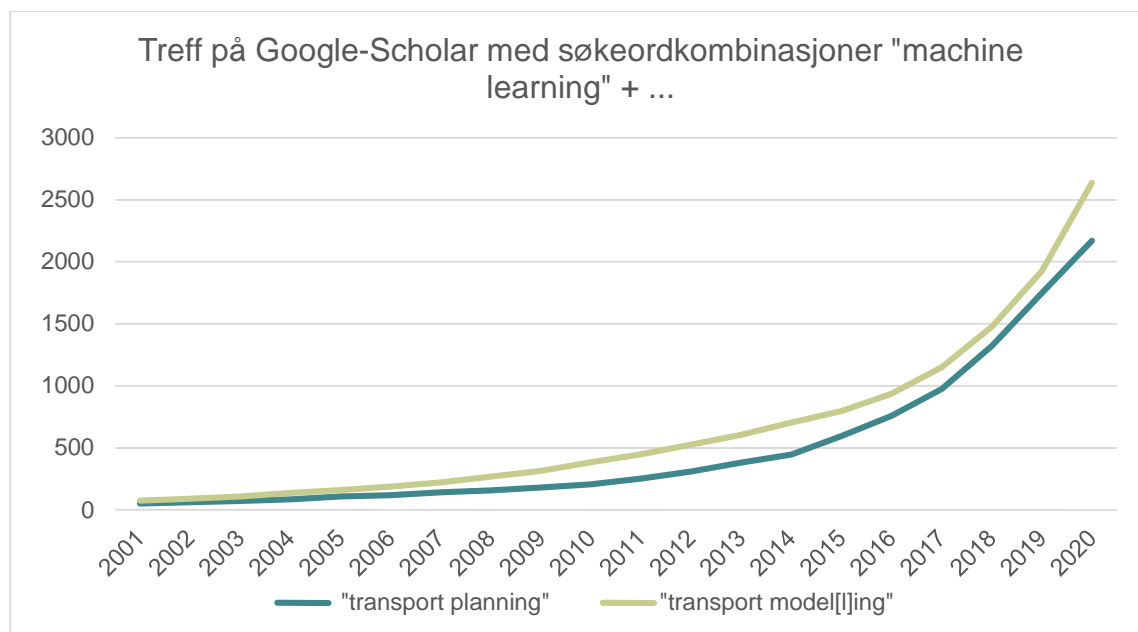
Modeller som predikerer endringer i transport og arealbruk simultant kalles LUTI-modeller (Land Use and Transport Integrated models). TØI har tidligere gitt en vurdering av ulike metoder og modeller for å analysere samspillseffektene mellom transport og arealbruk (Johansen mfl 2015), som også diskuterer muligheten for å integrere en arealbruksmodul i de nåværende transportmodellene. I praksis er dette noe som ville mangedoblet beregningstiden; transportmodellene og arealbruksmodulen må løses iterativt til de når en likevekt hvor alle markedene er klarert.

For mer informasjon om hvordan arealbruksendringer kan integreres i en transportmodell, henvises det til den tidligere nevnte TØI-rapporten. Her sammenlignes fem ulike alternativer for å se transport og arealbruk i sammenheng. Noen av alternativene bygger direkte på de nåværende transportmodellene, mens andre alternativer tar utgangspunkt i agentbaserte modellrammeverk som MATSim.

## 4.5 Maskinlæring

Maskinlæring (ML) har blitt en veldig populær og nyttig metode i alle vitenskapelige fagfelt der man har tilgang til store datakilder og der man må predikere kompliserte (ikke-lineære) sammenhenger eller effekter. Også innenfor transportplanleggingsfaget er ML mer og mer i bruk. Som vi ser fra figur 4.11, er det over 2000 treff på søkeordet "machine learning" +

"transport planning" og over 2500 treff på søkeordet "machine learning" + "transport modelling"<sup>11</sup> på Google Scholar som rapportere vitenskapelige publiseringer.



Figur 4.11: Akkumulerte treff på Google Scholar i tidsrom 2011-2020.

TØI skal i samarbeid med institutt for informatikk ved Universitet i Bergen, VTI (Statens väg- og transportforskningsinstitut), AI-bedrift Epigram and Statens Veivesen jobbe mot en ML-basert verktøy som kan predikere langsiktig trafikkflyt i Oslo-område. I prosjektet vil man generere store mengder av treningsdata ved hjelp av detaljerte trafikksimuleringer i MATSim der man systematisk varierer befolkningsvekst og veikapasitet. For å relatere simuleringen til den empiriske virkeligheten vil man i et iterativt prosess kalibrerer underliggende parameter i MATSim basert på ekte data (trafikktegninger og fartsmålinger) og for ulike framtidsscenarioer - ML-prediksjoner.

Prosjektet heter «Machine learning for computational efficient predictions of long-term congestion patterns in large-scale transport systems (PRELONG)» og er finansiert av Norges Forskningsråd.

En generell utfordring med ML, og da spesielt med dype nevrale nettverket (DNN), er at forskerne typisk ikke forstår mekanismer og årsaks-virkingsammenhenger innad modellene. For å angripe denne problemstillingen i PRELONG, vil man bruke en nyere type DNN, såkalte binærisede DNN som kan analyseres og tolkes ved hjelp av en nøyaktig koding i proposisjonslogikk (Narodytska et al., 2018). Utforskning av denne problemstillingen vil være gjenstand av en integrert PhD-prosjekt ved Universitet i Bergen.

<sup>11</sup> Enten med «modell[ing]» eller «modeling»

## 5 Fremtiden og nye tiltak

### 5.1 Nye transportformer, rammebetingelser og tiltak

Teknologiske og sosiale trender (se avsnitt 2.7) vil medføre nye transportformer og nye politiske tiltak. Det er delvis vanskelig å forutse når disse tiltak blir aktuelle. Men flere tiltak er tilnærmet uunngåelige med tanke på klimamålene som skal nås og/eller teknologisk framgang. Ved siden av langsiktige trender, kan det også oppstå mer kortsiktige fenomen, som Covid-19, som medfører helt nye rammebetingelser. Selv om slike «sjokk» i transportsektoren ikke er hovedtema for (strategiske) transportmodeller, er det sannsynlig at etterspørselen etter å bruke transportmodeller under helt nye rammebetingelser vil øke i fremtiden.

