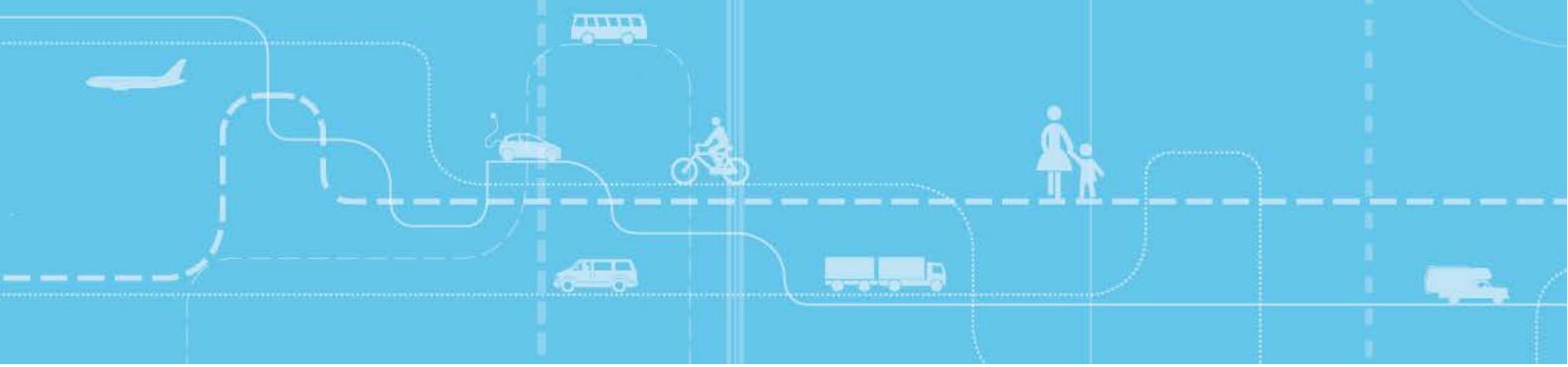


Trengsel ombord

En oversikt med forslag til videre arbeid



Trengsel ombord

En oversikt med forslag til videre arbeid

Harald Minken

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.

Tittel: Trengsel om bord – en oversikt med forslag til videre arbeid

Forfattere: Harald Minken

Dato: 01.2017

TØI rapport: 1551/2017

Sider 44

ISBN Elektronisk: 978-82-480-1868-1

ISSN 0808-1190

Finansieringskilde: Transportøkonomisk institutt

Prosjekt: 4330 - Samfunnsøkonomiske metoder

Prosjektleder: Harald Thune-Larsen

Kvalitetsansvarlig: Anne Madslie

Emneord: Kollektivtrafikk
Rutevalg
Trengsel

Sammendrag:

Trengsel om bord på kollektive transportmidler gjør det aktuelt å innføre rushtidsprising og andre former for trafikkstyring, også i kollektivtrafikken. Den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av kollektivutbygging vil øke med trengselen om bord, men på den andre sida innebærer trengselen at det ikke lenger er opplagt at drifta av kollektivsystemet skal subsidieres.

Å ta hensyn til trengselen i samfunnsøkonomiske analyser vil kreve en større ombygging av den delen av bytransportmodellene som handler om kollektivtrafikanterenes rutevalg. På kort sikt finnes det likevel noen enklere grep som kan gi bedre resultater enn dagens praksis.

Title: In-vehicle crowding: An overview with suggestions for future work

Author(s): Harald Minken

Date: 01.2017

TØI report: 1551/2017

Pages 44

ISBN Electronic: 978-82-480-1868-1

ISSN 0808-1190

Financed by: Institute of Transport Economics

Project: 4330 - Samfunnsøkonomiske metoder

Project manager: Harald Thune-Larsen

Quality manager: Anne Madslie

Key words: Assignment model
Crowding
Public transport

Summary:

In-vehicle crowding in public transport systems may call for congestion pricing and other forms of rush-hour demand management in the public transport system. The existence of crowding will increase the economic value of capacity expansion. On the other hand, crowding implies that it is no longer obvious that day-to-day operations should be subsidised.

To take account of crowding in cost benefit analyses requires a major revision of the part of the urban transport models that concerns public transport route choice. Provisionally, one will have to make do with some simpler computations outside of the models.

Language of report: Norwegian

Rapporten utgis kun i elektronisk utgave.

This report is available only in electronic version.

Transportøkonomisk Institutt
Gaustadalleen 21, 0349 Oslo
Telefon 22 57 38 00 - www.toi.no

Institute of Transport Economics
Gaustadalleen 21, 0349 Oslo, Norway
Telefon 22 57 38 00 - www.toi.no

Forord

Arbeidet som førte fram til denne rapporten begynte allerede for snart tre år siden under det strategiske instituttprogrammet om transportmodeller (TØI-prosjekt nr. 3516). Det blei tatt opp igjen i begynnelsen av 2016 i forbindelse med kvalitetssikringen (KS1) av Oslovet (TØI-prosjekt 4299), hovedsakelig med sikte på å vurdere hvordan trengselsproblemene i kollektivsystemet i osloområdet ville påvirke den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av kapasitetsøkende tiltak. Det avsluttende arbeidet i høst har vært finansiert i den strategiske instituttsatsingen om samfunnsøkonomiske metoder (TØI-prosjekt 4330).

Rapporten er skrevet av forsker II Harald Minken. Avsluttende tekstbehandling er gjort av sekretær Trude Rømming. Forskningsleder Anne Madslie har stått for kvalitetssikringen. Forsker II Stefan Flügel takkes for nyttige kommentarer til et tidligere utkast.

Oslo, januar 2017
Transportøkonomisk institutt

Gunnar Lindberg
direktør

Anne Madslie
forskningsleder

Innhold

Sammendrag

Summary

1	Bakgrunn.....	1
1.1	Formene for trengsel	1
1.2	Behovet for modeller med trengsel ombord.....	2
1.3	Gammel kunnskap kan måtte revideres.....	3
1.4	Hva rapporten inneholder.....	3
2	Kvantifisering og verdsetting.....	5
2.1	Trengselskostnaden avhenger av belegget.....	5
2.1.1	Mange faktorer spiller sammen.....	6
2.2	Mål på trengsel om bord	7
2.3	Verdsettingsundersøkelser	8
2.4	Trengselskostnadens matematiske form	9
2.4.1	Matematisk formulering.....	11
2.5	To definisjoner.....	13
2.6	Prioriteringsregler	15
3	Modeller med trengsel	17
3.1	Frekvensbaserte modeller for enkeltlinjer.....	17
3.2	Ruteplanbaserte modeller for enkeltlinjer.....	20
3.2.1	Andre versjon av modellverktøy Trenklin (Trenklin 2).....	22
3.3	Alternative former for modellering av trengsel.....	22
3.4	Trengsel i praktisk anvendelige nettverksmodeller.....	24
3.4.1	Zorn m.fl. (2012).....	24
3.4.2	Leurent og Liu (2009).....	25
3.4.3	Bel, Pel og Pieters (2014)	26
3.4.4	Valg av tilnærming	27
4	Forenklet trengselsberegning	29
4.1	Foreslått framgangsmåte	30
4.2	Elastisitetsberegning.....	31
4.3	Ett steg videre	32
5	Prosjektforslag.....	33
6	Tilpasninger og tiltak.....	35
7	Drøfting og konklusjoner.....	38
	Litteraturliste	40

Sammendrag:

Trengsel om bord – en oversikt med forslag til videre arbeid

TØI rapport 1551/2017
Forfatter: Harald Minken
Oslo 2017 44 sider

Trengsel om bord på kollektive transportmidler gjør det aktuelt å innføre rushtidsprising og andre former for trafikkstyring, også i kollektivtrafikken. Den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av kollektivutbygging vil øke med trengselen om bord. På den andre sida innebærer trengselen at det ikke lenger er opplagt at drifta av kollektivsystemet skal subsidieres. Dermed må et snart femti år gammelt transportøkonomisk dogme revideres, helt eller delvis.

Å ta hensyn til trengselen i samfunnsøkonomiske analyser vil kreve en større ombygging av den delen av bytransportmodellene som handler om kollektivtrafikantenes rutevalg. Det finns mange måter å gjøre det på. I valget mellom dem kan man dessverre ikke få både i pose og sekk.

På kort sikt finnes det også enkle grep som kan gi bedre resultater enn dagens praksis, som jo for det meste er å se helt bort fra trengselen.

I de siste åra har det oppstått økende trengselsproblemer i kollektivtransporten rundt våre største byer. Trengsel om bord er en form for ekstern virkning som kollektivtrafikantene påfører hverandre. Omtrent på samme måte som når bilene på vegen påfører hverandre kø, påfører passasjerene hverandre trengselsulemper om bord på toget, T-banen, bussen eller trikken. Det er åpenbart en ulempe å ikke få sitteplass, og ulempen blir større jo tettere folk må stå og jo lengre tid reisa tar. Dette er vist i kapittel 2. Trengselen medfører også at det brukes lengre tid på holdeplassen eller stasjonen. Det er en ekstern kostnad som de som skal av og på påfører de som er om bord og kollektivselskapet i form av lengre reisetid (for passasjerene) og lengre rundturtid (for selskapet). Videre kan trengselen også medføre punktlighetsproblemer og andre uregelmessigheter. I de verste tilfellene kan bussen bli så full at den ikke tar opp nye reisende.

Verdsettingsstudier har tallfestet trengselskostnadene som den enkelte opplever ved ulike grader av trengsel om bord. Det gir grunnlag for å beregne den samfunnsøkonomiske kostnaden som trengselen medfører. Men i en samfunnsøkonomisk analyse er dette ikke tilstrekkelig, for det vi da har oversett, er hvordan passasjerene vil reagere på trengselskostnadene. De reagerer ved for eksempel å reise mindre, velge andre transportmåter, reise på andre tidspunkter eller velge andre reiseruter. For å ta et litt ekstremt eksempel: I noen byer i verden kan en se at folk velger å begynne reisa ved å reise motsatt veg av den de skal. Det er fordi de da kan få en sitteplass. Den beholder de når toget snur ved endeholdeplassen, og slik får de sitteplass i riktig retning, men til prisen av en lengre reise.

For å forutsi hvordan folk vil reagere på endringer i transportsystemet bruker vi transportmodeller. Det er en form for etterspørselsfunksjoner som beregner sannsynlig reisehyppighet, reisemål, transportmåte og rutevalg på individnivå, med

utgangspunkt i bostedsområde, bilhold og andre relevante kjennetegn ved individet, og reisetid, reisekostnader og andre relevante kjennetegn ved transportsystemet. I de norske bytransportmodellene (delområdemodeller fra regionalt modellsystem, RTM) har vi etter hvert klart å ta hensyn til kø i vegsystemet, dvs. at reisetida på en vegstrekning er avhengig av hvor stor trafikken er på det aktuelle tidspunktet. Men vi mangler noe tilsvarende på kollektivsida. Delmodellen for valg av reiserute gjennom kollektivsystemet tar nemlig ikke hensyn til hvor fulle de ulike transportmidlene er. Den foreliggende rapporten har til hensikt å påpeke utveger for å bøte på det, både på kort sikt (i form av beregninger på sida av transportmodellen) og litt lengre sikt (i form av en ny delmodell for rutevalg i kollektivsystemet i bytransportmodellene).

Det finnes nå ganske mye litteratur om trengsel om bord, inkludert litteratur som gjør greie for modeller og algoritmer som kan finne brukerlikevekt i trengselsbelastede nettverk av realistisk størrelse. Til hjelp for det fortsatte arbeidet har vi derfor i rapporten samlet sammen en forholdsvis fyldig litteraturliste. I kapittel 3 går vi gjennom denne litteraturen. I svært mange av artiklene vi har i litteraturlista, finnes det dessuten egne litteraturoversikter, med mange henvisninger som vi ikke har tatt med her. Det er vårt håp at norsk transportforskning vil kunne sette av tilstrekkelig med ressurser til å gå dypere inn i denne litteraturen i åra som kommer.

På kort sikt anbefaler vi enten å bruke elastisitetsberegninger til å justere ned etterspørselen på reiserelasjoner med trengsel om bord, eller at vi overlater til modellen å foreta etterspørselsjusteringen ved å øke den opplevde reisetida eller tidskostnaden i den generaliserte reisekostnaden på utvalgte strekninger i modellsystemet.

Elastisitetsberegningene er behandlet i kapittel 4.

Etterspørselsjustering ved hjelp av å justere generaliserte kostnader i modellen er en mer sofistikert metode. Den generaliserte kostnaden på en reiserelasjon er summen av tid, pengeutlegg og andre kostnadskomponenter som bestemmer etterspørselen på denne relasjonen. Det er viktig at justeringen av tidsverdivekter, kunstig forlengelse av reisetider eller andre modellgrep som skal tjene som tilnærming til trengselskostnadene, påvirker trafikantenes etterspørsel, ikke kollektivselskapets kostnader. Derfor må de faktiske reisetidene beholdes når selskapets kostnader skal beregnes. Alternativt (eller i tillegg) er det mulig å legge til en konstant i de generaliserte kostnadene for kollektivreiser på bestemte reiserelasjoner. Begge metoder er prøvd ut i Pel, Bel og Pieters (2014).

Alle slike justeringer må naturligvis ha et godt empirisk grunnlag. Som utgangspunkt kan en bruke tallene i Figur 1 i rapporten, som er en skjønnsmessig oppsummering av hvordan tidsverdien øker med trengselen i noen av de nyeste og beste internasjonale tidsverdistudiene. Men deretter må resultatene sammenliknes med observert trafikk ved ulike trengselsnivåer.

Det vi ikke klarer med denne metoden, er å ta hensyn til at sittende og stående opplever trengselen forskjellig. Om dette er det viktigste hensynet, finnes det også modeller for det, fra enkle analytiske modeller til rutevalgmodeller som kan brukes på store kollektivnettverk. Data kan hentes fra gjennomførte verdsetningsstudier og telling av av- og påstigning og belegget om bord. Men om det viktigste hensynet er å skille mellom ulempen for sittende og stående, kan man trolig skyte en hvit pinn etter å la tidsverdien også variere med belegget om bord.

Visse særtrekk ved rutetilbudet på T-banen i Oslo akkurat nå for tida gjør det mulig å estimere trengselskostnadene ved hjelp av en såkalt «revealed preference»-undersøkelse. En slik undersøkelse er skissert i kapittel 5.

Forutsetningen, både for det kortsiktige og det langsiktige arbeidet, er at det finnes (eller er mulig å etablere) gode og pålitelige data om påstigning og avstigning på holdeplasser og stasjoner og om belegg på lenkene mellom stasjonene. Data bør trolig være gjennomsnitt over den mest belastede timen.

Realistisk sett må vi leve med trengsel i kollektivsystemet i de største byene. Kapasitetsøkende tiltak, som for eksempel de planlagte nye tunnelene gjennom Oslo, vil det tid å få på plass. I mellomtida finns det likevel mindre og billigere tiltak som kan redusere problemene. I kapittel 6 nevner vi noen slike. På samme måte som på vegsida kan det være effektivt å øke kollektivtakstene i den perioden hvor problemene er størst. Alternativt kan en også gi et billigere (eller gratis) tilbud i en time eller to før rushtida. En kan også fordele byrdene litt mer likt på alle de reisende, ved å redusere antall sitteplasser og forbedre komforten for de som står. Det virker sannsynlig at kollektivtrafikantene i de norske byene vil kunne tilpasse seg gradvis til mer trengsel, på samme måte som de har gjort i større byer i andre land. Men det krever kanskje en kulturendring som ikke alltid kommer av seg sjøl.

Summary:

In-vehicle crowding: An overview with suggestions for future work

TØI Report 1551/2017

Author: Harald Minken

Oslo 2017, 44 pages Norwegian language

In-vehicle crowding in public transport systems may call for high rush-hour fares and other forms of demand management, not only on the road, but also in the public transport system. The existence of crowding increases the economic value of capacity expansion, but on the other hand, it also implies that it is no longer obvious that day-to-day operations of the urban public transport system should be heavily subsidised. Thus in the light of increasing crowding and congestion in the public transport system, a nearly fifty year old truth in transport economics will have to be revised, wholly or in part.

To take account of in-vehicle crowding in cost benefit analyses requires a major revision of the part of the urban transport models that concerns public transport route choice. There is more than one way to do it, but no way yet of including all important effects and distinctions in only one model.

Provisionally, one will have to make do with some simpler computations outside of the models.