Tabell 5.1: Forventete utfordringer ved modellering av nye transportformer, rammebetingelser og tiltak i RTM.

| <b>Nye transportformer, rammebetingelser og tiltak</b>        | <b>Sannsynlige effekter på transportmarkedet</b>  | <b>Utfordring for transportmodellering i strategiske transportmodeller (RTM)</b>  |
|---|---|---|
| Mer differensierte timesregler for bompenger                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Mindre etterspørselseffekter</li> <li>* Endrede bompengeneinntekter</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Identifikasjon av hvem som er berørt av timesregelen</li> <li>* Mobile tjenesteytere</li> </ul>                              |
| Dynamisk kjøprising   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Etterspørselsvirkninger</li> <li>* Endring i avreisetidspunkt</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Ingen/begrenset overføring mellom tidsperioder</li> </ul>  |
| Restriksjoner for bruk av biler med forbrenningsmotor         | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Effekter på bilhold og el-bilandel</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Ingen heterogenitet av biler ved nettutlegging</li> <li>* Valg av drivstofftype ikke del av etterspørselsmodellen</li> </ul> |
| Sykkeltiltak (Sykkel-ekspressveier mm)                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Overført trafikk (og helsegevinster)</li> <li>* Endring i rutevalg</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Problem med soneinterne reiser i regioner med grov soneinndeling</li> </ul>  |
| Delte autonome biler (robotaxi)                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Bilhold</li> <li>* Utforming av parkeringsplasser</li> <li>* Trafikkflyt mm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Se avsnitt 5.2.2</li> </ul>  |
| Øvrig «mobility-as-a-service» / bildeling                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Redusert bilhold, men økt tilgang til bil</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Forbedringer i bilholdsmodell nødvendig mm</li> </ul>  |
| Økt underholdningstilbud mens man reiser (5G, VR-briller ...) | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Lavere tidsverdi</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Vanskelig å forutsi effekter</li> <li>* Individuelle forskjeller/preferanser</li> </ul>                                      |
| Rammebetingelser for hjemmekontor                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Mindre reiser, spesielt i rush-tiden</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Ingen segmentering i personer som kan jobbe hjemmefra og personer som må reise til jobb</li> </ul>                           |
| Trengsel og kollektivbruk under pandemier                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Adferdsendringer og etterspørselseffekter</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Ingen modellering av trengsel i kollektivtransporten</li> </ul>  |



Delte autonome biler (robotaxi) har egenskaper som gjør dem til en ny form for transportmiddel. Avhengig av markeds-/forretningsmodell vil de kunne anses som en del av kollektivsystemet. Dagens Uber-modell kommer kanskje nærmest dette i dag. Men utbredelsen av robotaxier blir trolig mye større enn dagens «mobility-as-a-service»-former; dette fordi lave kostnader (sparte sjåførkostnader) mest sannsynlig vil føre til mye høyere etterspørsel. På lang sikt vil effekten av lavere bilhold på grunn av autonome delte biler føre til økt etterspørsel etter robotaxier. Dette er noe vi går nærmere inn på i neste avsnitt.

## 5.2 Robotaxier (delte autonome biler)

Robotaxier inngår i flere trender (autonomi, delingsøkonomi, konnektivet) og kan være et interessant case å se litt nærmere på.

Det finnes per i dag (januar 2021) kun én by (Phoenix i USA) som tilbyr kommersielle robotaxier som er åpen for offentligheten. Varianten i Phoenix kommer fra den Google-eide bedriften Waymo og er et nivå-4-system der robotaxier kjører førerløst<sup>12</sup> og fritt (uten faste ruter), men er geografisk begrenset til bruk i Phoenix. Samtidig jobber Tesla mot et nivå-5 system for robotaxier som ikke vil være begrenset til enkelte byer. Det er usikkert når Waymo utvider sitt tilbud til andre byer eller når Tesla lykkes med sitt nivå-5 system. De fleste eksperter virker enige i at robotaxier blir en realitet for folk flest i fremtiden (Merfelt mfl 2019).

### 5.2.1 Effekter av autonome biler og modellbehov

Foruten økt trafiksikkerhet, forventes det at autonome biler har følgende direkte effekter på transportmarkedet:

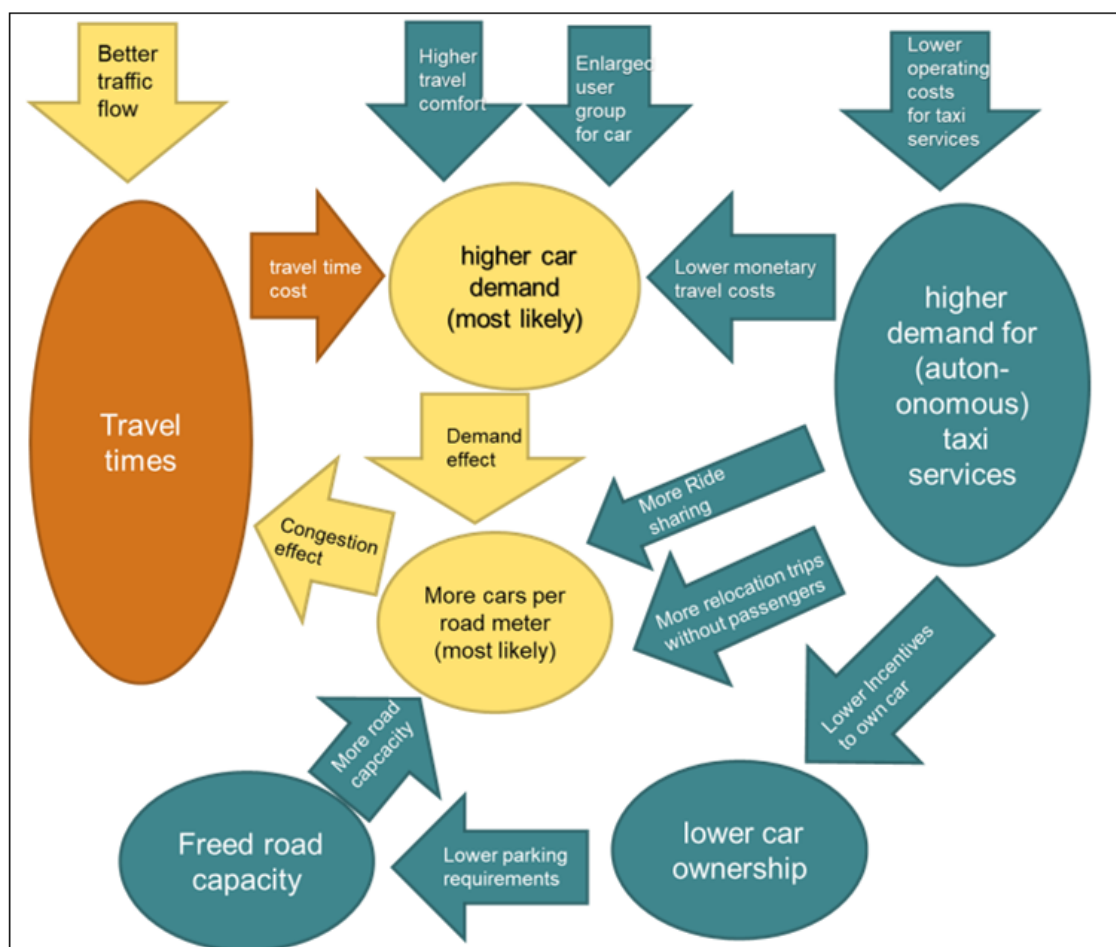
- høyere reisekomfort for bilbrukere
- reduserte driftskostnader for drosjetjenester/mobility-as-a-service-løsninger
- utvider den potensielle brukergruppen for bil
- forbedrer trafikkflyten (andre ting likt).

Høyere reisekomfort vil resultere i lavere tidsverdier (VTI). Dette er senest vist i Flügel mfl. (2019) som, basert på stated-preference-data, estimerer at VTI i helautomatiske biler vil være rundt 20%-30% lavere enn i konvensjonelle biler. Anslag for driftskostnader varierer etter forutsetninger, men forventes å være betydelig under kostnadene for sjåførdrevne taxier. Både høyere reisekomfort og lavere driftskostnader innebærer en økning i etterspørselen etter bil/taxi. En ekstra etterspørselseffekt forventes når autonome biler kan brukes av ungdom og funksjonshemmede (og personer uten førerkort generelt). Dette kan føre til en utvidelse av brukergruppene for biler og/eller øke brukerfrekvensen på grunn av forbedret personlig mobilitet.

De viktigste mekanismene for disse effektene i hele transportmarkedet er illustrert i figur 5.1.

---

<sup>12</sup> Bilen blir sentralt overvåket av mennesker og kan fjernstyres hvis det er behov for det.



Figur 5.1: Sammenheng mellom direkte og indirekte effekter av robotaxier.

Et sentralt spørsmål er om økt biletterspørsel vil føre til mer kø på veiene, eller om forbedret trafikkflyt vil oppveie denne effekten og faktisk føre til mindre kø og kortere reisetider. Dette er et uavklart spørsmål og medfører en stor usikkerhet ved transport- og infrastrukturplanlegging.

### 5.2.2 Forventet mulighet i RTM til å fange opp effektene

Det settes høye krav til modellering av autonome biler, spesielt når disse brukes som «mobility-as-a-service». I så fall vil ventetiden til en robotaxi avhenge av etterspørsel (hvor mange andre personer som bestiller en robotaxi samtidig) og tilbud (om det er ledige robotaxier i nærheten) på det tidspunkt det bestilles. Det kreves trolig en finkornet tids- og geografisk representasjon av etterspørsel og tilbud for å oppnå et høyt presisjonsnivå.

Det kan forventes at RTM kan fange opp noen av effektene av autonome biler/robotaxier nevnt i forrige avsnitt:

- Lavere tidsverdi
- Økt biltilgang
- Lavere kjørekostnader
- Bedre trafikkflyt (hvis enkelt modellert ved justering av VDF-funksjoner)

Andre effekter vil være vanskelige eller umulige å fange opp:

- Dynamikken mellom etterspørsel og tilbud som resulterer i
  - Ventetid for autonome taxier
  - Omfang av tomkjøring
- Potensial og omfang av ride-sharing
- Frigjøring av parkeringsareal
- Detaljerte effekter på trafikkflyten
  - Løsning av flaskehals
  - Effekten av at konvensjonelle biler og autonome biler deler veien
- Korrespondanse mellom autonome biler og tog/t-bane

### 5.2.3 Modellbruk i andre land

Svenske Anne Pernestål og Ida Kristoffersson har gjort en stor litteraturstudie om effekten av autonome biler som predikert av transportmodeller/simuleringsmodeller (Pernestål og Kristoffer 2019).

26 studier er gjennomgått og sammenstilt i tabellen under. Tabell 5.2: Sammenstilling av transportmodeller som predikerer effekten av autonome biler etter type transportmodell/avviklingsmodell og analyseområde.

Tabell 5.3: Sammenstilling av transportmodeller som predikerer effekten av autonome biler etter type transportmodell/avviklingsmodell og analyseområde.

|               | Antall                        | Land/By                        | Referanse                                 |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| Makroskopiske | 1.                            | Manhattan                      | R. Zhang et. al (2015)                    |
|               | 2.                            | Switzerland                    | Meyer et. al (2017)                       |
| Mesoskopisk   | 1.                            | Munich                         | Dandl and Bogenberger (2018)              |
|               | 2.                            | Southeast Queensland           | Davidson and Spinoulas (2016)             |
| Mikroskopisk  | 1.                            | Nederland                      | Winter et. al (2016)                      |
|               | 2.                            | (Syntetisk)                    | Fagnant and Kockelman (2014)              |
|               | 3.                            | Stockholm                      | Burghout et. al (2015)                    |
|               | 4.                            | Munich                         | Dandl et. al (2017)                       |
| Agent-basert  | 5.                            | Orlando                        | Gurumurthy and Kockelman (2018)           |
|               | 1.                            | Melbourne                      | Dia and Javanshour (2017)                 |
|               | 2.                            | Singapore                      | Azevedo et. al (2016)                     |
|               | 3.                            | Singapore                      | Marczuk et. al (2016)                     |
|               | 4.                            | (Syntetisk)                    | W. Zhang et. al (2015)                    |
|               | 5.                            | (Syntetisk)                    | Hörl (2017)                               |
|               | 6.                            | Ann Arbor                      | Merlin (2017)                             |
|               | 7.                            | Ann Arbor                      | Lu et al. (2018)                          |
|               | 8.                            | Berlin                         | Bischoff and Maciejewski (2016a)          |
|               | 9.                            | Berlin                         | Fournier et al. (2017)                    |
|               | 10.                           | Lisboa                         | OECD International Transport Forum (2015) |
|               | 11.                           | New York City                  | Shen and Lopes (2015)                     |
|               | 12.                           | Chicago                        | Hyland and Mahmassani (2018)              |
| 13.           | Austin                        | Loeb et al. (2018)             |   |
| 14.           | (Syntetisk)                   | Chen and Kockelman (2016)      |   |
| 15.           | (Syntetisk)                   | Chen et. al (2016)             |   |
| 16.           | New Jersey                    | Brownell and Kornhauser (2014) |   |
| 17.           | Puget Sound region Washington | Childress et. al (2015)        |   |

Vi ser at av 26 studier er 17 gjennomført med agent-baserte modeller og kun 2 med makroskopiske modeller.

#### **5.2.4 Analysemuligheter i Norge**

I et konsulentprosjekt på oppdrag fra RUTER AS ble det for et par år siden etablert en modell for autonome biler som mobility-as-a-service i Oslo, basert på simuleringsmodellen Visum. Den anvendte tilnærmingen hadde flere begrensninger:

- man brukte faste etterspørselsmatriser
- man vurderte ikke forbedringer i trafikkflyten gitt autonome biler
- man antok eksogene ventetider

Disse begrensningene kan håndteres i MATSim med en «extension» for autonome biler utviklet av Bischoff og Maciejewski (2016a). Denne er tilgjengelig som åpen-kildekode. I en av de første studiene av sitt slag har denne «extension» blitt brukt til å studere etterspørsel og trafikkflyteeffekter av autonome taxier for hele byen Berlin (Bischoff og Maciejewski 2016b). Studien finner at det at autonome biler kan kjøre tettere på hverandre (øker effektiv vegkapasitet) kan føre til en reduksjon i køer til tross for en betydelig økning i antall biler på veinettet.

## 6 anbefaling

En satsing på transportmodeller for fremtiden bør ikke være bestemt av historiske forhold, men ta utgangspunkt i dagens og fremtidig behov for transportanalyse.