Lately, in-vehicle crowding in the public transport system is about to become a serious problem in and around the major cities of Norway. In-vehicle crowding is a form of external effect that the public transport users impose on each other. In about the same way as when cars on the road impose congestion costs on each other, passengers impose crowding costs and other inconveniences and disutilities on each other on local trains, metros, buses and trams. Having to stand and not being able to get a seat is an inconvenience, and it gets worse the closer people have to stand together and the longer it lasts. This is explained in Chapter 2. Crowding also leads to boarding and alighting taking longer time, and thus to more time being used at stops. This is an external cost imposed by those boarding and alighting on those on board, increasing their travel time, and on the public transport operator, increasing the need for rolling stock. Eventually, it may also lead to reduced punctuality and other forms of disturbances. Ultimately, the vehicle may get so crowded that it cannot allow new passengers to board.

Valuation studies have quantified the mean crowding costs that individuals experience at different levels of crowding. This is the basis for economic appraisal of the costs to society of crowding. But for a proper appraisal, it is not enough, because it does not take into account how the passengers react to changes in the level of crowding. For instance, they may react by reducing the number of trips, by shifting mode, by travelling at other times of day or by choosing other public transport routes. To take a somewhat extreme example: In some cities of the world, it is observed that travellers begin their trip by travelling in the opposite direction of where they are ultimately headed. This is because that way, they are able to get a seat. They keep their seat until the end of the line, and thus they are able to keep their seat also when the train turns around and heads in the right direction. The price they pay is the extra time that their trip takes.

So called transport models are used to predict how travellers react to changes in the transport system. They are a form of demand functions that compute probable trip frequencies, destinations, modes and route choices at the level of the individual, based on zone of residence, car ownership rate and other characteristics of the individual, and trip times, out-of-pocket costs and other relevant characteristics of the transport system. The Norwegian urban transport models have by and by been able to give a fairly good representation of congestion in the road system, making travel time on a given segment of roads and streets depend on the level of traffic there at a given time of day. But we lack something similar on the public transport side. This is because the sub model that predicts the choice of route through the public transport system does not take account of the level of crowding on the different lines and modes. The purpose of the present report is to point out ways to overcome this deficiency, both in the short run (by computations outside of the transport model system) and in the long run (in the form of a new sub model for public transport route choice in the urban transport models).

The literature on in-vehicle crowding has now become fairly large. This includes the literature on models and algorithms to find user equilibrium in congested and crowded networks of realistic size. To help with the tasks ahead, the present report provides a fairly large list of references, and in Chapter 3 we briefly survey this literature. In addition, many of the articles that we refer to have their own comprehensive literature reviews, with many entries that we have not included here. It is hoped that Norwegian transport research will be able to find resources to go deeper into this literature in the coming years.

In the short run, we recommend either to use elasticities to adjust down demand on trip relations with crowding, or to leave it to the transport model to make the adjustment by increasing the perceived time cost or trip time in the generalised costs on selected trip relations of the model system.

Elasticity computations are treated in Chapter 4.

A more sophisticated method of adjusting demand is to adjust the generalised costs in the model. The generalised cost on a trip relation is the sum of time costs, monetary costs and other cost components that determine demand on this relation. It is important that the adjustment of trip times and costs only affect passenger demand, not the costs of the public transport company. Therefore one must keep the real link transport times when the costs of the public transport company are computed. Alternatively (or in addition) one might add a constant to the generalised costs of public transport trips on particular trip relations. Both methods have been tested in Bel, Pel and Pieters (2014).

Of course, all such adjustments must have a sound empirical basis. For a start, one might use the figures of Figure 1 in the report. They are a subjective assessment of how the value of time increases with the level of crowding in some of the newest and best international value-of-time studies. But of course the results of using these values must be compared with observed traffic at different levels of crowding.

What we do not take into account by this approach is that those who get a seat and those who will have to stand experience the in-vehicle congestion differently. If we think this is the most important aspect of this form of congestion, a range of models are available, from simple analytical models of single lines to large-scale

assignment models, potentially covering public transport networks of very large cities. The data for such models may partly be taken from valuation studies and partly from counts of boarding and alighting movements and ridership on all lines. To take due account of the difference between those who sit and those who stand, however, one will have to ignore how the perceived congestion costs increase with the level of congestion. One cannot have it both ways.

Peculiarities of the scheduled supply in the metro system of Oslo at the moment makes it possible to estimate crowding costs by the so called revealed preference method. A proposal for such a study is outlined in Chapter 5.

A precondition for both the short and long run work is that good and reliable data on boarding and alighting at stops and stations, and on the number of passengers on board on all links between the stops, exist or can be established. The data should probably be an average over the hour with the highest level of demand.

In all probability, we will have to live with crowding in the public transport system of the largest cities for at least 10 to 15 years (and maybe forever). In the meantime, there will nevertheless be a variety of minor projects and inexpensive policies that can reduce the problems. In Chapter 6 we mention some of these. Just like road pricing on the road, it may be efficient to increase fares in public transport in the period when the crowding problems are at their worst. Alternatively, one might offer cheaper tickets (or perhaps free tickets) for an hour or two before the rush hours. One might also share the burdens of crowding more equally between all young and able-bodied passengers, by reducing the number of seats and improving conditions for the standing. It seems probable that as time goes by, public transport users in Norwegian cities will gradually adapt to more crowded conditions, in the same way that the public transport users in large cities in other countries have done. But for this to happen, a cultural change must occur, and that will not always come of itself.

1 Bakgrunn

1.1 Formene for trengsel

Trengsel i transportsystemet har mange former. Det som det snakkes mest om, er bilkøer på vegene. Bilene forsinker hverandre, men de forsinker også busser og trikker. Og biler, syklistene og gående går i vegen for hverandre og kjemper om begrenset plass på gater, veger og fortauer.

Også transportørene kjemper om plassen med hverandre. På flyplasser med stor trafikk kan flyselskapene oppleve mangel på slots, dvs. ledige avgangstider. Tilsvarende kan det være mangel på ruteleier i jernbanetrafikken, slik vi så i konflikten mellom NSB og Flytoget om retten til å kjøre tog gjennom Oslo-tunnelen. Kapasiteten gjennom denne tunnelen er naturligvis en helt essensiell knapp ressurs i det norske jernbanesystemet.¹

Over lange distanser kan begrensninger i antall avganger og begrenset kapasitet per avgang gjøre det vanskelig for passasjerene å få billett, enten det er til flyreiser eller jernbanereiser. I lokaltrafikken derimot, der antall passasjerer per avgang ikke er regulert gjennom billett kjøpet, vil knappheten på plasser gi seg utslag i trengsel om bord på de kollektive transportmidlene. Overfylte tog og busser gir trengsel ved av- og påstigning, og dermed lengre oppholdstider på stoppestedene. De som ikke får sitte, vil få en mer ubehagelig reise enn de som har sitteplass, og de som må stå, vil dessuten bli påført mer ubehag jo tettere de står. I tillegg kan det forekomme trengsel på perrongen og trengsel og køer i terminalene for øvrig for trafikantene som skal passere gjennom flyplasser, jernbanestasjoner og buss-terminaler.

I denne rapporten behandler vi ikke køer på vegene (sjøl om de også vil påvirke framkommeligheten for busser og trikker), og heller ikke kapasitetsproblemer i former for kollektivtransport der det kreves at man kjøper plassbillett. Det dreier seg altså utelukkende om trengselsproblemer i lokal kollektivtrafikk, og spesielt om ulempene slik de oppleves av trafikantene. Det er fem slike ulemper.

De umiddelbare ulempene er trengsel om bord, forsinkelser og oversitting. *Trengsel om bord* omfatter ulempen ved å stå og ulempen ved å ha liten plass å stå eller sitte på. *Mindre forsinkelser* oppstår på grunn av trengselen ved dørene ved av- og påstigning, og fordi det tar lengre tid for de som skal av å komme fram til dørene og for de som skal på å komme innover i vogna. *Oversitting* er vel helst et begrep fra ferjestatistikken, der det betyr at biler ikke kommer med ferjeavgangen fordi bildekket på ferja er fullt. Vi bruker det mer generelt for venting som oppstår når kapasiteten per avgang i kollektivsystemet er så liten at det er noen som ikke kommer med. Når trengselen om bord blir stor nok, vil oversitting og trengsel om

¹ På et tidspunkt tok denne konflikten form av en konflikt mellom Jernbaneverket, som sto for prinsipper som ville bevare Flytogets rettigheter til å bruke Oslotunnelen i all overskuelig framtid, og Jernbanetilsynet, som forfektet et synspunkt som ville kunne innskrenke disse rettighetene. Se Minken (2014).

bord ofte bli alternative måter som trengselsproblemet kan komme til uttrykk på. *Større forsinkelser* kan oppstå fordi planleggerne vil måtte møte den økte trengselen på den enkelte avgangen ved å øke antall avganger. Det betyr at uhell og forsinkelser på en av avgangene oftere vil forplante seg og få konsekvenser for andre avganger også (følgeforsinkelser).

De indirekte (administrerte) ulempene ved å overbelaste systemet er økt reisetid. Økt reisetid kan oppstå fordi bussen eller toget bruker lengre tid på holdeplassen enn den ville gjøre om det ikke var trengsel. Planleggerne vil ta hensyn til det når de bestemmer en ruteplan. Men særlig øker reisetida fordi planleggerne, om de er kloke, vil legge inn større slakk i rutetidene for å unngå for mange alvorlige forsinkelser. Større slakk innebærer lavere planlagt fart, lengre opphold på holdeplassene, og dermed lengre reisetider. Men det kan være en fornuftig pris å betale for å unngå uventede større avvik fra rutetidene.

I den grad trengselen likevel slår ut i form av daglige forsinkelser og usikkerhet om reisetida, står vi relativt dårlig rustet til å vurdere den samfunnsøkonomiske kostnaden av det. Det vi si: Vi har for så vidt gode anslag på hva passasjerene er villig til å betale for redusert usikkerhet, men vi veit betydelig mindre om hvordan ny infrastruktur, nytt rullerende materiell, nye former for automatisert overvåking og styring av trafikken, eller andre aktuelle tiltak, vil redusere forsinkelsene og forstyrrelsene. Derfor skal vi heller ikke gå nærmere inn på det her, men nøye oss med å påpeke at det er en viss sammenheng mellom forsinkelser og de andre trengselsulempene, og at denne sammenhengen for tida reguleres gjennom ruteplanleggenes skjønn og erfaring.

Økt oppholdstid på holdeplasser og stasjoner, og økt variabilitet i oppholdstida, vil det verken være veldig vanskelig å måle, verdsette eller beregne nytten av å redusere. Det viktigste virkemidlet (etter at billettbetalingen ikke lenger er noe stort problem) er naturligvis utformingen av dørene og arealet innafor. Noe kan oppnås gjennom kampanjer for økt disiplin ved av- og påstigning. En mulig fare er at en gjør systemet så rigid at det ikke lenger er mulig å bruke for bevegelseshemmede, barnehager og andre som trenger lengre tid. En samfunnsøkonomisk analyse av alternative tekniske løsninger for av- og påstigning ville absolutt være interessant, men har meg bekjent ikke vært gjort i Norge. Sjøl om vi kommer til å nevne denne kilden til reduserte ulemper i denne rapporten, vil vi derfor i praksis konsentrere oss om trengsel om bord.

Tirachini m.fl. (2013) har en gjennomgang av de aller fleste virkninger som trengselen kan ha, blant annet på transporttida, ventetida, påliteligheten, komforten, tidsverdiene, rutevalget og optimalt tilbud og pris i kollektivtrafikken.

1.2 Behovet for modeller med trengsel ombord

Trengselsproblemene begynner nå å bli akutte i rushtida i deler av kollektivsystemet i Oslo og noen andre byområder i Norge. Befolkningsutviklingen tilsier at dette vil bli et større problem i tida som kommer, men på 10 til 20 års sikt må vi sannsynligvis likevel klare oss uten større nye infrastrukturtiltak som kunne løse problemet. Vi må med andre ord ta trengselen – trengsel om bord på transportmidlene, ved av- og påstigning og på perrongene – inn over oss når vi når vi i de nærmeste årene former ut driftsopplegg og kapasitetsøkende tiltak, når vi ana-

lyserer hvordan trafikantene vil tilpasse seg, og når vi vurderer samfunnsøkonomien i tiltakene. Kostnadene ved å øke kapasiteten må avveies mot ulempene ved et overbelastet system. Derfor er det på høy tid å finne fram til metoder for å beregne trengselsulempene. Litteraturgjennomgangen, de tekniske opplysningene og de sterkt forenklede modellene i denne rapporten er et steg i den retningen.

1.3 Gammel kunnskap kan måtte revideres

Til tross for at noen har hevdet det motsatte, er litteraturen om trengsel om bord i ferd med å bli ganske omfattende. Grunnlaget er ideen til Kraus (1991) om at de som får sitteplass vil ha lavere tidsverdi enn de som må stå. De som får sitteplass vil derfor påføre de som ikke får sitte en ekstern ulempeskostnad. Dette kommer i tillegg til andre former for negative eksterne virkninger av økt kollektiveterspørsel. Økt etterspørsel gir blant annet lengre gjennomsnittlig stopptid ved stasjonene, hvilket ikke bare øker kollektivselskapets driftskostnader, men også de generaliserte reisekostnadene til passasjerene. Trengsel om bord og trengsel ved av- og påstigning kan vi under ett kalle Kraus-effekten. Den virker i motsatt retning av den såkalte Mohring-effekten, som går ut på at flere passasjerer gir lavere kostnader pr passasjer for kollektivselskapet og skaper muligheter for hyppigere avganger og bedre flatedekning, slik at også passasjerene får lavere generaliserte kostnader. Hvilket igjen gir flere passasjerer, osv.

Mens Mohring-effekten innebærer at en eksogent gitt etterspørselsøkning setter i gang en positiv spiral, innebærer Kraus-effekten at den samme eksogent gitte etterspørselsøkningen setter i gang en negativ spiral som bringer etterspørselen tilbake mot det den var før.

Når kollektivsystemet blir overbelastet er det altså ikke lenger nødvendigvis slik at den positive eksterne effekten som trafikantene indirekte påfører hverandre i form av hyppigere avganger og bedre flatedekning, er større enn den negative eksterne effekten i form av ubehag og ulemper på grunn av trengsel (Kraus 1991, Tirachini m.fl. 2010). Det er derfor heller ikke sikkert at kollektivbilletten skal subsidieres. Det vi kan si, er følgende: Om vi ser bort fra den eksterne virkningen ved på- og avstigning og bare ser på trengsel om bord, tilsier Kraus' modell at billettprisen i *ytterområdet* av en T-banelinje eller busslinje mot sentrum, skal være høyere enn prisen på billettene på innerstrekninger, der alle som går på, må stå. For busser og trikker, som har få dører i forhold til T-baner, kan vi ikke engang si det.

I modellen til Tirachini m.fl. (2010), som bygger på gjennomsnittsberegninger for kollektivlinja som helhet, og som ikke skiller mellom sittende og stående, får vi imidlertid enklere resultater, og også de går i retning av å motsi gjeldende visdom: Når trengselen blir stor nok, skal billettprisen settes så høyt at det ikke lenger blir behov for subsidier.

1.4 Hva rapporten inneholder

I kapittel 2 viser vi hvordan trengsel om bord kan uttrykkes matematisk, måles og verdsettes.

Kapittel 3 er i første rekke en oversikt over utvalgte deler av litteraturen på området. Vi deler den teoretiske litteraturen inn i to hovedstrømninger, nemlig frekvensbaserte og ruteplanbaserte modeller, og ser på hvordan hver av de to tilnærmingene har blitt utviklet til mer praktiske rutevalgsmo­deller. Vi vurderer også den mer sparsomme litteraturen om hvordan slike rutevalgsmo­deller kan integreres i en stor nasjonal eller regional transportmodell. Omtalen av hver enkelt artikkel er kortfattet, og er ikke ment å kunne erstatte et nærmere studium.

Sjøl om det trengs videre studier, kan vi i det minste trekke noen foreløpige konklusjoner av gjennomgangen i dette kapitlet. Den ene er at det er mulig å modifisere kostnadene i rutevalgsdelen av våre nåværende modeller, slik at de bedre gjenspeiler ulike former for trengsel i kollektivsystemet. Det kan gjøres på kort eller mellomlangt sikt. Den andre er at det er mulig på lengre sikt å etablere en rutevalgsdel som skiller mellom stående og sittende, beregner sannsynligheten for å sitte og stå på hver del av reisa, og som sammen med etterspørselsdelen finner brukerlikevekt i kollektivsystemet. Dette kan ta lengre tid å få på plass.