Denne rapporten har prøvd å beskrive fremtidens utfordringer for transportmodellering med spesielt fokus på reiser i byområder. Trafikken i byområder er dynamisk og ønsket om å kunne modellere transport med dynamiske modeller kommer trolig til å øke ut fra teknologiske (for eksempel automatisering) og sosiale trender (etterspørsel etter mer individuell og tilpasset transport).

Tiltaksanalyser i byer kan også kreve et mer finkornet modellsystem (f.eks. gang- og sykkeltiltak). Agentbaserte simuleringsmodeller som ikke trenger et sonesystem og som modellerer adferd på enkeltperson(agent)-nivå virker attraktivt for detaljerte analyseformål.

Behovet for mikroskopiske etterspørselsmodeller er noe lavere for «vanlige» nyttekostnadsanalyser som bruker enhetspriser for forbedringer i transport (f.eks. bruker samme tidsverdi for reisetidsbesparelser i et gitt transportmiddel). En makroskopisk modelltilnærming synes tilstrekkelig for dette formålet, så lenge den kan gi nøyaktige aggregerte estimater (f. eks. nettotidsbesparelse). Siden de fleste makroskopiske modeller er statiske, kan imidlertid beregningen av reisetider i købelastede områder være grov og unøyaktig.

Vi anbefaler at det gjøres en (langsiktig) satsning på dynamiske modeller med en meso- eller mikroskopisk tilnærming for trafikkavvikling. Det er naturligvis avgjørende å ha fagfolk med tilstrekkelig kunnskap tilgjengelig. Dette stiller visse krav til utdanning og videreutdanning av forskerne og konsulter i transportsektor.

Spørsmålet om mikroskopisk versus mesoskopisk handler om hvilke krav som stilles til detaljeringsnivå i nettverket/trafikkflyt og hvilke beregningstider man er villig til å akseptere. For de fleste strategiske planleggingsformål virker mesoskopiske trafikkmodeller (som i MATSim) å gi tilstrekkelig detaljert informasjon, og disse er i tillegg i stand til å gi akseptable beregningstider selv for svært store scenarier (opp til 10 millioner biler).

Det kan være ulike mål forbundet med modellutvikling. Flere mål kan ha et mer kortsiktig perspektiv og dreie seg om konkrete ting som skal forbedres i forbindelse med utredninger eller til neste NTP. Andre mål har en mer langsiktig karakter. Et mål kan for eksempel være å lage en modell som kan analysere autonome biler/robotaxier på en god måte. Eller mer generelt at man bygger et modellsystem som bruker state-of-the-art metoder.

Ut fra ulike kortsiktige og langsiktige mål kan det anbefales ulike løp for modellutviklingen. Disse krever ulik organisering og finansiering og involverer til dels ulike forskergrupper.

For å lykkes med «state-of-the-art» metoder som operasjonell modell må det utdannes/videreutdannes folk som har forutsetninger til å jobbe med disse modeller. Dette setter krav til blant annet universitetssektoren.

Tabell 6.1 oppsummerer noen tanker rundt dette.

Tabell 6.1::Anbefalte løp for modellutvikling.

|  | Kortsiktig løp (RTM)   | Mellomlangt løp (RTM)  | Mellomlangt løp (andre modeller)   | Langt løp  |
|--|--|--|--|--|
| Tids-perspektiv  | < 4 år (til neste NTP)   | 4-10 år  | 4-10 år  | > 10 år  |
| Generelt mål   | Konkrete forbedringer i dagens modellsystem med tanke på neste NTP   | Etablere ny og re-estimert versjon av modellsystemet   | Demonstrere egnethet og gjennomførbarhet av «state-of-the-art» modeller  | Etablering av et fullverdig modellsystem basert på «state-of-the-art» metoder  |
| Eksempler på mulige konkrete mål                             | 1. Øke konsistens mellom transportmodeller og nytteberegning<br>2 Forbedre kvalitet/omfang av kalibrering og inndata | 1. El-biler som eget transportmiddel<br>2. Integring av skolemodell i hovedmodell<br>3. Fange opp mikromobilitet | 1. Etablere agentbaserte modeller for de største 10 byområder<br>2. Nettverks-simulering av biler, kollektiv og sykkel | 1. Etablere agentbaserte modellsystemer som dekker alle reiser og gods-transport i Norge<br>2. Kobling mot mikroskopiske LUTI-modeller og /eller ABDM* |
| Sentrale stakeholders/ finansieringskilder                   | NTP-analysegruppe, SVV (modell- og nyttekostnadsgruppe)  | Ny rammeavtale for utvikling av neste versjon av RTM   | Forskningsråd, ulike nasjonale og regionale aktører (inkl. RUTER og PROSAM)  | Forskningsråd, Transportetater   |
| Sentrale aktører   | Konsulenter  | Transportforskere med god innsikt i RTM-systemet   | Transportforskere med relevant erfaring i dynamiske modeller, enkelte PhD-prosjekter                                   | Universitetssektor**, transportforskere  |
| Viktige elementer som kan bidra til vellykket implementering | Etablert kompetanse i Norge  | Samordning av prosjekter i felles prosjekt/rammeavtale   | Samarbeid med internasjonale eksperter   | Økt regnekraft, tilgang til (big) data og kunstig intelligens  |
| Foreslått bidrag fra et mulig etatsprogram i SVV 2021-2024   | Finansering av enkelte prosjekter  | Forprosjekter  | Forprosjekter som bidrar til prosjekter som fremmer nye metoder  | Bidrag via mellomlangt løp   |

\* activity based demand models

\*\*for utdanning av personer som kan utvikle, bruke og vedlikeholde state-of-the-art modellsystemet