I en del nye utredninger på jernbaneområdet er kostnadene ved trengselen ombord beregnet, men uten å ta hensyn til etterspørselsvirkningen. I kapittel 4 foreslår vi en enkel metode for å rette på det. Dette er viktig nok, men ikke annet enn en nødløsning før trengselen er innarbeidet i modellsystemet på en mer tilfredsstillende måte.

Kapittel 5 skisserer et forslag til en revealed preference-undersøkelse av trengsel på T-banen i Oslo. I kapittel 6 skifter vi fokus fra modell og analyse til praktiske erfaringer, og drøfter hvordan passasjerene kan tenkes å tilpasse seg til trengselen i praksis, og hvilke muligheter myndigheter og kollektivselskaper har til å tilpasse sin politikk og avhjelpe problemet på kort sikt. Kapittel 7 trekker noen enkle konklusjoner for det framtidige arbeidet.

2 Kvantifisering og verdsetting

2.1 Trengselskostnaden avhenger av belegget

La oss se på en passasjer som går på en T-bane på veg til byen fra en av de ytre stasjonene. Vedkommende vil ikke ha problemer med å finne plass, og vil ikke oppleve noen trengselskostnader ved starten av reisa. Etter noen stasjoner vil toget fylles. Vår mann vil fremdeles ha sin sitteplass, men det fylles opp rundt ham. Både han og de som kommer på mens det enda er sitteplass, vil etter noen stasjoner oppleve en mild form for trengsel, i form av at setene rundt dem fylles opp av andre. Sjøl om det etter hvert blir fullt av folk som står, vil vår mann trolig ikke oppleve økte trengselskostnader ut over dette.

Men de som kommer på etter noen stasjoner, mens det enda er sitteplasser, men ikke veldig mange, vil i tillegg oppleve trengselsulempen knyttet til at de ikke finner plasser ved siden av dem de ønsker å snakke med eller reise sammen med.

Deretter kommer vi til de stasjonene der det ikke finnes sitteplasser til alle nye reisende. De vil da ha en viss sannsynlighet for å få sitte og en viss sannsynlighet for å måtte stå. Ulempen ved å stå er under enhver omstendighet større enn den maksimale trengselsulempen for de som sitter. Den øker dessuten med trengselen, uansett hvordan den måles.

Noen stasjoner seinere vil alle nye reisende måtte stå. For hver stasjon hvor det kommer nye på og ingen går av, vil trengselen for de stående øke. På dette tidspunktet består vogna av et gitt antall sittende, som har konstant trengselsulempe fra det øyeblikket da alle sitteplasser er opptatt, og et stadig økende antall stående, som har større trengselsulempe for hver stasjon. Trengselsulempen for de stående består ifølge litteraturen av flere faktorer. Det har vært spekulert i at en del av ulempen rett og slett består i at den reisende som har betalt billett, føler at hun har en rett til sitteplass. Det kan nok være riktig når det gjelder regiontog. Men de fire faktorene som vanligvis nevnes er

- (1) Tap av det private rom. Det betyr at den sonen man vanligvis ønsker å ha mellom seg sjøl og andre mennesker, blir invadert. Bare det å sitte veldig nær en annen person kan føles som en invasjon av det private rom eller en innskrenkning av bevegelsesfriheten. Det kan særlig virke irriterende når folk tar opp større plass enn de skulle, gjerne fordi de har mye bagasje som de ikke holder på plass ved føttene.²
- (2) Uønsket berøring (eventuelt av seksuell karakter, dvs. seksuell trakassering),
- (3) Fysisk anstrengelse og psykisk stress. Det kan være fysisk anstrengende å stå, spesielt for eldre og gravide. Også for andre kan det være tungt og ubehagelig, og er det trangt nok, finns det ingen muligheter til å redusere plagene ved å endre

² Omvendt kan det at noen mer eller mindre demonstrativt setter bagasjen sin på nabosetet eller setter seg på en måte som gir lite plass til andre, også bekrefte at det faktisk kan føles ubehagelig å få andre tett innpå seg, også om man sitter.

stilling eller bevege seg litt rundt. Vissheten om dette gjør det til et psykisk stress å reise.

(4) Faren for lommetjueri.

En gjennomgang av litteraturen om disse faktorene er gitt i Qin (2012).

Ulempen øker på veg til byen, ikke bare fordi trengselen øker, men også fordi det er mer besværlig å stå jo lengre tid det går.

Om det ikke var for at de reisende skal av på forskjellige stasjoner, ville dette være en fullstendig beskrivelse av trengselens utvikling fra stasjon til stasjon, og hvordan de reisende fra ulike stasjoner påvirkes. Om derimot noen stående går av, blir trengselen mindre, naturligvis. Om noen sittende går av, oppstår det en viss sannsynlighet for at en som er stående skal kunne la seg forvandle til sittende. Sannsynligheten avhenger av hvor mange stående det finnes på det tidspunktet, og hvor mange sittende som går av.

I bunn og grunn er trengselen som den enkelte opplever, noe som utvikler seg fra lenke til lenke (stasjon til stasjon) i det nettverket som T-banesystemet utgjør. Den kan imidlertid verken modelleres som en vanlig lenkekostnad eller som en kostnad som knytter seg til reiserelasjonen.³ Det er ingen lenkekostnad, for det er ikke slik at alle som benytter lenka opplever samme kostnad. Og det er ingen reiserelasjonskostnad, for kostnaden påvirkes av hvor mange som reiser på de andre reiserelasjonene langs samme linje. Sjøøl om det ville være et stort framskritt, vil derfor ikke trengselen om bord kunne modelleres helt tilfredsstillende ved å føye til påstigningskostnader og lenkekostnader i våre vanlige transportmodeller.

2.1.1 Mange faktorer spiller sammen

Det er ingen tvil om at trengsel om bord er en ulempe som trafikantene er villig til å betale for å unngå, eller en del av den generelle kostnaden ved å reise, om man vil. Men trengselsulempen er sammensatt. Åpenbart er det et nært samspill mellom de objektive og håndgripelige trengselsvirkningene og de psykologiske reaksjonene på trengselen.

De mer objektive og håndgripelige trengselsvirkningene består blant annet i at trengselen kan forhindre deg fra å bevege deg fritt, og det kan bli vanskelig å finne noe å holde seg fast i når det skumper. Ofte vil passasjerene støte sammen. Folk som står tett sammen og ikke kan bevege seg, gir dessuten ønskeforhold for lommetjuer og folk som vil gjøre ubedte seksuelle tilnærmelser. Det psykologiske samspillet mellom folk i slike situasjoner, og mekanismene som hindrer at ubehaget slår over i rein aggresjon, er morsomt skildret i Aranguren og Tonnelat (2014).

Mohd Mahudin m.fl. (2012) har laget et rammeverk for analyse av de følelsesmessige reaksjonene hos de som opplever trengsel, som sammen med objektiv måling av trengselen og de mer håndfaste problemene som trengselen kan skape, kanskje kan brukes til å studere dette.

³ Den typiske lenkekostnaden er knyttet til tida det tar å bruke lenka. En typisk reiserelasjonskostnad er billetten, som under norske forhold ikke er en rein kilometertakst, og som derfor snarere må sees som en avgift for å få lov til å reise mellom startstedet og bestemmelsesstedet.

De fleste passasjerer på T-banen bruker nå mobiltelefonen på en eller annen måte. Det kan tenkes at man ikke ønsker at de som sitter ellers står i nærheten, kan studere hva man holder på med. Det omvendte er kanskje vanligere, nemlig at de som befinner seg i nærheten, blir forstyrret av høye mobilsamtaler eller musikk.

På toget vil man nå i stigende grad forvente at det finnes muligheter til å arbeide på PC. Trengsel kan gjøre dette vanskeligere (Gripsrud og Hjorthol 2012, Fickling m.fl. 2008). Alt i alt er det ingen tvil om at trengsel reduserer mulighetene til å konsentrere seg om det man ønsker å holde på med, enten det er lesing, skriving, tankevirksomhet for øvrig eller hvile.

Bortsett fra Hamdouch m.fl. (2011) har det vært mest oppmerksomhet rundt de psykiske ulempene ved trengsel, og mindre oppmerksomhet rundt at å stå på en skranglete trikk, buss eller bane, faktisk er *fysisk* anstrengende, spesielt for gravide, eldre og funksjonshemmede. Sjøl om folk har ulike grenser for hvor lenge de klarer det, er det gode grunner for at når reiselengden øker mot en halv time, er normen at alle passasjerer skal ha sitteplass.

2.2 Mål på trengsel om bord

Litteraturen opererer med to ulike mål på trengsel om bord. Det ene er *antall stående passasjerer per m² tilgjengelig areal for stående*. I europeisk sammenheng representerer 4 personer per m² den største tenkelige trengselen i lokal kollektivtrafikk, som T-bane, lokaltog og buss. I Kina, Japan og andre land i Asia er den høyeste tenkelige trengselen ("crush conditions") 6 personer per m². Til og med 8 personer per m² er brukt som øvre grense i noen kilder, men vil neppe være fysisk mulig under norske forhold (hensyn tatt til passasjerenes størrelse, påkledning og bagasje).

4 personer per m² er altså standard maksimaltetthet i Europa. Det er for eksempel det som er forutsatt når T-banevognene i Oslo antas å ha en ståplasskapasitet på 118 ståplasser. Bortsett fra at litt areal går med til førerhuset i første vogn, er det nemlig 30 kvadratmeter tilgjengelig for stående i en gjennomsnittsvogn, eller 10 kvadratmeter pr. dør. I tillegg er det 46 sitteplasser, altså samlet 164 passasjerplasser pr vogn. (Se http://en.wikipedia.org/wiki/OS_MX3000, <http://no.wikipedia.org/wiki/MX3000>).⁴

Når det gjelder tog, har Aarhaug m.fl. (2013) opplysninger om antall sitteplasser og antall kvadratmeter disponibelt for stående for ulike aktuelle togtyper i lokaltrafikken i Norge. Med disse opplysningene kan en bruke beleggstall til å beregne antall stående pr m² for hver av togtypene.

Trengselsmålet 'stående pr kvadratmeter' er uavhengig av forholdet mellom seter og ståplasser eller andre trekk ved konstruksjonen av vognene. Men det må naturligvis tolkes ut fra den konkrete situasjonen. Det er verre med et gitt trengselsnivå hvis reisa varer lenge, hvis det ikke finnes noe å holde seg i, hvis man har med bagasje osv. I langdistansetransport i Norge er det vanlig å ha et øvre nivå for trengsel på null ståplasser. Dvs. at det forutsettes at alle skal ha sitteplass, og det

⁴ 4 personer per m² innebærer altså nesten 40 stående passasjerer rundt hver dør, omtrent dobbelt så mange som det de fleste vil karakterisere som et stappfullt tog. Ruters gjentatte forsikringer om at det finnes kapasitet nok til at fortetting og nybygging langs linjene ikke vil være et problem, må sees i det lys. Men på den andre sida er det sannsynlig at vi kan venne oss til det, om det går gradvis.

selges ikke flere billetter enn det er seter til. Det gjelder all slags langdistanse-transport.

Som vist ovenfor og underbygd i Wardman og Whelan (2011), kan det forekomme trengsel sjøl når alle får sitte. Trengselsmålet antall stående per m² kan naturligvis ikke fange opp slike milde former for trengselsulemper, som knytter seg til at folk som ønsker det, ikke får sitte sammen, eller at det ikke alltid er mulig å unngå å sitte ved siden av folk som oppfører seg uvanlig eller er ubehagelige på andre måter.⁵

Det andre trengselsmålet som forekommer i litteraturen, er *lastfaktoren* (LF), definert som antall passasjerer per sete. Maksimal lastfaktor for T-banen i Oslo er etter det vi har sagt ovenfor lik $164/46 = 3,57$. Dette målet er anvendelig på alle slags ulemper som knytter seg til trengsel, fra de mildeste til de mest alvorlige, men kostnaden ved trengselsnivået målt på denne måten, må kalibreres etter hvordan vogna er innredet i hvert enkelt tilfelle. Det kan være få eller mange seter, stor eller liten ståplass. I første omgang representerer lastfaktoren ikke annet enn hvordan vogna er innredet. Det er først når man kan sette passasjertallet i en funksjonssammenheng med graden av trengselsulemper at lastfaktoren blir et mål på trengselen om bord.

I noen studier brukes både stående-tetthet og lastfaktor som mål på trengselen. Det er vanskelig å se behovet for det. Lastfaktoren er et helt generelt og uttømmende mål om man har kalibrert den til den enkelte typen av innredning. Dersom det er gjort, er det faktisk også mulig å tilordne en bestemt stående-tetthet til enhver lastfaktor, slik at man kan regne om fra det ene målet til det andre.⁶

2.3 Verdsettingsundersøkelser

Om tidsverdien faktisk er høyere for stående enn sittende, og hvordan den øker med trengselen, har vært studert i mange tidsverdiundersøkelser, slik som Lam m.fl. 1999, Douglas og Karpouzis 2006, Accent and HCG 2006, Maunsell og MacDonald 2007, MVA Consultancy 2008, Whelan og Crockett 2009, Koning og Haywood 2011, Hensher m.fl. 2011, Proud'homme m. 2012, Tirachini m.fl. 2013, OECD/ITF 2014, Björklund and Swärdh 2015 og Haywood og Konig (2015).

Wardman og Whelan (2011) og Li og Hensher (2011) sammenfatter erfaringene fra de første tjue årene med slike undersøkelser, gjennomfører en metaanalyse og fremmer forslag til beste praksis på området. Den førstnevnte vurderer flere studier, men den sistnevnte vurderer flere slags trengselskostnader.

De aller fleste slike verdsettingsstudier har vært hypotetiske spørreundersøkelser (stated preference, SP). Det er imidlertid også noen interessante undersøkelser som bygger på faktisk atferd (revealed preference, RP):

LT Marketing (1988) og Kroes m.fl. (2014) utleder trengselskostnaden av tendensen hos noen av passasjerene til å la en overfylt buss passere uten å gå ombord, og heller vente på den neste. Passasjerer som gjør det, bytter til seg mindre trengsel,

⁵ Den aller laveste graden av trengselsulempe må vel være ulempen ved å måtte holde veska i fanget i stedet for på setet ved siden av, eller ulempen ved å ikke kunne gjøre hva man vil med føttene. Det er åpenbart likevel mange på T-banen som legger stor vekt på å unngå disse ulempene.

⁶ Se for eksempel tabell 2.3 i Aarhaug m.fl. (2013).

og kanskje til og med en sitteplass, mot en litt lengre ventetid på holdeplassen. Tirachini m.fl. (2016) studerer et fenomen som kan observeres i Hongkong, nemlig at kollektivpassasjerene på stasjoner der banen om morgenen er helt full, kan velge å bli med en avgang som går i motsatt retning (!). Da får de sitteplass. De blir med helt til endeholdeplassen, og får på den måten sitteplass når banen går mot byen igjen.

Et virkemiddel som har vært utprøvd i Australia, er gratis kollektivtransport i timene før morgenrushet (Currie 2010, Chow 2013). Også dette er en situasjon som gjør det mulig å måle hvor mye trafikantene er villig til å ofre for å unngå trengsel. Som vi vil vise i kapittel 6, gir også T-banen i Oslo mulighet til ulike former for RP-undersøkelser.

Batarce m.fl. (2015) kombinerer SP og RP. Denne metoden har tidligere også vært brukt i andre sammenhenger i Chile, av Ortuzar og andre. Lam m.fl. (1999) kombinerer SP-undersøkelser av kostnaden ved trengsel om bord og trengselen på plattformen med estimering av hvordan kø ved av- og påstigning påvirker tida banen bruker på stasjonen. To stasjoner med passasjerer som i gjennomsnitt skal reise ulike langt er brukt til estimeringen og rekrutteringen av respondenter. Det viser seg at trengselskostnaden øker med reiselengda. Dette er en liten og enkel undersøkelse som lett kan gjentas.

I tillegg til Lam m.fl. (1999) tar også Douglas og Karpouzis (2006) og Hamdouch m.fl. (2011) hensyn til at ulempene per tidsenhet tiltar jo lengre trengselen pågår. Dette poenget er også reindyrket i Ramjerdi m.fl. (2010), der trengselsulempen (som hos Kraus) er redusert til et spørsmål om man har sitteplass eller ikke, og ulempen tiltar jo større del av reisen man må stå.

2.4 Trengselskostnadenes matematiske form

På bakgrunn av empiri og teoretiske overveielser er det fremmet ulike forslag til hvordan trengselskostnadene skulle formuleres matematisk. Noen bruker bare en todeling av tidsverdien, slik at sitteplass har én tidsverdi, mens ståplass har en annen. Litt mer avansert er det å anta at trengselskostnaden utgjør et tillegg til den ordinære tidsverdien og øker lineært med trengselen (Huang 2000). Både praktiske erfaringer og systematiske undersøkelser tyder imidlertid på at tidsverdien ikke er en lineær funksjon av trengselsnivået, men en tiltakende og konveks funksjon. Rouwendal og Verhoef (2004) foreslo en enkel eksponensialfunksjon, mens Tirachini m.fl. (2010) brukte en annengradsfunksjon. Den mest avanserte tilnærmingen finner vi hos de Palma m.fl. (2010, 2015), der tidsverdien øker bratt der hvor alle sitteplasser er opptatt, men likevel er uttrykt som en funksjon som er kontinuerlig og deriverbar overalt.

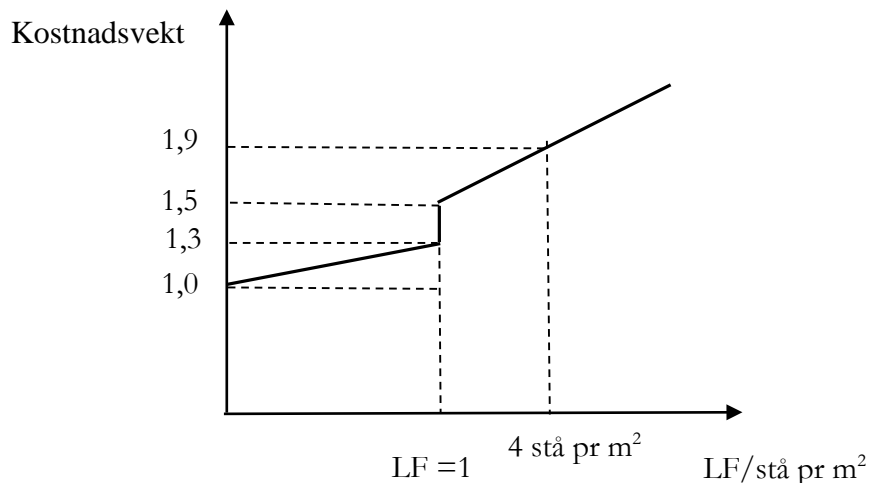
Dersom man kan se bort fra at de som har sitteplass opplever trengsel, kan trengselen måles som antall stående per kvadratmeter areal for stående. Hvis også de som sitter kan oppleve trengsel, kan man enten bruke to ulike funksjoner, en for sittende og en for stående, eller man kan bruke lastfaktoren (LF) til å sy dem sammen til en kombinert funksjon. Denne kombinerte funksjonen vil gjøre et hopp på det punktet hvor alle sitteplasser er opptatt og folk må begynne å stå.

Det er viktig å tenke gjennom om det man er interessert i, er en kurve som viser gjennomsnittstrengselen for en bestemt avgang eller avganger på et bestemt

tidspunkt, eller snarere trengselsnivået for et enkeltindivid som går om bord på eller befinner seg i en bestemt tilstand (sittende eller stående) på en slik avgang. Det førstnevnte egner seg for beregninger på gruppenivå, mens det sistnevnte er mer aktuelt for beregninger som har utgangspunkt i valgsituasjonen til et enkeltindivid.

La oss nå anta at ingen står hvis det finns en ledig sitteplass. Vi antar også at reisetidskostnadene pr time ikke øker med reisetida. Vi kan da framstille reisetidskostnadene pr time til et enkeltindivid som går om bord på et tog der det allerede er et visst antall andre passasjerer som én enkelt sammensydd funksjon av trengselsnivået. Trengselsnivået er målt ved lastfaktoren LF for de som sitter, og enten ved lastfaktoren eller antall stående pr kvadratmeter for de som står. (Lastfaktoren vil naturligvis være et tall mindre enn 1 om det er ledige sitteplasser og større enn 1 om det finnes stående.) Funksjonen vil være kontinuerlig unntatt i punktet der alle sitteplasser er opptatt, men ingen står (altså $LF = 1$).

En slik funksjon er avbildet i figur 1. Antall passasjerer som allerede er om bord, er målt på den horisontale aksen, enten som stående pr m^2 eller alternativt som lastfaktoren. Trengselskostnaden er vist på den vertikale aksen som den faktoren eller vekta som den vanlige tidsverdien må multipliseres med når det finnes trengsel. Som en forenkling er det antatt at funksjonen er lineær i området mellom



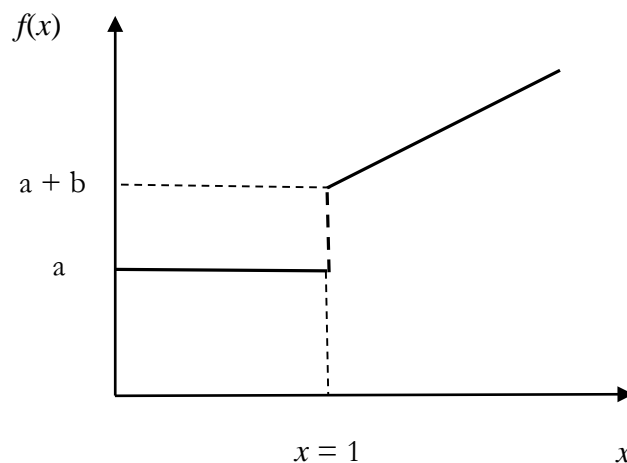
Figur 1 Det marginale individets trengselskostnad som funksjon av lastfaktoren LF eller stående pr kvadratmeter

0 og 1 og i området over 1. Tallene som er påført den vertikale aksen, er skjønsmessig satt, basert på vårt inntrykk fra de siste og formodentlig beste verdsetningsundersøkelsene.

Enhver funksjon av den typen som er avbildet i figuren og beskrevet matematisk i neste avsnitt, kan tilnærmes med en kontinuerlig funksjon ved å bruke oppskrifta i de Palma m.fl. (2015). Det er hensiktsmessig om trengselen skal innarbeides i en optimeringsmodell.

2.4.1 Matematisk formulering

Med utgangspunkt i en matematisk formulering av sammenhengene i figur 1 skal vi nå utlede og drøfte begrepene vi trenger til en økonomisk analyse av fenomenet trenghet om bord. Det dreier seg om begrepspar som marginalkostnad versus gjennomsnittskostnad, individuell eller opplevd kostnad versus samfunnsøkonomisk kostnad, og forventet kostnad i ulike usikre valgsituasjoner. Siden trenghetsulempen for de sittende neppe har noen særlig interesse med mindre det er såpass fullt at det også finnes stående, og siden vi antar at den ikke påvirkes av *hvor mange* stående som finns, skal vi forenkle figur 1 litt. Som vist i figur 2 antar vi derfor at trenghetskostnaden for sittende er konstant lik den uvektede tidsverdien, uavhengig av hvor mange sittende som finns. Som vist på figur 2 kaller vi den a . Vi kaller ulempen ved å stå når det ikke er trenghet blant de stående for b , og vi kaller lastfaktoren x .



Figur 2 Det marginale individets forenklede trenghetskostnad som funksjon av lastfaktoren x

I tråd med figuren kan vi definere funksjonen som gir trenghetskostnaden for en påstigende passasjer som funksjon av antall som allerede er om bord, slik:

$$(1) \quad f(x) = \begin{cases} a & \text{for } x \in [0, 1) \\ a + b + c(x-1) & \text{for } x \in [1, \rightarrow) \end{cases}$$

$$a, b, c > 0$$

Her er altså a ulempesnivået for de sittende, b tillegget i ulempen for de som må stå, og c er økningen i ulempen for de stående for hver enhets økning i lastfaktoren x . Funksjonen $f(\cdot)$ er diskontinuerlig for $x = 1$. Som nevnt er det mulig å definere en kontinuerlig funksjon som langt på veg ser ut på samme måte, se de Palma m.fl. (2010, 2015) og Qin (2012). Det blir litt for komplisert for oss nå. Funksjonen er imidlertid konstant for $x < 1$ og strengt tiltakende for $x \geq 1$.

Likning (1) gir trengselskostnaden pr time for det vi har kalt det marginale individet, altså sistemann som går om bord. Men det er samtidig også trengselskostnaden for alle og enhver om bord. Det er jo ikke slik at de som kom på tidlig, fortsatt opplever mindre trengsel enn alle andre, nå som det har kommet flere om bord! Ved den stasjonen der vi måler trengselen, har *alle* de sittende kostnaden a , og de stående, om de finns, har kostnaden i andre linje i klammeparentesen. La oss derfor rett og slett kalle $f(x)$ for den *individuelle* kostnaden, eller den opplevde individuelle kostnaden om vi tar høyde for at individet kan påføres kostnader som det ikke tar inn over seg.

Trengsel ombord er en ekstern kostnad, og på samme måte som i vegtrafikken består den eksterne kostnaden her av den marginale kostnaden som en ny passasjer påfører alle de andre, eller som hver og en påfører alle de andre. (De som kunne ha gått av, men ikke gjør det, påfører jo de gjenværende tilnærmet like store eksterne kostnader som de som går på.) Den *marginale eksterne kostnaden* er altså $xf'(x) = cx$.

Den *samfunnsøkonomiske* trengselskostnaden pr time ved at et individ velger å gå på en buss eller et tog der lastfaktoren allerede er $x \geq 1$, er

$$(2) \quad h(x) = f(x) + xf'(x) = a + b + c(x-1) + cx = a + b + c(2x-1)$$

Samfunnets kostnad ved en marginal økning i lastfaktoren x er større enn kostnaden til det marginale individet, og den øker raskere enn individets kostnad. ($f'(x) = c$, mens $h'(x) = 2c$).

Vi skal nå skifte perspektiv fra individuelle og marginale kostnader til ulempeskostnadene for alle passasjerene i vogna samlet. Vi kaller dem $F(x)$. $F(x)$ er summen av kostnaden for de som sitter og kostnaden for de som står. Antallet sittende, målt ved lastfaktoren, er 1, og antallet stående er $x - 1$. Derfor:

$$(3) \quad F(x) = ax + \{a + b + c(x-1)\}(x-1) = cx^2 + (2a + b - 2c)x - (a + b - c)$$

$F(x)$ kan brukes til å anslå størrelsen på trengselskostnaden i tilfeller der vi ikke antar at trafikantene tilpasser seg til kostnadsendringer, dvs. en samfunnsøkonomisk analyse med fast OD-matrise. $g(x) = F(x)/x$ er gjennomsnittlig trengselskostnad i vogna, om vi skulle få bruk for det.⁷

Til slutt skal vi se på situasjoner der det finns en viss mulighet, men ingen full sikkerhet, for at den påstigende trafikanten vil få sitteplass. La oss si at når toget ankommer, går det noen sittende passasjerer av, og deres plasser blir overtatt av stående. Likevel er det noen ledige plasser igjen. De fordeles tilfeldig blant de som stiger på. Det er flere som stiger på enn det finns ledige sitteplasser, slik at det er en sannsynlighet p for at en som stiger på, får sitte, og en sannsynlighet $1 - p$ for at hun må stå. Forventet trengselskostnad for et individ som stiger på, er da

⁷ $g(x)$ er brukt som trengselskostnad i en transportmodell for Sydney, ifølge Zorn m.fl. (2012).

$$(4) \quad E[f(x)] = pa + (1-p)[a+b+c(x-1)] = a + (1-p)[b+c(x-1)]$$

Helt i tråd med det sikre tilfellet blir den forventede *samfunnsøkonomiske* kostnaden ved denne påstigningen $E[h(x)] = (1-p)[b+c(2x-1)]$.

Legg merke til at i disse likningene er det sikkert eller gitt på forhånd hvor mange som «allerede» er om bord i vogna. Det er jo nemlig x . I formel (1) kan vi bruke den informasjonen til å bestemme om det er første eller andre linje i formelen som gjelder i det foreliggende tilfellet. I formel (4) stammer heller ikke usikkerheten fra hvor mange som er om bord når alle har gått av og på. Det sistnevnte er jo gitt som x . Vi antar også at vi kjenner hvor mange sittende som har gått av og hvor mange stående som har tatt plassen etter dem. Dette bestemmer p . Det eneste som er usikkert, er hvilke av de påstigende som får sitte og hvilke som må stå. Det er dette som gjør at det enkeltindividet vi betrakter, danner seg en oppfatning om forventede trenghetskostnader ved å ta dette toget – og bruker denne oppfatningen til å bestemme hvilken avgang hun vil ta.

I spesialtilfellet der $x \geq 1$ skal stige på et tog som er tomt før de påstigende kommer om bord, vil p være x^{-1} og $1-p$ vil være $(x-1)x^{-1}$.

2.5 To definisjoner

Komfortnivå: En enkel, men grov definisjon av komfortnivået ved kollektivreiser under trenghet er at det finnes to komfortnivåer, sittende og stående (Leurent og Liu 2009). For hver av disse to nivåene kan det om nødvendig defineres undernivåer, basert på lastfaktoren eller ståendetettheten. Med en slik oppdeling i undernivåer vil et komfortnivå kunne være gitt ved et punkt eller et lite intervall på kurven i Figur 1. Med andre ord: Det mest nøyaktige målet på komfortnivået er den vektete tidsverdien til en gjennomsnittspassasjer.

Komfortnivået er en egenskap ved tilbudet. Det vil derfor være det samme for gamle som for unge passasjerer, og for tynne og tykke, friske og sjuke. Det påvirkes heller ikke av hvor mye bagasje hver enkelt passasjer har å bære på og hanskes med, men kan være påvirket av hvor mye bagasje den gjennomsnittlige passasjeren har med seg.

I vogner med ledige sitteplasser vil det bare forekomme ett komfortnivå, siden alle passasjerer vil ha samme komfortnivå. I vogner med lastfaktor større enn 1 vil det forekomme nøyaktig to komfortnivåer. Alle sittende passasjerer har samme komfortnivå. Alle stående passasjerer har også samme komfortnivå, men det er høyere enn komfortnivået for de sittende.

Alle vogner og avganger behøver ikke ha samme komfortnivå. Foruten at det avhenger av belegget, naturligvis, vil det også avhenge av hva slags kollektivt transportmiddel det er tale om, av innredningen og utformingen av vognene, og av sørvistilbudet ombord.

Rutevalgmodell for kollektiv: Hensikten med denne rapporten er å være til nytte for å beregne trenghetskostnader, fortrinnsvis ved å integrere trenghet om bord i en

vanlig bytransportmodell, eller i det minste ved å gjennomføre komplementerende beregninger med forenklete forutsetninger, om det kan gjøres på en forsvarlig måte. Vi antar at transportmodellen der trengsel om bord skal innarbeides, lar seg dele opp i en del som beregner etterspørselen etter alternative reisemåter ved gitte kostnader, og en del som minimerer kostnaden ved den valgte reisemåten og den gitte etterspørselen. Denne siste delen er rutevalgsmodellen. De to delene henger sammen på den måten at resultatene fra rutevalgsmodellen må kjøres tilbake i etterspørselsmodellen i en iterativ prosess eller en annen systematisk framgangsmåte som har som sluttresultat at kostnadene som bestemmer etterspørselen er de minimale kostnadene som kommer ut av rutevalgsmodellen når etterspørselen fra etterspørselsmodellen legges inn.

Rutevalget i kollektivsystemet kan for eksempel bestå i hvilken linje man velger, hvilken stasjon man vil gå til, hvor man velger å ta overgang osv. I dynamiske modeller kan det også bestå av å velge avgangstid.

Vi antar altså at de reisende ikke bryr seg om andre egenskaper ved ruta de velger enn de som inngår i de definerte reisekostnadene. Ingen har noen spesiell preferanse for bestemte ruter på grunn av utsikten, omgivelsene, eller strøket man reiser gjennom. Heller ikke er det noen som foretrekker en bestemt type vogner, eller ser noen grunn til å skille mellom avganger og transportmåter på grunnlag av særlig behagelige seter, særlig enkel av- og påstigning eller noe annet. I den grad slike kvalitets- og komfortforskjeller mellom rutene og linjene antas å spille inn på valget, må dette valget inngå i etterspørselsmodellen. For eksempel kan det finnes en delmodell for valg mellom buss, trikk og T-bane i etterspørselsmodellen. Gjør det ikke det, innebærer det at det bare er de generaliserte reisekostnadene som bestemmer rutevalget, eller med andre ord at kollektivsystemet oppfattes som udiffereinsierte med hensyn til de formene for kvalitet og komfort som ikke er definert som en del av generaliserte kostnader.