## 7 Referanser

- Alessandrini, A., Campagna, A., Delle Site, P., Filippi, F., Persia, L., 2015. Automated vehicles and the rethinking of mobility and cities. *Transp. Res. Procedia* 5, 145–160.
- Alessandrini, A., Cattivera, A., Holguin, C., Stam, D., 2014. CityMobil2: Challenges and Opportunities of Fully Automated Mobility, in: *Road Vehicle Automation, Lecture Notes in Mobility*.
- Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., Rus, D., 2017. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 462. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611675114>
- Azevedo, C.L., Marczuk, K., Raveau, S., Soh, H., Adnan, M., Basak, K., Loganathan, H., Deshmunkh, N., Lee, D.-H., Frazzoli, E., Ben-Akiva, M., 2016. Microsimulation of demand and supply of autonomous mobility on demand. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2564, 21–30.
- Barceló, J. 2010. *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer.
- Barth, M., Boriboonsomsin, K., Wu, G., 2014. Vehicle Automation and Its Potential Impacts on Energy and Emissions, in: Meyer, G., Beiker, S. (Eds.), *Road Vehicle Automation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 103–112. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7_10)
- Bischoff, J., Maciejewski, M., 2016a. Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. *Procedia Comput. Sci.* 83, 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.121>
- Bischoff, J., Maciejewski, M., 2016b. Autonomous Taxicabs in Berlin – A Spatiotemporal Analysis of Service Performance. *Transp. Res. Procedia* 19, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.078>
- Bischoff, J., Francisco, J.M., Domingues-olavarr, G., Maciejewski, M., Nagel, K., 2019. Impacts of vehiclefleet electrification in Sweden—a simulation-based assessment of long-distance trips. <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2019/19-07/BischoffEtAl2019ElectricSweden.pdf>
- Bockemühl F. (2016): MORBAMS: Setting up a regional MatSim model. Master-Thesis School for Transportation Sciences at Hasselt University
- Bonabeau, E., 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99, 7280–7287.
- Bösch, P.M., Becker, F., Becker, H., Axhausen, K.W., 2018. Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transp. Policy* 64, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.005>
- Brown, A., Gonder, J., Repac, B., 2014. An Analysis of Possible Energy Impacts of Automated Vehicle, in: Meyer, G., Beiker, S. (Eds.), *Road Vehicle Automation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 137–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7_13)
- Brownell, C., Kornhauser, A.L., 2014. A Driverless Alternative: Fleet Size and Cost Requirements for a Statewide Autonomous Taxi Network in New Jersey. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2416, 73–81.
- Burghout, W., Rigole, P.J., Andreasson, I., 2015. Impacts of shared autonomous taxis in a metropolitan area, in: *Proceedings of the 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- Chen, T.D., Kockelman, K.M., 2016. Management of a Shared Autonomous Electric Vehicle Fleet: Implications of Pricing Schemes. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 37–46.
- Chen, T.D., Kockelman, K.M., Hanna, J.P., 2016. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transp. Res. Part Policy Pract.* 94, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.020>
- Childress, S., Nichols, B., Charlton, B., Coe, S., 2015. Using an Activity-Based Model to Explore the Potential Impacts of Automated Vehicles. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2493, 99–106. <https://doi.org/10.3141/2493-11>
- Chiu, Y.-C., J. Bottom, M. Mahut, A. Paz, R. Balakrishna, T. Waller & J. Hicks (2011) Dynamic traffic assignment: A primer. *Transportation Research E-Circular*.
- Dandl, F., Bogenberger, K., 2018. Comparing Future Autonomous Electric Taxis With an Existing Free-Floating Carsharing System. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 1–11. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2857208>

- Dandl, F., Bracher, B., Bogenberger, K., 2017. Microsimulation of an autonomous taxi-system in Munich, in: Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2017 5th IEEE International Conference On. IEEE, pp. 833–838.
- Davidson, P., Spinoulas, A., 2016. Driving Alone Versus Riding Together—How Shared Autonomous Vehicles Can Change the Way We Drive. *Road Transp. Res. J. Aust. N. Z. Res. Pract.* 25, 51.
- Dia, H., Javanshour, F., 2017. Autonomous Shared Mobility-On-Demand: Melbourne Pilot Simulation Study. *Transp. Res. Procedia* 22, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.035>
- Duncan, G., 2010. From microsimulation to nanosimulation: visualizing person trips over multiple modes of transport. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 130–137.
- Fagnant, D.J., Kockelman, K.M., 2014. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 40, 1–13.
- Flügel S. og Madslie A. (2017) Beregning av samfunnsøkonomisk nytte av planlagte sykkelepressveger med verktøyet EkspressEffekt. TØI rapport 1561/2017
- Flügel, S., Flötteröd, G., Kong C.K., & C. Stensland (2014) Evaluation of methods for calculating traffic assignment and travel times in congested urban areas with strategic transport models. TØI-report 1358/2014
- Flügel S., Ævarsson G., (2018) MATSim case study: Sykkelepressvegen Lillestrøm Bryn, presentasjon for PROSAM, Mars 2018
- 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 in Tromsø
- Flügel S., Halse A.H., Hulleberg N., Jordbakke G.N., Veisten K., Sundfør H.B., & Kouwenhoven M. (2020). *Verdsetting av reisetid og tidsavhengige faktorer. Dokumentasjonsrapport til Verdssettingsstudien 2018-2019.* TØI-rapport 1762/2020
- Flügel S., Kern J., Bockemühl F. (2016). “Trondheim”. In: *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ed. by A. Horni, K. W. Axhausen, and K. Nagel. Ubiquity, London. Chap. 49. doi: 10.5334/baw. url: <http://matsim.org/the-book>.
- Flügel S., Ukkonen A. (2020) Videreutvikling av Trenklin (versjon 3.2): Tilpasning av trengselsfunksjoner og valg av antall togsett per avgang. TØI-Arbeidsdokument 51614
- Flötteröd, G., Y. Chen & K. Nagel (2012) Behavioral calibration and analysis of a large-scale travel microsimulation. *Networks and Spatial Economics*, 12, 481–502.
- Flötteröd G., Flügel S., (2015) “Traffic assignment for strategic urban transport model system” ITEA-conference 2015, Oslo
- Fiedler, D., Cáp, M., Certický, M., 2017. Impact of Mobility-on-Demand on Traffic Congestion: Simulation-based Study. *CoRR* abs/1708.02484.
- Fournier, G., Pfeiffer, C., Baumann, M., Wörner, R., 2017. Individual Mobility by Shared Autonomous Electric Vehicle Fleets. Cost and CO2 comparison with internal combustion engine vehicles in Berlin, Germany. Presented at the 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Funchal, Portugal.
- Fridstrøm, L. (2019) Framskrivning av kjøretøyparken i samsvar med nasjonalbudsjettet 2019, TØI rapport 1689/2019
- Fridstrøm L., Hovi I.B., Kristensen N.B., Madslie A., Bruvoll A., Gulbrandsen M.U., Seeberg A., Aalen P. (2020) Transportmodeller for klimaanalyse TØI-rapport 1769/2020
- Fridstrøm L., Østli V. (2018) Eterspørselen etter nye personbiler analysert ved hjelp av modellen BIG TØI-rapport 1665/2018
- Gawron, J.H., Keoleian, G.A., De Kleine, R.D., Wallington, T.J., Kim, H.C., 2018. Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects. *Environ. Sci. Technol.* 52, 3249–3256.
- Greenblatt, J.B., Saxena, S., 2015. Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. *Nat. Clim. Change* 2015, 860–863.
- Grue, B (2017): *Mobile tjenesteytere i RVU 2013/14 – beregninger på andel av trafikkarbeidet.* TØI arbeidsdokument 51139.
- Gurumurthy, K.M., Kockelman, K.M., 2018. Analyzing the dynamic ride-sharing potential for shared autonomous vehicle fleets using cellphone data from Orlando, Florida. *Comput. Environ. Urban Syst.* 71, 177–185.