Hva er det så som en tar hensyn til gjennom de generaliserte kostnadene i rutevalgsmodellen? Jo, det dreier seg om pris og reisetid (tilbringertid, tid om bord, skjult ventetid, ventetid ved bytter, byttestraff osv.), og bare det. Men tida om bord kan godt være vektet opp med en trengselsvekt. Den kan til og med være definert forskjellig for forskjellige kollektive transportmidler (buss, tog, trikk), eller vogntyper, dersom det finnes empirisk grunnlag for det. Det er derfor ikke gitt at trengsel om bord behøver å medføre at de ulike kollektive transportmidlene behøver å være valgalternativer i etterspørselsmodellen. Bare hvis det finnes kvalitetsforskjeller og komfortforskjeller som ikke er fanget opp i de generaliserte kostnadene, eller hvis det er åpenbart at ikke alle reisende opplever kvaliteten eller komforten på samme måte, er det helt nødvendig.⁸

På den andre sida kan vi ikke ha en eneste stor rutevalgsmodell for all kollektivtrafikk dersom de ulike kollektive transportmidlene inngår som valgalternativer i etterspørselsmodellen. I det tilfellet må vi ha en egen rutevalgsmodell for hvert transportmiddel, på samme måte som vi har en rutevalgsmodell for bil og en annen for kollektiv i de modellene vi har nå.

Rutevalgsmodellen for kollektiv tar altså etterspørselen på alle reiserelasjoner for gitt, og finner den kostnadsminimale reiseruta for hver av reiserelasjonene. I et

⁸ Kostnader er pr definisjon noe som kan oversettes til kroner og øre på en entydig måte. Men en ulempe behøver ikke dermed forårsake samme kostnad for alle.

system med eksterne virkninger fra den ene trafikanten til den andre, kan imidlertid dette ikke beregnes rute for rute. Kostnaden på hver del av ruta (hver lenke) bestemmes jo av hvor mange som har valgt denne lenka som en del av sin rute. I vegtrafikken gir det seg utslag i kø, i kollektivtrafikken som trenghet om bord. Vi kan bruke samme prinsipp til å finne kostnadsminimale ruter for alle reiserelasjoner i begge tilfeller. Dette prinsippet kalles *brugerlikevekt*. Det innebærer at ingen har grunn til å endre sitt rutevalg med mindre andre endrer sitt.

Brugerlikevekt vil ikke være samfunnsøkonomisk beste løsning uten avgifter eller reguleringer når det finnes kø eller trenghet. Med en optimalt utformet avgift kan imidlertid brugerlikevekta også bli den samfunnsøkonomisk beste løsningen. Derfor vil trenghet om bord gjøre det mer aktuelt å differensiere takstene i kollektivsystemet.

Med disse bemerkningene har vi forhåpentligvis gjort det klart hva en rutevalgsmodell for kollektiv er, hvilken stilling den har i transportmodellen, hvilket løsningsprinsipp som bør brukes for rutevalget når det finnes trenghet om bord, og hvordan løsningen kan gjøres samfunnsøkonomisk optimal.

Den videre behandlingen av trenghet om bord i neste kapittel handler nødvendigvis i stor grad om rutevalgsmodeller. Trengheten har ingen umiddelbar betydning for *etterspørselsdelen* av transportmodellen, men kan kreve en større omlegging av *rutevalgsdelen*. Indirekte vil det også virke tilbake på kostnadene i etterspørselsdelen. I mangel av en slik større omlegging kan skissemessige modeller med trenghet og brugerlikevekt på enkeltlinjer gi en viss vegledning om hvordan trengheten virker og kan påvirkes.

2.6 Prioriteringsregler

Langs en kollektivlinje med mer enn én stasjon for påstigning og én for avstigning, vil trengheten om bord variere med hvor mange som går på og av underveis. For å modellere dette presist trenger vi prioriteringsregler. Siden dette er generelle regler som trengs i alle sammenhenger der vi har et kollektivnettverk med trenghet, passer det å ta opp dette emnet før vi går løs på neste kapittel. Vi har faktisk allerede vært inne på det i avsnitt 2.4.

Det er stor enighet i litteraturen om å bruke følgende prioriteringsregler ved modelleringen:

1. De som har sitteplass når toget (eller bussen) kommer til en stasjon (eller en holdeplass) der de ikke skal av, vil alltid fortsette å sitte når toget går videre.
2. De som står har førsteretten framfor de som skal på til en ledig sitteplass videre. Om det ikke er mange nok som skal av til at alle stående kan sette seg, vil sitteplassene som blir ledige, bli fordelt tilfeldig blant de stående (se punkt 4.) De som slik får sitteplass undervegs, beholder da alltid denne plassen videre.
3. *Etter* fordelingen av sitteplasser til de som allerede er om bord, vil de som skal på måtte konkurrere om det som er av ledige sitteplasser. Hvis det ikke da er ledige sitteplasser, må de stå. Hvis det etter avstigningen er flere ledige plasser enn det er nye passasjerer som skal på, vil naturligvis alle få sitte videre. Men hvis det er flere som skal på enn det som er av ledige plasser når

påstigningen begynner, vil de ledige plassene bli fordelt etter ett av to prinsipper: For lokaltog og T-bane, som har mange dører, vil det ikke være urimelig å anta at alle som skal på, har *samme* sjanse til sitteplass. Dette prinsippet kan begrunnes med at de som ankommer plattformen, vil fordele seg tilfeldig langs perrongen, slik at det ikke spiller noen rolle hvem som ankom perrongen først. For busser med bare én inngang for påstigning, vil derimot prinsippet «først inn, først ut» (FIFO) gjelde, i alle fall hvis det finnes en viss køkultur. Dersom adgangen til perrongen er regulert ved en kø, slik som under store sportsbegivenheter, vil det også være FIFO som gjelder for den køen.

4. Ved neste stasjon eller holdeplass vil allokeringen av sitteplasser bli foretatt på ny, slik at de stående alltid vil ha en viss mulighet til å sette seg når toget ankommer en stasjon der noen sittende går av. (Siden det er tilfeldig om noen av de sittende som skal av, sitter i nærheten av deg som står, er det alltid en rein tilfeldig fordeling av sitteplasser til de stående.)

Ved valg av prinsipp for fordelingen av ledige sitteplasser blant de nye påstigende, må man altså gjøre et valg mellom to prinsipper. Ingen av dem er helt riktige. På stasjoner med mye trafikk vil de som ankommer plattformen sist, trolig stille litt bak de som sto der fra før. Det drar i retning av FIFO. Bussen eller toget stanser kanskje ikke akkurat der man ventet det. Det drar i retning av en tilfeldig fordeling. Naturligvis har vi heller ikke tatt hensyn til at noen kan reise seg for de eldre, eller at folk med barnevogner og sykler deltar i en konkurranse om litt andre plasser enn de andre.

Men gitt noen klare og enkle prinsipper og god statistikk over antall av- og påstigende på hver stasjon (holdeplass), er det mulig å beregne sannsynlighetsfordelingen for hvor stor del av tida om bord man må stå og hvor stor del av tida man får sitte, for alle som reiser på denne linja fra en stasjon der man kan gå på til en stasjon man går av. Vedlegg 3 i Aarhaug m.fl. (2013) redegjør for formelverket for slike beregninger. Både forventet trengselsjustert tidskostnad og variansen til den trengselsjusterte tidskostnaden kan beregnes. Men det er tre problemer.

Det første problemet er at hvis modellen ikke er dynamisk, vil vi aldri kunne finne ut hvem som kommer først til plattformen, slik at tilfeldig tildeling av eventuelle ledige sitteplasser ser ut til å være det eneste mulige prinsippet.

Det andre problemet er at vi ikke uten videre kan anta at trafikantene legger forventet kostnad til grunn for sine valg. Det er sannsynlig at de i større eller mindre grad er «risikoaverse», dvs. at de foretrekker et alternativ som med stor grad av sikkerhet unngår de verst mulige utfallene framfor det forventet beste alternativet. Men en slik tilpasning har vi lite empirisk kunnskap om, og enda mindre erfaring med å modellere.

Det tredje problemet er at om etterspørselen til alle de reisende på linja er en funksjon av den trengselsjusterte tidskostnaden, vil en beregning av den forventede trengselsjusterte tidskostnaden på hvert enkelt på/av-par, gitt etterspørselen til alle andre reisende, bare være et første steg til å finne den stokastiske brukerlikevekta. Vi kan kanskje anta at den *observerte* etterspørselen er et likevektspunkt, men for å finne likevekta i et framtidig hypotetisk tilfelle, trenger vi en fullstendig transportmodell og en avansert løsningsalgoritme.

3 Modeller med trenghet

Modellene vi tar opp her, tilhører to av de viktigste teoritradisjonene i transportøkonomien. Den første kan vi kalle frekvensbaserte modeller, og den andre ruteplanbaserte modeller. I begge tilfeller begynner vi med teoretiske modeller av kollektivtransporten på en enkelt strekning. Frekvensbaserte modeller for enkeltlinjer er altså behandlet i avsnitt 3.1, og ruteplanbaserte modeller for enkeltlinjer i avsnitt 3.2. Rutevalgmodeller som inngår, eller kan inngå, i større og mer realistiske transportmodeller, er behandlet i avsnitt 3.3.

3.1 Frekvensbaserte modeller for enkeltlinjer

De frekvensbaserte modellene tar utgangspunkt i en time der etterspørselen er konstant. Kollektivtilbudet består av avganger med samme materiell og med like stor tid i mellom hele tida, altså samme frekvens. Oppgaven er typisk å velge frekvens og kapasitet pr. avgang for å minimere den samfunnsøkonomiske kostnaden, som er summen av passasjerenes kostnader og operatørens kostnader.⁹

I tillegg til billettprisen består *passasjerenes* kostnader av gangtid til holdeplassen (den er avhengig av avstanden mellom holdeplassene), skjult ventetid ved reises begynnelse (som avhenger av frekvensen), faktisk ventetid, kostnaden ved reisetida om bord (som vil kunne påvirkes av antall avstigninger og påstigninger på holdeplasser underveis), og tid og ulemper ved eventuelle bytter.

Operatørens *kilometeravhengige* kostnader kan være en funksjon av kapasiteten på kjøretøyene, mens de *tidsavhengige* kostnadene avhenger av hvor mange kjøretøyer som trengs. Dette igjen avhenger av frekvensen og rundturtda på ruta. Som regel vil de tidsavhengige kostnadene også avhenge av kapasiteten, dvs. av størrelsen på kjøretøyene.

De klassiske modellene på området er Mohring (1972, 1976) og Jan Owen Jansson (1980, 1984). Det hører med til allmenndannelsen for enhver transportøkonom å kjenne disse modellene. Det finnes ikke trenghet om bord i noen av dem, men de danner et godt grunnlag for å studere trenghet i seinere modeller.

Løsningen i Mohrings og Janssons modeller er i begge tilfeller en kvadratrotlov. Det vil si at hvis etterspørselen doubles, skal kapasiteten og frekvensen hver økes med rota av to. På den måten blir den samlede transportkapasiteten doblet.¹⁰ Dersom vi har flere virkemidler, vil denne typen modeller typisk gi at innsatsen

⁹ Etterspørselen kan godt variere over strekningen, men så lenge vi betrakter et gitt transporttilbud, er etterspørselen på enhver del av strekningen den samme i hele den timen vi betrakter. Den delen av strekningen der bussen er på det fulleste, kalles dimensjonerende snitt. Dersom vi ikke regner med at overbelegg er mulig, er det naturligvis belegget over dimensjonerende snitt som bestemmer kapasiteten på kjøretøyene.

¹⁰ Hvis det tar lang tid å få folk av og på transportmiddelet, vil løsningen trekke i retning vekk fra en kvadratrotlov og over mot en proporsjonal økning av frekvensen og etterspørselen.

skal økes prosentvis like mye i alle dimensjoner. Om for eksempel antall linjer eller flatedekningen også er et virkemiddel, vil vi få en tredjerotslov, se Minken (2009) eller Chang og Schonfeld (1991).

Trengsel om bord kan innarbeides i denne typen modeller ved å gjøre tidsverdien om bord til en funksjon av belegget. Det gjøres i Jara-Diaz og Gschwender (2003), som også har en nyttig gjennomgang av litteraturen om frekvensbaserte mikroøkonomiske modeller. En modell som tas opp i litteraturgjennomgangen deres, er modellen til Kraus (1991), som vi nevnte innledningsvis. Den består framleis bare av en enkelt linje, men i stedet for å anta gjennomsnittlige turlengder og en etterspørsel som fordeler seg jamt over hele linja, som i de klassiske artiklene, antar Kraus en etterspørsel av typen «many-to-one», dvs. at passasjerene stiger på undervegs langs ruta, men alle går av på samme endestasjon. (Om ettermiddagen blir det «one-to-many», som han også behandler.) Dermed får vi for første gang en struktur der de som går på lengst ute, får sitte, samtidig som de forhindrer en annen gruppe av reisende, de som går på nærmere byen, fra å sitte. (Returen om ettermiddagen har en annen og mer komplisert struktur, der setene først fordeles tilfeldig mellom alle reisende, mens deretter flere og flere av de stående får satt seg, etter hvert som bussen kommer lengre ut av byen.)¹¹

I forhold til de første artiklene i denne teoritradisjonen har den seinere utviklingen medført at mange nye effekter er innarbeidet i modellene, som på- og avstigningstid som avhenger av etterspørselen, kjøretid som avhenger av køforholdene, operatørkostnader som avhenger av kjøretøykapasiteten, tilbringertid som avhenger av stoppestedstettheten, og ikke minst tidsverdier som avhenger av trengselen. Trengselen i den forenklete eller gjennomsnittlige modellen til Jara-Diaz og Gschwender gjør blant annet at man ikke alltid skal bruke det minste kjøretøyet som kan avvikle trafikken. Om man skal det eller ikke, avhenger av hvor raskt operatørkostnadene stiger i forhold til den trengselsvektede tidsverdien til passasjerene når etterspørselen, og dermed trengselen om bord, øker. Men dette teoretiske resultatet er ikke til særlig hjelp om man ikke har en svært presis definisjon av kjøretøykapasitet, operatørkostnader og trengselsfaktoren i tidsverdien.¹² Og sjøl da vil denne modellen ikke kunne ta hensyn til at trengselen endrer seg langs med linja og at kostnaden for de som sitter, er lavere enn for de som står.

Vegen videre herfra går i to retninger. Den første bygger videre på de analytiske modellene, som da blir brukt både til å velge mellom bussbaserte og skinnebaserte kollektivsystemer, velge optimal kjøretøykapasitet, frekvens og billettpris, osv. Det mest avanserte i denne retningen er Moccia og Laporte (2016), som bygger på Tirachini m.fl. (2010).

Den andre retningen er å bygge modeller for rutevalg under ulike former for trengsel i et større kollektivnettverk. Det kan gjøres på mange forskjellige måter. Man kan f.eks. fortsette å se bort fra distinksjonen mellom stående og sittende. Da kan en legge en konveks, tiltakende ulempeskostnad på alle lenker i kollektivnettverket, på samme måte som en kan legge køkostnader på lenkene i bilnettverket. I praksis betyr det å bruke gjennomsnittskostnaden $g(x) = F(x)/x$ (se

¹¹ Vi skjønner at det trenges prioriteringsregler, som i avsnitt 2.6, for å behandle disse situasjonene analytisk, enda så skissemessig modellen er. I virkeligheten er det snakk om ganske kompliserte sosiale situasjoner.

¹² Jfr. Figur 1.

teksten under formel (3) i avsnitt 2.4.1) i stedet for den individuelle kostnaden $f(x)$ fra formel (1). Løsningsalgoritmen blir mer komplisert enn i tilfellet med rutevalg uten kø, siden vi må kreve brukerlikevekt, men det vil finnes nok av programvare som løser det problemet.

Fra dette punktet kan en gå videre og lage mer detaljerte under-nettverk for hver av de nodene i nettverket som skal representere stasjoner. For eksempel kan en ha tilbringerlenker for gåing eller andre transportmidler til og fra stasjonen, ventelener som avhenger av trafikken på stasjonen, og egne på- og avstigningslenker til hver av linjene som stopper på denne stasjonen, også de avhengig av trafikken. Dette blei systematisert i slutten av 80-åra, f.eks. i Nguyen og Pallottino (1988), Spiess og Florian (1989) og Wu m.fl. (1994). De sentrale begrepene i denne teorien er begrepet strategi og begrepet 'hyperpath'. En 'hyperpath' er nettopp et slikt mer detaljert nettverk ved nodene som vi har nevnt. *Strategien* som legges til grunn for rutevalget for kollektiv, for eksempel i programvare som EMME, kan bestå i at man først velger ut et sett av attraktive linjer, og deretter velger den første av disse linjene som ankommer stasjonen.

Det som nå mangler, er bare skillet mellom stående og sittende. Det kan innarbeides som i Schmöcker m.fl. (2011). Man innfører da to sett med noder og lenker for hver tidligere kollektivlenke, ett for hver av de to tilstandene sitting og ståing. Det er da vi får full bruk for prioriteringsreglene som vi behandlet i avsnitt 2.6. En som satt på forrige lenke, har fortrinnsrett til å sitte på neste lenke, de som sto, har fortrinnsrett til plassene som blir ledige når noen går av, og de som skal på, har alle samme sannsynlighet til å få sitteplass. Om man kommer som reisende inn til noden, og ønsker å bytte linje, vil frekvensen på de ulike linjene gi opphav til ventetider ved byttet. Rutevalget i det utvidede nettverket tar hensyn til byttekostnaden og sannsynlighetene for å få sitte, og sikter mot å minimere forventede kostnader. I optimum, dvs. brukerlikevekt, har alle ruter fra en startnode til en destinasjonsnode i nettverket samme kostnad, som er mindre enn alle ubrukte ruter. Ingen vil da ønske å endre rute om ikke andre gjør det.

Modellen til Schmöcker m.fl. krever naturligvis utbygging av den ordinære transportmodellen og omfattende nykoding. Det kreves også mer avanserte løsningsalgoritmer. Vi har ikke undersøkt om det finnes kommersiell programvare til dette, hvor mye arbeid det innebærer og hvor effektive løsningene er når nettverket blir stort. Arbeidet består uansett av mer enn bare å lage en rutevalgsmodell med trenghet, den skal også integreres på en meningsfull måte i modellsystemet som helhet.

Tirachini m.fl. (2014) er en modell med et enkelt nettverk (bare en linje) men usedvanlig mange ulike avveiningsmuligheter ellers. Skillet mellom sittende og stående er avgjørende i modellen, men det er også valget av reisemåte (buss eller personbil). Dermed får vi en avveining mellom kø i gata og trenghet inne i bussen. Dessuten tar modellen opp innredningen av bussene, dvs. antall seter i forhold til ståplass. Virkemidlene omfatter prising på bussen og på vegen, frekvens, bussstørrelse og innredning. Dersom det ikke finnes skranker for bruken av virkemidlene, drar det i retning av å prioritere sitteplasser framfor ståareal.

3.2 Ruteplanbaserte modeller for enkeltlinjer

De ruteplanbaserte modellene har utspring i en helt annen måte å modellere kø og trengsel på, nemlig den såkalte flaskehalsmodellen til Vickrey (1969). Den tar for seg et sett av identisk like pendlere som alle skal på jobb i byen på samme klokkeslett. Det er en ulempe å komme for tidlig, og en muligens større ulempe å komme for seint. På vegen må de gjennom en flaskehals med begrenset kapasitet. Spørsmålet er når de skal starte. I brukerlikevekt vil de fordele seg slik at alle får samme kostnad, men for hver av dem vil denne kostnaden være en forskjellig miks av ulempeskostnader i jobben og køkostnader foran flaskehalsen. Anvendt på kollektivtrafikk er flaskehalsen en kollektivlinje med gitt ruteplan og gitt kapasitet. I likevekt vil den samlede kostnaden for den enkelte være den samme uansett hvilken avgang han velger, men den vil være oppdelt forskjellig mellom trengselskostnader om bord og straffen ved å komme for tidlig eller for seint.

En tidlig flaskehalsmodell med trengsel om bord er Huang (2000). Modellen inneholder også to grupper av pendlere med ulike preferanser, og bil som reisemåte i tillegg til kollektivtransport. Huang m.fl. (2005) er en mer elegant flaskehalsmodell, med blant annet eksplisitte kapasitetsgrenser på avgangene. Trengselen er modellert som vanlig er nå, som en faktor som avhenger av belegget, og som blåser opp tidsverdien. Modellen egner seg til å studere slike ting som optimal frekvens for gitt kapasitet pr. avgang, virkningen av rushtidsprising i kollektivsystemet osv. Det elegante består i at brukerlikevekta er formulert som et matematisk programmeringsproblem som er nesten identisk med problemet som gir brukerlikevekt i et købelastet vegsystem (Beckmann m.fl. 1956). Ikke bare det: Den felles generaliserte kostnaden for alle avganger som har trafikk, kan finnes av én eneste likning.

Tian m.fl. (2007) generaliserer modellen i Huang m.fl. (2005) til et nettverk med mange startpunkter og ett eneste slutt punkt. Slutt punktet er byen. Startpunktene er stasjoner på en enkelt linje, og ved hver stasjon finnes en gitt mengde pendlere som skal til byen på jobb. Jobben begynner på samme tidspunkt for alle. Pendlerne antas å ha samme enhetspriser for de ulike elementene av generaliserte kostnader. De velger hvilken avgang de vil ta. I likevekt vil alle avganger som brukes av pendlerne fra en bestemt stasjon, ha samme generaliserte kostnader, og alle avganger de ikke bruker, vil gi høyere kostnader.

Problemet i Tian m.fl. kan løses som et konvekst minimeringsproblem med én bibetingelse og ikke-negative variable (et Kuhn-Tucker-problem). Løsningen viser seg å ha egenskaper til felles med brukerlikevekt på veg, slik som at alle avganger i bruk fra en stasjon gir samme kostnad, og alle avganger som ikke er i bruk gir høyere kostnader. Men ut over det har løsningen også noen andre, interessante egenskaper. For eksempel vil rushtida være lengre jo lengre ut langs linja vi kommer, og i en viss del av rushtida vil alle avganger fra en stasjon ha like mange som går på. Dette er empirisk prøvbart. Modellen er også utvidet til tilfellet med sittende og stående. Naturligvis vil alle sitte så lenge det finns plass, mens de som kommer om bord nærmere byen, må stå. Ellers gjelder de samme konklusjonene når der finnes to komfortnivåer som da det bare fantes ett, samtidig som det kompliserer modellen mye å ta hensyn til dette skillet.

Tendensen i flaskehalsmodellene er at trengselen fører til en spredning av rushtida. Andre tilpasninger, som hjemmekontor, eller for den saks skyld overføring til

bil og sykkel, vil nok også gjøre seg gjeldende i praksis og modifisere tendensen til rushtidsspredning i løsningen. Men hvis vi er interessert i rushtidsspredning, for eksempel som en virkning vi kan manipulere for å utsette store kapasitetsøkende tiltak i kollektivsystemet, er det nok en flaskehalsmodell vi trenger. I tillegg til data vi har, trenger vi da særlig data om kostnaden ved å forskyve arbeidstidas begynnelse og slutt fra slik det er nå. Trolig er det data som er ganske forskjellige på de ulike linjene. De kan også tenkes å endre seg relativt fort med tida.

De Palma m.fl. (2010) handler hovedsakelig om å bestemme optimale avstander mellom stasjonene i en monosentrisk by som er lik i alle retninger. Det er altså en såkalt «urban economics»-modell.¹³, men tilfellet med trengsel om bord behandles også. I motsetning til de fleste forgjengerne skilles det dessuten mellom sittende og stående.

Forfatterne framholder at til analyser av lokalisering og prising trengs det enkle, analytiske modeller. Det er ikke minst tilfelle om man i tillegg til stasjonsplassering og billettprising skal ta hensyn til trengsel om bord. Så blir det da heller ingen analytisk løsning på modellen i det tilfellet. Uansett er det et godt tips å bruke «urban economics» til å formulere problemstillinger der avstanden fra bysentrum har en betydning og der ulike virkninger og virkemidler skal sees i sammenheng.

I artikkelen er det formulert en ikke-lineær, ikke-monoton trengselskostnadsfunksjon som brukes til de numeriske analysene. Den likner på vår Figur 1, men er rundere i kanten. Det er denne funksjonen som er bearbeidet i de Palma m.fl. (2015) til en funksjon som er deriverbar over alt, også i punktet der alle sitteplasser er opptatt.

De Palma m.fl. (2015) bruker denne funksjonen i analysen av optimale ruteplaner og billettpriser optimalt antall seter i noen ganske små nettverk, hovedsakelig av typen med ei linje med to eller ganske få stasjoner, der alle skal reise til samme destinasjon (one-to-one og many-to-one). Ved hjelp av denne funksjonen får de fram forskjellen mellom å stå og sitte, som ofte blir ignorert i andre modeller, som vi har sett. De lar også rutevalget være stokastisk. Den langsiktige ambisjonen til forfatterne er å utvikle en stokastisk rutevalgmodell for ruteplanbaserte modeller med et større nettverk. Det mest kompliserte nettverket de studerer nå, er et nettverk som er økt med en tidsdimensjon, slik at valg av avgang blir mulig. Dette nettverket er hentet fra Hamdouch m.fl. (2011).

Hamdouch m.fl. (2011) er trolig det hittil mest avanserte forsøket innafor den ruteplanbaserte tradisjonen på å formulere en fullstendig rutevalgmodell med skille mellom sitteplass og ståplass og med trengsel om bord. Den bygger på å øke nettverket med en tidsdimensjon og innføre eksplisitte prioriteringsregler.¹⁴ Passasjerene velger en strategi gjennom nettverket med sikte på å minimere forventede kostnader, og (tilnærmet) brukerlikevekt oppnås gjennom å bruke metoden med suksessive gjennomsnitt. Framgangsmåten er testet på et svært enkelt nettverk (en enkelt linje) og ser ut til å kreve ganske mange iterasjoner for å

¹³ Sirkelrunde byer på flate sletter uten spesielle kjennetegn, kan det også kalles. Den opprinnelige «urban economics»-modellen er Alonso (1964). Den klassiske læreboka i denne typen av modeller er Fujita (1989).

¹⁴ Etter mitt syn er en av prioriteringsreglene mindre velvalgt. Det gjelder regelen som sier at passasjerer som har reist lenge, har større sannsynlighet for å få en sitteplass.

konvergere. Deretter er den testet på et svært enkelt nettverk med flere linjer, og framleis tar det svært mange iterasjoner å oppnå en god tilnærming. Så her trengs parallellkoplede datamaskiner i litt større tilfeller!

Artikkelen har en god gjennomgang av den historiske utviklingen fram mot modeller av denne typen. Det er imidlertid tydelig at man ennå ikke har funnet metoder for å holde omfanget av programmering og regnetida i sjakk.

3.2.1 Andre versjon av modellverktøy Trenklin (Trenklin 2)

Jernbaneverkets modell Trenklin 2 mangler offentlig tilgjengelig dokumentasjon. Vår omtale her bygger på vurderingen av modellen i Flügel og Hulleberg (2016). Trenklin er en elastisitetsmodell for beregning av etterspørselen etter togreiser mellom par av stasjoner langs en jernbanelinje eller i et jernbanenett. For hver reiserelasjon er døgnetterspørselen i utgangspunktet gitt fra trafikkteillinger. Videre er fordelingen av ønsket ankomsttidspunkt også gitt på forhånd for hver kombinasjon av reisehensikt og reiserelasjon. Med bakgrunn i disse ønskene velger trafikantene den togavgangen som minimerer generaliserte reisekostnader, hvilket blant annet betyr å gjøre avviket mellom togets ankomsttid ifølge rutetabell og ønsket ankomsttidspunkt minst mulig. Hvis det er trengsel om bord, vil de samtidig også søke å velge en avgang der trengselsnivået er lavest mulig. Trengselen fører imidlertid til at trafikantene ikke kan velge sin avgang uten å ta hensyn til hva de andre har valgt. En likevekt oppstår når ingen angrer på sitt valg, gitt at ingen av de andre endrer på sitt valg.

Trenklin 2 er altså i prinsipp en ruteplanbasert modell av samme type som er nevnt over. Den er spesielt beregnet på å gjøre samfunnsøkonomiske analyser av ruteplanendringer, og tiltak som endrer trengselsforholdene. Men den egner seg ikke dersom det tiltaket gir betydelige endringer i transportmiddelvalg eller destinasjoner. Den har dessuten foreløpig konseptuelle og tekniske mangler, blant annet når det gjelder størrelsene på tidsverdiene og framgangsmåten for å finne brukerlikevekt. Uavhengig av disse svakhetene (som kan rettes opp i seinere versjoner) vil den fininddelte ruteplanbaserte tilnærmingen i modellen gjøre det vanskelig eller umulig å integrere den i modellene som tradisjonelt brukes i transportplanleggingen i Norge, som NTM6 og RTM.

3.3 Alternative former for modellering av trengsel

I avsnitt 1.1 regnet vi opp flere former for trengsel i kollektivsystemet: trengsel om bord, trengsel ved av- og påstigning, oversitting og store og små forsinkelser. I tillegg har vi former for trengsel som spiller mindre rolle under norske forhold, som trengsel på plattformer og holdeplasser. Douglas og Karpouzis (2005) og Lam m.fl. (1999) er eksempler på studier av disse formene for trengsel.

Det er typisk for den litt eldre litteraturen (inntil for ti år sida) at man betrakter kapasiteten pr. avgang som gitt, og dermed ser bort fra trengsel om bord. Når en full buss kommer til holdeplasser hvor det venter passasjerer, vil de ventende da enten frivillig foretrekke å vente på neste avgang, eller bli tvunget til å gjøre det, i og med at den fulle bussen ikke stopper. Disse to formene – frivillig venting på neste avgang eller tvungen oversitting – er kanskje enklere å modellere enn trengsel ombord, og kan fungere som tilnærming til å modellere trengselen på en

mer gradvis skala. I ruteplanbaserte modeller er det ofte muligheten til å vente på en seinere avgang som står sentralt. I frekvensbaserte modeller med kapasitets-skranker vil tvungen oversitting ofte være en mulig tilpasning.

En enkel modell av tvungen eller frivillig oversitting kan rett og slett bestå i å føye til en konstant i generaliserte reisekostnader, på samme måte som en byttestraff eller som skjult ventetid ved starten av reisa. Størrelsen på konstanten vil avhenge av hvor lenge det er til neste avgang og hvor sannsynlig det er at den avgangen man primært foretrekker, er full.

En annen begrunnelse for en slik konstant ved begynnelsen av reisa kan være at det er en relativt liten sannsynlighet for å få sitteplass. Det behøver altså ikke være at man ikke kommer med første avgang, det kan også være at man kommer med, men må regne med å stå.

Virkelig venting på neste avgang i kollektivtransporten er vel særlig en aktuell tilpasning når kollektivtilbudet er bussbasert, og særlig dersom bussene har en tendens til å klumpe seg, slik at den første i en rekke av busser er full, mens de neste har bedre plass. Det er naturligvis også vanligere når frekvensen på avgangene er høy. I Norge er verken tvungen eller frivillig oversitting vanlig, og heller ikke studert, oss bekjent. Det vil kunne endre seg om vi får en kraftig overgang fra bil til kollektiv, dersom frekvensene i kollektivtransporten enten er for lave eller for høye.

I tillegg til tvungen eller frivillig oversitting er det kø ved av- og påstigning som oftest modelleres i de litt eldre modellene. Lengre av- og påstigningstid vil som regel opptre sammen med trengsel om bord, siden det tar lengre tid for de som skal av å komme seg til utgangsdøra, og lengre tid for de som skal på å komme om bord. Dette gir lengre reisetider for de som er om bord. Som for oversitting er det også i busstilfellet at av- og påstigningen er et stort problem. Størst er problemet der all påstigning skjer på første dør og det er sjåføren som tar imot betalingen og leverer ut billetten. Men slike kostnader er dessuten svært avhengige av utformingen av kjøretøyet og måten passasjerene kan betale på. Mye er gjort for å minimere slike kostnader i Norge i forhold til det som er vanlig andre steder.

Det er relativt enkelt å estimere hvor mye trengselen ved av- og påstigning betyr for oppholdstida på holdeplassen eller stasjonen. Når det gjelder data, kan man sikkert i mangel av noe bedre komme langt med et videokamera med klokke. Men om det skal gjøres helt nøyaktig, må man ikke bare telle hvor mange som går av og på på den mest belastede døra, man må også ta med antall passasjerer inne i vogna som en variabel. Grunnen er at trengsel ved døra gjør det vanskeligere for de som skal av å komme fram til døra, og for de som skal på å få de som er innafør til å gi plass. Estimeringen må naturligvis gjøres på nytt for hver kjøretøytype som benyttes. Et eksempel på estimering av oppholdstider på holdeplass er Tirachini (2013).