- Hansen, W. og Johansen, B.G. (2016). *Beregning av netto ringvirkninger på utvalgte prosjekter, NTP 2018-2029*. TØI-rapport 1471/2016.
- Hazan J., Lang N., Ulrich P., Chua J, Doubara X., Steffens T. (2016) Will autonomous Vehicles Derail Trains?, Boston Consultant Group
- Hoogendoorn, S.P., Bovy, P.H., 2001. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Syst. Control Eng. 215, 283–303.
- Horni, A. 2013. Destination choice modeling of discretionary activities in transport microsimulation. In ETH Zurich. Zurich.
- Horni, A., K. Nagel and K. W. Axhausen (2016a). The multi-agent transport simulation MATSim. <http://dx.doi.org/10.5334/baw>.
- Horni, A, Nagel, K and Axhausen, K W. (2016b). Destination Innovation. In: Horni, A, Nagel, K and Axhausen, K W. (eds.) *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Pp.165–174. London: Ubiquity Press. DOI:<http://dx.doi.org/10.5334/baw.27>. License:CC-BY4.0
- Hörl, S., 2017. Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses. *Procedia Comput. Sci.* 109, 899–904. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.418>
- Hyland, M., Mahmassani, H.S., 2018. Dynamic autonomous vehicle fleet operations: Optimization-based strategies to assign AVs to immediate travel demand requests. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 278–297.
- Jalali, S., Wohlin, C., 2012. Systematic literature studies: database searches vs. backward snowballing, in: *Proceedings of the ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*. ACM, pp. 29–38.
- Jara-Díaz, S. R. 2007. *Transport Economic Theory*. Emerald Group Publishing Limited.
- Jha, M., Moore, K., and Pashaie, B. (2004) : Emergency evacuation planning with microscopic traffic simulation, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, Paper 04-2414, 2004
- Johansen, B.G., Hansen, W. og Tennøy, A. (2015). *Vurdering av metoder og modeller for å analysere samspillseffekter mellom arealutvikling, transportetterspørsel og infrastruktur i byområder*. TØI-rapport 1415/2015.
- P. Jones (2012) The role of an evolving paradigm in shaping international transport research and policy agendas over the last 50 years in in R. Pendyala, C. Bhat (Eds.), *Travel Behaviour Research in an Evolving World*, *Proceedings of the 12th International Association for Travel Behaviour Research Conference* (2012), pp. 3-34
- Kickhöfer, B. (2014). “Economic Policy Appraisal and Heterogeneous Users”. PhD thesis. Berlin: TU Berlin. doi: 10.14279/depositonce-4089.
- Kickhöfer, B., D. Grether & K. Nagel (2011) Income-contingent user preferences in policy evaluation: application and discussion based on multi-agent transport simulations. *Transportation*, 38, 849-870.
- Krueger, R., Rashidi, T.H., Rose, J.M., 2016. Preferences for shared autonomous vehicles. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 69, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.06.015>
- Lemp, J. D., L. B. McWethy & K. K.M. 2007. From aggregate methods to microsimulation: assessing the benefits of microscopic activity-based models of travel demand.
- Litman, T., 2015. Autonomous Vehicle Implementation Predictions, in: *Proceedings of the 2015 Transportation Research Board Annual Meeting*, 15-3326.
- Loeb, B., Kockelman, K.M., Liu, J., 2018. Shared autonomous electric vehicle (SAEV) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 89, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.019>
- Lu, M., Taiebat, M., Xu, M., Hsu, S.-C., 2018. Multiagent Spatial Simulation of Autonomous Taxis for Urban Commute: Travel Economics and Environmental Impacts. *J. Urban Plan. Dev.* 144, 04018033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000469](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000469)
- MacKenzie, D., Wadud, Z., Leiby, P., 2014. A first order estimate of energy impacts of automated vehicles in the united states, in: *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. Washington.
- Madslie, A, Rekdal, J og Larsen O.I. (2005): *Utvikling av regionale modeller for persontransport i Norge*. TØI rapport 766/2005. TØI og Møreforskning Molde AS.
- Malmin O.K, Arnesen, P, Babri, S, Hjelkrem, O.A og Thorenfeldt U.K. 2020: *CUBE – Teknisk dokumentasjon av Regional persontransportmodell. Versjon 4.2.2*. Sintef Community 11. november 2020.
- Marczuk, K., Soh, H., Azevedo, C.M.L., Lee, D.-H., Frazzoli, E., 2016. Simulation Framework for Rebalancing of Autonomous Mobility on Demand Systems. *MATEC Web Conf* 81, 01005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168101005>

- May, A.D., 1990. Traffic flow fundamentals.
- Meister, K., M. Balmer, C. F., H. A., R. M., W. R.A. & A. K.W. (2010). Large-scale agent-based travel demand optimization applied to Switzerland, including mode choice. In 2th World Conference on Transportation Research. Lisbon.
- Merfeld K., Wilhelms M.P., Henkel S., Kreutzer K. (2019) Carsharing with shared autonomous vehicles: Uncovering drivers, barriers and future developments – A four-stage Delphi study, Technological Forecasting and Social Change, Volume 144, 2019, Pages 66-81, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.03.012>.
- Merlin, L.A., 2017. Comparing Automated Shared Taxis and Conventional Bus Transit for a Small City. J. Public Transp. 20, 2.
- Meyer, J., Becker, H., Bösch, P.M., Axhausen, K.W., 2017. Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? Res. Transp. Econ.
- Milakis, D., Snelder, M., van Arem, B., Homem de Almeida Correia, G., van Wee, G.P., 2017. Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050. Eur. J. Transp. Infrastruct. Res. 17, 63–85.
- Mjosund, C.S. og Hovi I.B. (2020): *Kunnskap og data om mobile tjenesteytere*. TØI arbeidsdokument 51697.
- Müller S. A., Balmer M., Neumann A., Nagel K. (2020) Mobility traces and spreading of COVID-19 Research Paper 10.1101/2020.03.27.20045302, <https://depositonce.tu-erlin.de/handle/11303/10945>
- Nagel, K. & G. Flötteröd. 2012. Agent-based traffic assignment: going from trips to behavioral travelers. In Travel Behaviour Research in an Evolving World, eds. R. Pendyala & C. Bhat, 261–293. Bingley, United Kingdom: Emerald Group Publishing.
- Narodytska N., Kasiviswanathan S.P., Ryzhyk L., Sagiv M., Walsh T. (2018): Verifying Properties of Binarized Deep Neural Networks. Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2018, 6615-6624
- OECD International Transport Forum, 2015. Urban Mobility System Upgrade - How shared self-driving cars could change city traffic.
- Ortúzar, J. d. D. & L. G. Willumsen. 2011. Modelling Transport. Chichester: John Wiley and Sons.
- Papu Carrone, A. & Rich, J. (2017). "Network performance of autonomous cars at low market shares". Presented at hEART2017 Haifa.
- Peeta, S. & A. Ziliaskopoulos (2001) Foundations of dynamic traffic assignment: the past, the present and the future. Networks and Spatial Economics, 1, 233–265.
- Pernestål Brenden, A., Kottenhof, K., 2018. Self-driving shuttles as a complement to public transport – a characterization and classification, in: Proceedings of Transport Research Arena TRA 2018. Presented at the Transport Research Arena TRA 2018, Vienna, Austria.
- Pernestål Brenden, A., Kristoffersson, I., Mattsson, L.-G., 2017. Where will self-driving vehicles take us? Scenarios for the development of automated vehicles with Sweden as a case study, in: Proceedings of the European Transport Conference. Barcelona.
- Pernestål A., Kristoffersson, I (2019) Effects of driverless vehicles - Comparing simulations to get a broader picture European Journal of Transport and Infrastructure Research 19(1):1-23
- Pinjari, A. R., B. Augustin and N. Menon (2013). "Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles: An Assessment." Centre for Urban Transportation Research. Florida, USA.
- PROSAM (2019): *Test av ny kortdistansemodell – Tramod\_by for RTM23+*. PROSAM rapport 232. Norconsult AS.
- Ranheim, P. (2017) *Trenklin versjon 3 - Dokumentasjon og brukerveiledning*, Jernbanedirektoratet
- Rasouli, S. & H. Timmermans (2013) Activity-based models of travel demand: promises, progress and prospects. International Journal of Urban Sciences, 18, 31-60.
- SAE International, 2016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles [WWW Document]. URL [http://standards.sae.org/j3016\\_201609/](http://standards.sae.org/j3016_201609/) (accessed 9.11.17).
- Shen, W., Lopes, C., 2015. Managing autonomous mobility on demand systems for better passenger experience, in: Chen Q., Torroni P., Villata S., Hsu J., Omicini A. (Eds) PRIMA 2015: Principles and Practice of Multi-Agent Systems. PRIMA 2015. Lecture Notes in Computer Science, Vol 9387. Springer, Cham.
- Steenberg G., Berntsen S., Gabrielsen J., Jacobsen P-A., Johansen K.W., Thune-Larsen H. og Flügel S. (2016) Østre Linjes forbindelse mot Oslo - Kvalitetssikring av beslutningsunderlag for konseptvalg (KS1)