Oversitting og kø ved av- og påstigning medfører kostnader ikke bare for passasjerene, men også for kollektivselskapet. Når rundturtida øker på grunn av lengre stopp på holdeplassene, øker også behovet for kjøretøyer ved en gitt frekvens, og dermed også mannskapsbehovet, mens oversitting og forsinkelser på sikt medfører redusert etterspørsel, og dermed tap av inntekter for selskapet.

Herbon og Hadas (2015) betrakter etterspørselen og reisetida som usikre variable, og formulerer en modell for kollektivselskapets valg av frekvens og kjøretøystørrelse, gitt denne usikkerheten. Den optimale løsningen innebærer å avveie trafikantenes kostnader ved oversitting eller venting på neste avgang på den ene sida, og selskapets egne kostnader ved å bruke for stor kapasitet på den andre sida. Mønsteret for denne modellen er det såkalte avisguttproblemet, som handler om hvor mange aviser en gateselger skal bestille.

Vi har sett at både faren for oversitting og faren for ikke å få sitteplass kan modelleres som konstanter knyttet til påstigning og bytter, og at kø ved av- og påstigning kan legges inn i tidskostnaden, både for passasjerer og selskap. (I den grad man ikke gjør det i den virkelige ruteplanen, vil det ofte dukke opp igjen som forsinkelser og forstyrrelser, som er minst like dyrt.) Hvis vi ser bort fra forskjellen mellom sittende og stående, og bare ser på gjennomsnittskostnaden i vogna, kan vi i prinsipp også håndtere trengselen om bord i gjennomsnitt som et kunstig påslag på reisetida. Det påslaget gjelder da naturligvis ikke for kollektivselskapet, bare for de reisende.

Det er imidlertid et lite problem med denne enkle tilnærmingen til oversitting og ulempen ved å ikke få sitte. Det gjelder av- og påstigning (og trengsel på plattform, om det skal modelleres). Som nevnt vil de som ikke skal av og på, kunne påføre de som skal av og på trengselskostnader dersom det er vanskelig å komme fram til døra for de som skal av, eller inn i vogna for de som skal på. Det er i prinsipp et tilfelle av at reisende på andre lenker, påvirker lenkekostnaden på av- og påstigningslenka. I alle de volume-delayfunksjonene vi er vant med fra vegsida, er tida på lenka bare en funksjon av volumet på denne ene lenka. Her har vi et tilfelle hvor det ikke gjelder. Den enkle løsningen er å anta at volumet om bord er gitt når påstigningstida skal beregnes. Men i prinsipp har vi samme problem som hvis vi vil modellere vegkryss nøyaktig: Trafikkstrømmer som ikke bruker samme lenke, forsinkes hverandre. Det finnes teori som løser problemet, f.eks. Aashtiani og Magnanti (1981). Med det er vel ikke verdt bryet i vårt tilfelle.

*

Det finns trengselskostnader med betydelige konsekvenser mange andre steder også, for eksempel i forbindelse med ombordstigning og bagasjehåndtering i luftfarten.

3.4 Trengsel i praktisk anvendelige nettverksmodeller

3.4.1 Zorn m.fl. (2012)

Zorn m.fl. (2012) rapporterer et forsøk på å inkludere trengsel i kollektivsystemet som helhet i en vanlig bytransportmodell, nemlig en aktivitetsbasert modell for San Fransisco. De mener å observere at innbyggerne i San Fransisco ikke lar seg avskrekke av trengsel om bord, men at trengselen tar seg uttrykk på andre måter – delvis i form av lengde på- og avstigningstid, og delvis i form av busser som er så fulle at sjåføren ikke vil slippe på nye passasjerer. Som en tilnærming til disse tilstandene innfører de en kapasitetsbegrensning i rutevalgsmodellen for kollektiv, slik at busser som har flere om bord enn det som kapasiteten tilsier, sjøl etter at de som skal av har gått av, ikke er åpne for valg av rute fra denne holdeplassen på

denne tida av dagen.¹⁵ Så kjøres rutevalgmodellen med og uten at disse valgmulighetene er fjernet, og et gjennomsnitt av trafikkstrømmene i de to kjøringene beregnes. For hver av disse rutevalgskjøringene vil også av- og påstigningstid på holdeplassene beregnes på nytt. Brukerkostnadene i gjennomsnittet av de to kjøringene brukes til slutt til å beregne kollektiveterspørselen på nytt.

Det kreves naturligvis programmering for å få til en automatisk oppdatering av tilgjengeligheten av holdeplassene og av- og påstigningstida for hver kjøring. Dessuten er det en svakhet at trengselen om bord ikke er eksplisitt med i modellen. Den reflekteres på en svært indirekte måte i de økte kostnadene ved å miste tilgjengeligheten til visse holdeplasser der bussen er full. Det er nok mulig å kalibrere modellen slik at den gjenspeiler observerte trafikkstrømmer, men den vil egne seg mindre godt til samfunnsøkonomiske analyser dersom trengsel om bord på hele reisa, ikke bare ved av- og påstigning, er et problem.

Den motsatte ytterligheten er den som brukes i de nyeste samfunnsøkonomiske beregningene i Jernbaneverket, der trengselen om bord beregnes, men uten at det har konsekvenser for rutevalget eller etterspørselen. Konsekvensutredningen av Oslo-navet er et eksempel. I kapittel 4 tar vi utgangspunkt i slike beregninger og prøver å forbedre dem et hakk ved en enkel elastisitetsberegning av konsekvensene for etterspørselen. (Konsekvensene for rutevalget får vi ikke gjort noe med på den måten). Et viktig punkt som vi får med oss ved slike beregninger, er uansett at etterspørselen i nullalternativet vil være lavere enn det som er modellberegnet, dersom trengselen om bord utvikler seg fra nåsituasjonen til tiltaket som skal nytteberegnes kan være på plass.

3.4.2 Leurent og Liu (2009)

En rutevalgmodell som er testet på et realistisk nettverk fra en meget stor by (Paris) er Leurent og Liu (2009). Den dreier seg ikke om mer eller mindre kunstige kapasitetsskranker, som i Zorn m.fl., men om de to komfortnivåene sitteplass og ståplass. Komfortnivåene innfører en todeling av alle passasjerene som er om bord, og denne todelingen består uavhengig av trengselsnivået.

At man abstraherer fra trengselsnivået når man skal måle trengselen, virker umiddelbart litt rart, men å konsentrere seg om de to komfortnivåene og ignorere det faktum at ubehaget, både ved å stå og sitte, øker med belegget, er faktisk nøkkelen til at denne modellen, i motsetning til andre, kan takle kollektivtransportnettverket i de største byene i verden. Den modellerer rutevalget under trengsel ved å holde styr på hvor mye ledige sitteplasser det er på hvert punkt langs linja. Hvem som får sitte avhenger da av prioriteringsreglene.

Prioriteringsreglene er enkle og naturlige: De som står har førsteretten til sitteplasser som blir ledige når noen går av, men fordelinger av sitteplasser mellom dem er tilfeldig. De som kommer på etter at disse setene er fordelt, har alle samme sannsynlighet for å få sitte. (Sannsynligheten kan naturligvis ofte være null.)

Kostnaden ved en rute blir i denne modellen helt bestemt av på hvilket punkt på ruta passasjerer får anledning til å sette seg. For gitt trafikk er det en stokastisk variabel. Men trafikken på ruta er jo avhengig av hvilken rute alle andre har valgt. Problemet er altså å finne en rute med den minste forventede kostnaden, gitt at

¹⁵ Husk at dette er en aktivitetsbasert modell, der valg av reisetidspunkt er mulig.

alle andre også gjør det (brukerlikevekt). Vi går ikke inn på detaljene her, men nøyer oss med å si at problemet er løsbart nettopp fordi rutekostnaden til en reisende langs en bestemt rute er helt bestemt når vi veit hvilken stasjon på ruta som hun får sitte fra. Metoden med suksessive gjennomsnitt er brukt til å finne løsningen.

Løsningen i det tilfellet som er rapportert i artikkelen, tok ca.halvannen time på en ganske sterk datamaskin. Det virker overkommelig. Så hvorfor har ikke flere tatt i bruk denne metoden? Vi kan ikke utelukke at seinere eksperimenter har gitt dårligere resultater. Det er for eksempel ikke gitt at løsningen er entydig. Men dette går det an å finne ut mer om seinere.¹⁶

3.4.3 Bel, Pel og Pieters (2014)

Bel, Pel og Pieters (2014) har implementert trengsel om bord i den nederlandske nasjonale transportmodellen. Å dømme fra beskrivelsen av modellen i artikkelen, er dette en såkalt kombinert modell, dvs. en nested logit-modell der nytten av valget på et lavere nivå i modellen tas med i nyttefunksjonen på nivået over, og slik videre til topps.¹⁷ Nærmere bestemt har den nasjonale transportmodellen tre nivåer. På det øverste modelleres reisehyppigheten. På det midterste nivået modelleres reisetidspunkt (dag, morgen, kveld), destinasjon og reisemåte simultant i en multinomisk logitmodell (MNL). Det nederste nivået er rutevalget. For reisemåte tog modelleres påstignings- og avstigningspunkt og valg av avgang i en egen MNL-modell på dette trinnet. Det betyr at rutevalget er stokastisk, siden hele modellen bygger på stokastisk nytteteori. Videre er den ruteplanbasert, og etter-spørsel og rutevalg er integrert i en og samme modell, slik at det i utgangspunkt ikke er et spørsmål å iterere fram og tilbake for å finne likevekt.

I dette modellsystemet introduserer forfatterne trengsel om bord i undermodellen for reisemiddel tog. Det gjøres som et eksperiment, der fire ulike tilnærminger testes ut. Tilnærmingene er:

1. En «reisestraff» i form av tillegg av en konstant som legges til i generaliserte kostnader for alle reiser på trengselsutsatte linjer. Dette praktiseres i modellen på samme måte som en byttestraff som skal reflektere ulempen ved overganger, men straffen regnes i dette tilfelle ut bare ved reisas begynnelse, og varierer på grunnlag av trengselen om bord på toget man går på, målt etter at man har gått på. En rimelig tolkning av reisestrafen er at den representerer individets vurdering av sannsynligheten for å måtte stå, i alle fall til å begynne med. Virkningen av reisestrafen er at sannsynligheten for å velge andre avganger eller påstigningspunkter øker med trengselen. (Når logsummen legges inn lenger opp i systemet, vil den også påvirke reisemåte, tid på dagen osv.)
2. En tilsvarende reisestraff, beregnet på hvert eneste sted toget stopper, fra og med der man går på. Også den beregnes ut fra trengselen på strekningen etter at man har kommet om bord. Meningen er å fange opp

¹⁶ Det ser ut til at artikkelen er innsendt, men ikke akseptert i *Transportation Research B*. Den (eller en liknende artikkel) er derimot seinere publisert i *Journal of Advanced Transportation*, da med Leurent som eneste forfatter.

¹⁷ Se f.eks. Oppenheim (1995).

gjennomsnittstrengheten på hver delstrekning. - Men det man *egentlig* beregner er forventet kostnad *slik den ville vært* hvis alle blei beordret til å gå av på hver stasjon, og så måtte trekke lodd om hvem som først skulle få stige på igjen. Altså ikke helt overbevisende.

3. En vektet tidsverdi, beregnet på nytt fra hver stasjon, på grunnlag av belegget om bord videre fra denne stasjonen. Også dette er som om alle hadde *samme* sjanse til å få sitte videre.
4. En kombinasjon av punkt 2 og 3. Det betyr vel at trenghetskostnaden er en kvasilineær funksjon av belegget, dvs. $v = a + f(x)t$, der a er reisestrafpen, x er belegget, t er reisetida og $f(x)$ er den trenghetsvektede tidsverdien.

Til å bestemme straffen og vekta i hvert av disse tilfellene brukes estimerte verdier fra litteraturen, f.eks. Wardman og Whelan (2001). Trenghetskostnaden er i alle tilfeller en del av den generaliserte reisekostnaden, eller av den betingede nyttefunksjonen målt i penger, om vi holder oss til stokastisk nytte teori.

Det er en egenskap ved den nederlandske modellen, og ved kombinerte modeller generelt, at trenghetskostnadene og etterspørselen som skaper disse trenghetskostnadene blir funnet under ett, uten behov for iterering fram og tilbake mellom ulike delsystemer, slik som i den vanlige firetrinnsmodellen. Dermed får vi *samtidig* vite hvor mange det er om bord på en strekning og hva reisestrafpen og den vektede tidsverdien for reiser på denne strekninger er. I en vanlig firetrinnsmodell ville det tatt lang tid og trolig blitt ganske unøyaktig om man skulle drive iterering der både kostnadene og etterspørselen skulle modifiseres for hver strekning for hver kjøring. Men naturligvis trenghet det en løsningsalgoritme også i den nederlandske modellen, og den er da metoden med suksessive tilnærminger.

Hvis dette skulle implementeres i Norge nå, ville vi måtte løse modellen ved å holde trenghetsnivået på lenkene fast gjennom mange iterasjoner som skal finne lenkestrømmene, etterfulgt av sannsynligvis noen få iterasjoner der trenghetsnivået blir tilpasset. Selve det å endre på lenkekostnadene når trengheten er gitt, er ikke så vanskelig, derfor er dette absolutt en mulig veg framover. Det er litt verre at metoden ikke skiller mellom sittende og stående, med de lett absurde konsekvensene vi har sett. Men det er til hjelp og trøst at i Nederland, der man har klart å finne virkelig brukerlikevekt, viser det seg at metoden gir bedre tilpassing til observert etterspørsel når det er trenghet. Og den bruker relativt kort kjøretid på å finne løsningen, sjøl i svært store nettverk.

Samlet sett ser vi av de tre store modellene med trenghet i dette kapitlet at det ikke går å få både i pose og sekk. En må velge hva en vil legge vekt på: det å skille mellom sittende og stående, det å operere med gode og realistiske trenghetskostnadsfunksjoner eller det å finne løsninger på rimelig tid i store nettverk.

Alle fire metoder i den nederlandske modellen ga for øvrig gode resultater, med metode 4 som den beste og metode 2 som jamgod med 4 for alle reisehensikter unntatt reiser til og fra arbeid.

3.4.4 Valg av tilnærming

Hvis vi virkelig skal satse på å innarbeide trenghet om bord i våre analyser i framtida, er det egentlig ingen grunn til å utelukke noen av tilnærmingene vi har vært gjennom. Enkle ruteplanbaserte modeller ser ikke ut til å kunne brukes på

store nettverk ennå, men gir viktig innsikt i hvordan trengselen fører til at rushtida blir lengre. Ingen andre tilnærminger har denne egenskapen. Enkle frekvens-baserte modeller gir andre viktige innsikter av det mer tradisjonelle transport-økonomiske slaget, som beregning av optimale frekvenser og billettpriser. Til prisen av å måtte programmere mange flere lenker og noder enn det som er nødvendig i vanlige nettverksmodeller, kan denne tilnærmingen gi en god representasjon av skillet mellom sittende og stående. Men dette er ennå langt fra å være standard programvare som kan benyttes på større nettverk.

For å få inn trengsel i større rutevalgsmodeller og transportmodeller, må det gjøres et valg. Enten dropper man skillet mellom stående og sittende og satser på å måle gjennomsnittlig trengselskostnad om bord, eller så behandler man det gjennomsnittlige trengselsnivået i systemet som helhet som gitt og satser på å modellere rutevalget på grunnlag av de to komfortnivåene og de forventede rutekostnadene som følger av kampen for å få sitteplass og mulighetene til å lykkes med det.

Sjøøl om man velger det sistnevnte, er det ikke gitt at man ikke kan ta hensyn til hvordan trengselssituasjonen utvikler seg på et aggregert nivå. Man kan f.eks. endre forholdet mellom vektene for ståing og sitting som brukes på tidsverdien som en del av kalibreringen av modellen. Eller man kan anslå etterspørselsvirkningene av økt trengsel ved enkle elastisitetsberegninger, som de som er skissert i neste kapittel. På en eller annen måte finnes det nok muligheter for å utvikle nye måter å forbinde detaljerte og aggregerte beregninger på. Om det lykkes, trekker det i retning av å bruke en rutevalgsmodell a la Leurent og Liu, og bruke litt mer overordnede beregninger til å tilpasse parameterverdiene i denne rutevalgsmodellen. .