- Steinsland C., Johansen K.W., Ukkonen A. og Hulleberg N. (2020) Framtidige bompenginntekter i Bergen, Oslo, Nord-Jæren og Trondheim - noen alternative beregninger. Rapport til Regjeringens bompengutvalg. TØI rapport 1783/2020.
- Townsend, A., 2014. Re-programming Mobility - The Digital Transformation of Transportation in the United States. NYU Wagner Rudin Center for Transportation Policy and Management.
- Trommer, S., V. Kolarova, E. Fraedrich, L. Kröger, B. Kickhöfer, T. Kuhnimhof, B. Lenz, and P. Phleps (2016). Autonomous Driving – The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour. Tech. rep. ifmo – Institut für Mobilitätsforschung.
- Truong, L.T., De Gruyter, C., Currie, G., Delbosc, A., 2017. Estimating the Trip Generation Impacts of Autonomous Vehicles on Car Travel in Victoria, Australia. *Transportation* 44, 1279–1292.
- van den Berg, V.A., Verhoef, E.T., 2016. Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity. *Transp. Res. Part B Methodol.* 94, 43–60.
- Wee, B.V., Banister, D., 2016. How to Write a Literature Review Paper? *Transp. Rev.* 36, 278–288. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1065456>
- Wegener, M. og F. Fürst (2004). *Land-use transport interaction: state of the art*. Available at SSRN 1434678.
- Winter, K., Cats, O., Correia, G.H. de A., Arem, B. van, 2016. Designing an Automated Demand-Responsive Transport System: Fleet Size and Performance Analysis for a Campus–Train Station Service. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2542, 75–83.
- Yap, M.D., Correia, G., Arem, B. van, 2016. Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips. *Transp. Res. Policy Pract.* 1–16.
- Ye, L., Yamamoto, T., 2018. Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 490, 269–277.
- Zhang, R., Spieser, K., Frazzoli, E., Pavone, M., 2015. Models, algorithms, and evaluation for autonomous mobility-on-demand systems, in: American Control Conference (ACC), 2015. IEEE, pp. 2573–2587.
- Zhang, W., Guhathakurta, S., Fang, J., Zhang, G., 2015. Exploring the impact of shared autonomous vehicles on parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustain. Cities Soc.* 34–45.

# Vedlegg

## Vedlegg A: Litt mer om aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller

Sammenlignet med den tradisjonelle tilnærmingen i firetrinnsmodeller, innebærer aktivitetsbaserte etterspørselsmodeller (ABDM) tre grunnleggende endringer i metodikk:

1. Den aggregerte datastrukturen erstattes med en disaggregert; individer eller husholdning (og ikke befolkningssegmenter innenfor soner) er enheten i analysen
2. Transportetterspørsel er avledet fra etterspørsel etter å utføre aktiviteter
3. Tid (klokketid) er eksplisitt modellert (start/sluttid og planlegging av aktiviteter er viktig)

Med dette lover ABDM følgende forbedringer sammenlignet med klassiske firetrinnsmodeller:

1. Realisme i atferdsmodelleringen forbedres ettersom individets beslutninger er underlagt person-spesifikke begrensninger<sup>13</sup>
2. Valgaterferden er basert på heldaglige aktivitetsplaner og er modellert / simulert slik at det oppnås konsistens mellom avhengige turer.<sup>14</sup>
3. Høyere oppløsning i tid og rom
4. Inkluderer flere atferdsdimensjoner (valg av avreisetidspunkt) og noen ABDM tar også hensyn til beslutninger innen husholdninger (koordinering av turer for flere husholdsmedlemmer)

Resouli og Timmermans (2014) skiller tre typer ABDM i) «constraint-based» modeller ii) nyttemaksimerende modeller iii) «computational process» modeller.

De første typen, «constraint-based», sjekker i første omgang kun om aktivitetsplaner (som f.eks. rapportert i reisedagbøker) fremdeles er gjennomførbare gitt endringer i transporttilbud og arealutforming. Mer konkret sjekker de om aktivitetsområdet til individet er tilgjengelig, gitt nye romlige- og tidsmessige begrensninger. Selv om disse modellene ikke gir et fullstendig alternativ til firetrinnsmodeller, introduserte de noen viktige konsepter som «rom-tid-prismer» (space-time-prism) som avgrensner alle tilgjengelige destinasjoner gitt kjøretøyets hastigheter og nettverksforhold.

En annen type ABDM er basert på nyttemaksimeringen og har med dette noen likhetstegn med den matematiske formulering i RTM. Nyttemaksimerende ABDM predikerer de underliggende valgene bak aktivitetsplanen og reisemønster med diskrete valgmodeller og andre økonometriske modeller. Ofte er de forskjellige valgelementer hierarkisk kombinert med hjelp av nested-logit-modeller. Lemp et al (2007) beskriver en mikroskopisk aktivitetsbasert modell som starter med en syntetisk befolkning (altså en sett av individer (agenter) som representere den faktiske befolkningen) og bruker en serie av logit-modeller for valg av (bundee og ikke bundne) aktiviteter, valg av tidsmessige planlegging av aktiviteter, valg av hoved destinasjon, valg av transportmiddel og valg av sekundære destinasjonsvalg (betinget av valgt hoved-destinasjon). ABDM involverer vanligvis en «simulator» som simulerer valgene til alle individer i modellen hver for seg. Ettersom logit-modellen involverer et tilfeldig element når de brukes på enkeltpersoner (dvs. i mikrosimulering)<sup>15</sup>, er de resulterende aktivitetsplanene og valg av transportformer stokastiske.

---

<sup>13</sup> Dette håndteres til en viss grad også i RTM. For eksempel kan personer uten biltilgang ikke velge bil som transportmiddel. Dette var ikke tilfelle i klassiker firetrinnsmodeller.

<sup>14</sup> Seinere modellversjoner av RTM har også tatt vare på det ved å innføre rundturer (dog har disse rundturer ingen tidsmessig avhengigheter)

<sup>15</sup> Dette i motsetning til bruk av logitmodeller på aggregerte tall, der oppsplitting i alternative alltid er deterministisk

En tredje type ABDM er «computational process»-modeller. I stedet for å bygge på nyttemaksimering gjennom alle modellkomponentene er disse modellene regel-basert («rule-based») og bruker heuristikk for å predikere valgførelse. En slik modell heter AMOS og den simulerer modifikasjoner av aktivitetsplaner som følge av endringer i transporttilbud. AMOS genererer svar som "endre avreisetidspunkt", "bytte transportmiddel", "jobbe hjemme" og vurderer aksept for disse endringene ved nyttefunksjoner knyttet til aktivitetsplaner. En annen modell, ALBATROSS, er et regelbasert system med 27 «beslutningsstier» som representerer forskjellige elementer i planleggingsprosesser. Valgsettet er underlagt rom-tid prismer og andre begrensninger som oppdateres dynamisk under planleggingsprosessen (Resouli og Timmermans (2014, side 44).

ABDM-modeller har noe høyere krav til inndata enn firetrinnsmodeller. Spesielt trenger man data for aktivitetsplaner. Heldigvis gjennomfører de fleste land reisevaneundersøkelser der respondentene fører eller rapporterer reisedagsbøker. For å sette tidsavhengige begrensninger til aktivitetene kreves det også data om arbeidstid, åpningstider for butikker og fritidsaktiviteter. Disse kan det være resurskrevende å hente inn.

De fleste ABDM er stokastiske modeller og bør derfor kjøres flere ganger for å identifisere spektrale av mulige løsninger/likevekter. Det argumenteres for at dette beriker analysene og gir økt informasjon for transportplanleggingen. Dette kan dog være noe uvant for transportmodellerere som tidligere har jobbet med deterministiske modeller.

ABDM inneholder vanligvis ikke rutevalg og er dermed et alternativ for (bare) de tre første trinnene i firetrinnsmodellen. For at ABDM skal brukes som transportmodellsystem, må man dermed koble det til en trafikkavviklingsmodell (se avsnitt 4.4).

## Vedlegg B Metode for makroskopisk og statisk trafikkavvikling

Den tradisjonelle tilnærmingen til trafikkavvikling er statisk og makroskopisk og passer dermed naturlig til datastrukturen i de tre første trinnene i firetrinnsmodellen. Videre modelleres rutevalg innenfor trafikkavvikling deterministisk (igjen i samsvar med etterspørselsmodellen i firetrinnsmodellen). Deterministisk rutevalg betyr at trafikantene (innenfor et gitt transportmiddel) alltid velger ruten med lavest generaliserte reisekostnader (GK) og at GK antas å være perfekt observert av forskeren. Etersom reisetider er hovedfaktorene i GK, er reisetidene nokså avgjørende for rutevalg.

For å beregne reisetider bruker de fleste statiske avviklingsmodeller såkalte forsinkelsesfunksjoner, på engelsk «volume-delay-funksjoner» (VDF) som modellerer forsinkelse (reisetiden) som en monotont økende funksjon av trafikkvolumene på en enkellenke. Disse funksjoner har typisk ingen øvre grense (maksimale trafikkflyt) og kan dermed føre til trafikkvolumer på enkellenker som er ikke-konsistent med kapasitetsbegrensninger. Modeller basert på VDF innebærer også at trafikkflyten ut av en lenke tilsvarer trafikkflyten inn på denne lenken. Dette er et grunnleggende konsept for statisk avvikling med momentan trafikkflyt. Derfor kan man ikke fange opp en akkumulering av trafikken (kødannning) innenfor en lenke. Et annet underliggende prinsipp er først-inn-første-ut (FIFO), dvs. biler kan ikke kjøre forbi hverandre. Videre klarer VDF-baserte modeller ikke å fange opp en romlig forplantning av køer fra en flaskehals til lenker som ligger «oppstrøm» av flaskehalsen. Kort sagt modellerer VDF-baserte modeller kun forsinkelser men ikke kødannning som romlig fenomen.

Den statiske, makroskopiske og deterministiske måten å modellere rutevalg på er typisk som følger: (sammenlign Nagel og Flötteröd 2012). Beregn innledende rutevalg som den beste ruten på et tomt nettverk for hvert OD-par, og gjenta følgende mange ganger

- a) Last etterspørsel på nettverk langs rutene og beregne nettverksforsinkelse og GK
- b) beregne nye rutevalg basert på nettverksforsinkelser og GK
- c) fordele etterspørselen mellom rutene basert på nettverksforsinkelser og GK.

Dette fører til en Wardrop's likevekt, altså en deterministisk brukerlikevekt. Matematisk tar denne følgende form (Nagel and Flötteröd 2012)

$$(3) \quad c(k) = \min_{s \in K^{od}} c(s) \rightarrow r_k^{od} \geq 0$$

$$c(k) > \min_{s \in K^{od}} c(s) \rightarrow r_k^{od} = 0$$

$k \in K^{od}$  representerer de mulige rutene mellom startsted  $o$  og destinasjon  $d$ .  $c(k)$  er de generaliserte reisekostnadene for rute  $k$ , og  $r_k^{od}$  er trafikkvolumet på rute  $k$ . I brukerlikevekt vil det derfor ikke være trafikk på ruter som har ikke-minimale kostnader (for minst ett OD-par), og alle ruter som blir brukt, innebærer identiske kostnader for et gitt OD-par.

Merk at hvis kapasitetsbegrensninger blir ignorert (som i tilfelle med standard VDF-baserte modeller) gir dette en såkalt "alt-eller-ingenting" fordeling (se Ortuzar og Willumsen 2011 side 359 for detaljer), noe som innebærer at alle personer, som reiser på et gitt OD-par, velger samme rute.

## Transportøkonomisk institutt (TØI) Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning

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 utgir tidsskriftet Samferdsel på internett og driver også forskningsformidling gjennom TØI-rapporter, artikler i vitenskapelige tidsskrifter, samt innlegg og intervjuer i media. TØI-rapportene er gratis tilgjengelige på instituttets hjemmeside [www.toi.no](http://www.toi.no).

TØI er partner i CIENS Forskningscenter for miljø og samfunn, lokalisert i Forskningsparken nær Universitetet i Oslo (se [www.ciens.no](http://www.ciens.no)). Instituttet deltar aktivt i internasjonalt forsknings-samarbeid, med særlig vekt på EUs rammeprogrammer.

TØI dekker alle transportmidler og temaområder innen samferdsel, inkludert trafiksikkerhet, kollektivtransport, klima og miljø, reiseliv, reisevaner og reiseetterspørsel, arealplanlegging, offentlige beslutningsprosesser, næringslivets transport og generell transportøkonomi.

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

### Besøks- og postadresse:

Transportøkonomisk institutt  
Gaustadalléen 21  
NO-0349 Oslo

22 57 38 00  
[toi@toi.no](mailto:toi@toi.no)  
[www.toi.no](http://www.toi.no)