Men spørsmålet er om modellen til Leurent og Liu enkelt lar seg integrere i det større transportmodellsystemet. På det punktet er framgangsmåten til Bel, Pel og Pieters åpenbart bedre.

Et forbehold må uansett tas om at vi ikke ennå kan være sikre på at modellen til Leurent og Liu gir stabilt gode resultater.

4 Forenklet trenghetsberegning

Som vist ovenfor er det etter hvert en ikke ubetydelig litteratur om hvordan trengheten om bord skal måles og hva den betyr i form av kostnader for trafikantene. Men i et virkelig tilfelle forandrer bildet seg for hvert stopp eller stasjon. Noen går av, og etterlater sitteplasser som de som står, benytter seg av, før det kommer nye om bord. Dette gjør det vanskelig å innarbeide trenghetskostnaden i generaliserte kostnader i det modellsystemet vi nå har, og la den ha konsekvenser for valget av reisemiddel og reisetidspunkt. Raveau m.fl. (2011) viser at den konkrete trenghetssituasjonen i hver del av kollektivnettet har praktisk betydning for rutevalget. Det gjelder nok også andre steder enn i Chile. Det vi trenger er en rutevalgmodell med trenghet for kollektivtrafikantene, og en kopling til det vanlige modellsystemet ved at resultatet fra rutevalgmodellen brukes til å beregne reiseruta og reisekostnadene, som så bestemmer reisemiddel, eventuelt avreisetidspunkt, destinasjon og reisehyppighet. Vi trenger dessuten også den omvendte koplingen, nemlig at etterspørselen som vi bruker til å bestemme trengheten på hver av kollektivlenkene, faktisk gir det trenghetsnivået som produserer etterspørselen. En slik likevekt har vi i Norge vært (unødvendig) dårlige til å beregne når det gjelder køer på vegen, og når det gjelder likevekt med trenghet om bord i en modell av realistisk størrelse, har vi ingen erfaring i det hele tatt.

En riktig framgangsmåte for å beregne trenghetsnivået og trenghetskostnadene på en kollektivlinje med ståplasser når trafikken mellom alle stasjoner eller holdplasser er kjent og gitt, er vist i Aarhaug m.fl. (2013), vedlegg 3. Det som mangler for å utvide det til en hel transportmodell, er nettopp rutevalget, som jo er gitt i dette enkle tilfellet, siden det bare finnes en eneste kollektivlinje og ingen valg av reisetidspunkt.¹⁸ Rutevalget må ha som prinsipp å finne brukerlikevekt, dvs. punktet der ingen kollektivreisende har motiv for å endre sitt rutevalg, gitt at ingen andre endrer sitt. Det er en slik videreføring av Aarhaug m.fl. som er foretatt i Leurent og Liu (2009).

Hva gjør vi da, når vi ikke har noen hel modell, mens trenghet er i ferd med å bli en viktig del av kollektivtrafikantenes kostnader, i alle fall i rushtida i Oslo? Det man har gjort i KVVU Oslo-området, er å holde trenghetsberegningene helt utenfor etterspørselsmodellen, dvs. å behandle trenghet som en helt ut ekstern kostnad, som ingen av trafikantene tar hensyn til når de treffer sine beslutninger. Vi skal ta utgangspunkt i en slik beregning og utvide den så trengheten får en viss betydning for etterspørselen på et aggregert nivå. Deretter vil vi beregne brukernytte av et tiltak med trapesformelen, i det vi behandler den aggregerte etterspørselen som beslutningen til en aggregert etterspørter, som tar de samlede kostnadene for alle trafikanter i betraktning når hun bestemmer reisevolumet. Dette er vel det beste vi kan få til få kort sikt uten å ha en modell med trenghet.

¹⁸ Trenklin 2, som kan betraktes som et forsøk på å bygge en enkel transportmodell rundt vedlegg 3 i Aarhaug m.fl. (2013), har foreløpig ikke løst problemet, se avsnitt 3.2.1.

4.1 Foreslått framgangsmåte

Vi betrakter en uspesifisert del av kollektivsystemet. La g være generaliserte reisekostnader uten trengselskostnaden inkludert i dette systemet, og trengselskostnaden h være et additivt tillegg til g . Etterspørselen er en funksjon $x(g)$ av g eller en funksjon $x(g + h)$ av $g + h$, alt etter som. Vi skal nærme oss kostnad og etterspørsel i et gitt alternativ ved å iterere fram og tilbake mellom generaliserte kostnader og etterspørsel. Variablene våre har fotskrift r , der r er nummerert på iterasjonen.

$x_0(g)$ er altså etterspørselen på den gitte delen av kollektivsystemet før vi har tatt hensyn til trengsel. h_0 er trengselskostnaden slik den er beregnet som en reint ekstern kostnad. Vi unnlater foreløpig å spesifisere om beregningen dreier seg om etterspørsel og kostnader før eller etter gjennomføringen av et tiltak.

$x_0(g)$ foreligger fra transportmodellberegningen, og h_0 fra tilleggsberegningen av trengselen. Første tilnærming til virkelig trengselskostnad er $C_0 = h_0 x_0(g)$.

Beregn $C_1 = h_0 x_1(g + h_0)$, enten ved en ny kjøring av transportmodellen med trengselskostnadene lagt til de generaliserte kostnadene, eller ved en elastisitetstraktning, se nedenfor. I C_1 er etterspørselen nå redusert, men trengselskostnaden er antatt like høy som før. Vi har altså $C_1 < C_0$.

Beregn den nye trengselskostnaden h_1 ved dette lavere etterspørselsnivået, og finn $x_2(g + h_1)$, enten ved en modellkjøring eller en elastisitetstraktning, som før. x_2 er større enn x_1 , men trengselskostnaden er lavere. Det er altså usikkert om $C_2 = h_1 x_2(g + h_1)$ er større eller mindre enn C_1 . Men under enhver omstendighet er $C_2 < C_0$.

Vi har ikke nå forsøkt å gjøre disse iterative beregningene til en formell algoritme som konvergerer. Tvert imot bryter vi av her ved å anslå gjennomsnittet av h_1 og h_2 og gjennomsnittet av x_1 og x_2 :

$$h^R = \frac{1}{2}(h_1^R + h_2^R)$$

$$x^R = \frac{1}{2}(x_1^R + x_2^R)$$

Toppskrift R står her for at det er referansealternativet vi har beregnet et tilnærmet løsningspunkt for. Nøyaktig samme framgangsmåte kan vi bruke på beregningen av et tiltaksalternativ, for eksempel T:

$$h^T = \frac{1}{2}(h_1^T + h_2^T)$$

$$x^T = \frac{1}{2}(x_1^T + x_2^T)$$

De to punktene (h^R, x^R) og (h^T, x^T) representerer den aggregerte trengselskostnaden og den aggregerte etterspørselen i det systemet vi ser på i henholdsvis referansealternativet og tiltaksalternativet. Vi ser at vi kan få et uttrykk for nytten av trengselsreduksjon på aggregert nivå ved å bruke de to punktene til å beregne et «konsumentoverskudd» V^{trengsel} i tråd med trapesformelen:

$$V^{\text{trengsel}} = \frac{1}{2}(h^R - h^T)(x^R + x^T)$$

Dersom analyseområdet omfatter mange slike delområder, vil vi kunne summere «trenghetskonsumentoverskuddet» i hvert delområde til et uttrykk for tiltakets virkning på trengheten for alle trafikantene.

4.2 Elastisitetsberegning

Poenget med vår metode er å ta hensyn til at når trengheten om bord øker, vil trafikantene i en viss utstrekning redusere sin etterspørsel – hvilket naturligvis også demper trengheten. Metoden vi har utviklet ovenfor, krever et par ekstra transportmodellkjøringer dersom vi ikke kan anslå etterspørselsvirkningen ved en enkel elastisitetsberegning. Her er vårt forslag til hvordan en slik beregning kan gjennomføres:

Vi antar at tidligere resultatuttak fra modellen har gitt et grunnlag for å bedømme hvordan det aggregerte trenghetsnivået i systemet vi ser på, utvikler seg med etterspørselen. Fra litteraturen har vi også kunnskap om hvordan trenghetskostnaden for gjennomsnittspassasjerer utvikler seg med trenghetsnivået.¹⁹ Vi antar trenghetskostnaden kan uttrykkes som en faktor som blåser opp tidsverdien. Denne faktoren øker med etterspørselen og kan påvirkes av visse former for virkemiddelbruk, som for eksempel økt frekvens (som reduserer trengheten pr avgang og også påvirker deler av reisetida) og større kapasitet pr avgang. Vi samler disse to sammenhengene (trenghetsindikatoren og trenghetskostnadsfaktoren) til en enkel funksjon $v(x, \alpha)$ av etterspørselsnivået x og skiftparameteren for virkemiddelbruk, α . Generaliserte kostnader kan da skrives

$$G = p + v(x, \alpha)t$$

der p er billettprisen (og kanskje andre konstanter og faste kostnader som påløper pr reise) og t er reisetida. Forholdet mellom G her og $g + h$ i forrige avsnitt, er som følger: Vi kan anta at g er sammensatt av billettprisen og tidskostnaden $v(x_0, \alpha)t$, der x_0 er etterspørselsnivået på det tidspunktet tidsverdien (uten vekting for trenghet) blei estimert. Følgelig er $h = (v(x, \alpha) - v(x_0, \alpha))t$.

Vi skriver etterspørselen slik:

$$x = \theta \cdot D(G)$$

Her er $D(G)$ etterspørselsfunksjonen i utgangspunktet, mens θ er en skiftparameter som enten kan representere den eksogene trafikkveksten fra utgangspunktet til det tidspunktet vi ser på, eller økt overført eller nyskapt trafikk i systemet vi ser på. Den siste tolkningen er mest relevant her. I forrige avsnitt skilte vi mellom utgangssituasjonen R og situasjonen T med tiltaket. Fra R til T må det ha skjedd en endring i generaliserte kostnader i systemet vi ser på. Det kan dreie seg om

¹⁹ Se f.eks. de Palma m.fl. (2015) for en modell av dette. På vårt aggregerte nivå er vi ute etter et gjennomsnitt av kostnaden for de stående og de sittende, gjerne beregnet per kollektivlenke i modellen. Se vedlegg I for en konseptuell framstilling av forskjellen mellom kostnaden for den marginale passasjerer (som er det relevante begrepet når man skal vurdere kostnaden ved å stige på), og gjennomsnittskostnaden for de som er om bord (som er det relevante begrepet for vår aggregerte betraktning).

reisetida, billettprisen, frekvens, kapasitet eller andre forhold, men uansett vil dette kunne medføre nyskapt og overført trafikk i systemet vi ser på, og dette er fanget opp i parameteren θ .

Vi totaldifferensierer de to likningene for G og x :

$$\begin{aligned} dx &= D(G) \cdot d\theta + \theta D'(G) \cdot dG \\ dG &= dp + \frac{\partial v}{\partial x} t \cdot dx + \frac{\partial v}{\partial \alpha} t \cdot d\alpha + v(x, \alpha) \cdot dt \end{aligned}$$

Ved å sette uttrykket for dG fra andre linje inn i uttrykket for dx i første linje og regne litt og ordne, kan vi utlede følgende sammenheng mellom den prosentvise etterspørselsvirkningen av tiltaket T og virkningen som tiltaket har på p , t , α og θ :

$$\frac{dx}{x} = \frac{\frac{d\theta}{\theta} + \frac{dp + \frac{\partial v}{\partial \alpha} t d\alpha + v(x, \alpha) dt}{G} \cdot El_{G,x}}{1 - \frac{v(x, \alpha) t}{G} \cdot El_{G,x} \cdot El_{x,v}}$$

For å se hvordan x endrer seg når man tar hensyn til trengsel om bord, må man altså finne etterspørselstettheten mhp. G og spesifisere trengselskostnads-sammenheng, slik at man kan beregne elastisiteten av trengselskostnaden mhp. belegget. Så må man vurdere om det er rimelig at p , t , α eller θ endrer seg ved overgangen fra R til T. (Trolig gjelder det θ , men ikke de andre.)

Det er vel ikke nødvendig, men om det skulle bli bruk for en elastisitetsberegning av hvordan G endrer seg ved endring av x , kan vi finne det ved å sette dx inn i dG etter totaldifferensieringen, og ordne. Vi får:

$$\frac{dG}{G} = \frac{dp + v(x, \alpha) t \cdot \left(\frac{d\theta}{\theta} El_{x,v} + \frac{d\alpha}{\alpha} El_{\alpha,v} + \frac{dt}{t} \right)}{1 - \frac{v(x, \alpha) t}{G} \cdot El_{G,x} \cdot El_{x,v}}$$

4.3 Ett steg videre

Avsnitt 4.1 og 4.2 opphever den grovt feilaktige forutsetningen i trengselskostnadsberegningene som er gjort til nå, nemlig at etterspørselen ikke tilpasser seg til trengselsnivået. Men denne trengselskostnadsberegningen er fremdeles atskilt fra modellsystemet, slik at trengsel ikke har noen innvirkning på etterspørsel eller nytte i modellsystemet som helhet. Det vi ender opp med, er en etterspørsel og nytte som ikke påvirkes av trengsel, pluss en trengselskostnad der etterspørselen er nedjustert og avviker fra etterspørselen i transportmodellen. Da er vi bare snaut halvveis.

Vi har to mulige veier videre. Enten må vi ta fatt på det virkelige arbeidet, basert på beslutningene som er nevnt i avsnitt 3.4.4. For eksempel kan vi legge inn virtuelle tillegg til reisetidene i modellen på en måte som gjenskaper etterspørselen vi fant i elastisitetsmodellen. Eller vi kan kanskje lage en aggregert likevektsmodell som illustrerer hvordan etterspørselen virker på trengselen og trengselen på etterspørselen, og kalibrere den til å gjenskape det vi mener å vite om det disaggregerte systemet.

5 Prosjektforslag

Både verdsetting ved hjelp av observerte data (RP) og estimering av rutevalgsmodeller med trenghet krever at data om reisemønsteret kombineres med data om trengheten. Det finnes flere byer der billettsystemet krever at billetten blir registrert både når reisa begynner og når den slutter. Slike byer har en fordel når det gjelder å estimere enhetspriser og modeller med trenghet om bord, slik f.eks. Tirachini m.fl. (2016) viser. Men i Oslo foregår det for tida forsøk med å samle inn nettopp slike data fra passasjerer som har billett på mobilen, helt uten at de behøver å foreta seg noe når de går på eller av (Aftenposten 22. september 2016). Det kan aktualisere at trenghet om bord også i Oslo kan bli estimert med RP i en framtidig verdsettingsstudie. En annen kilde til data er tellinger verd dørene, som kan brukes til å beregne belegget på hver delstrekning.

T-banen i Oslo har for tida et annet særtrekk som allerede nå kan bli brukt til RP-undersøkelser av trenghet. Med to avganger i kvarteret på alle østlige baner har det nemlig vist seg vanskelig å legge avgangene med like lang tid i mellom. På linje 2 Ellingsrudåsen og linje 3 Mortensrud er mønsteret at det veksler mellom fem og ti minutter mellom avgangene. Sjøl om det ikke er de mest belastede linjene, har den østlige delen av dem også en god del trenghet om bord. Den østlige delen av disse linjene vil derfor egne seg best for trenghetsundersøkelser. Om vi kan anta at etterspørselen egentlig er konstant pr. minutt over et kortere tidsrom, eller om vi kjenner hvordan den ville variere dersom banene kom med jamne mellomrom, kan vi enkelt bruke observerte trafikk tall til å beregne hvor mange som velger å komme litt før eller litt etter det de helst ville, bare for å unngå trengheten. I stedet for å verdsette trengheten direkte, kan vi kanskje da verdsette den alternative tidkostnaden som disse trafikantene er villig til å pådra seg for å unngå trengheten.

Mortensrudbanen har det problemet at de to avgangene i kvarteret ikke går til samme sted, idet den ene går til Stortinget og den andre til Vestli. Om man kunne finne ut hvor mange som er på Vestliavgangen for å slippe en overgang i byen, kunne man sannsynligvis korrigere trafikk tallene på denne banen ved å ta ut disse passasjerene fra materialet. Men det er kanskje også et problem at det er mye matebusser til Mortensrud, og de kan ha ulikt antall passasjerer av andre grunner enn mulighetene for sitteplass på Mortensrudbanen. – Noe tilsvarende problem finnes meg bekjent ikke på banen til Ellingsrudåsen.

For å få tak i dataene vi trenger, må vi først og fremst identifisere de stasjonene der man kan være sikker på å få sitte om man tar den avgangen som går fem minutter etter den andre, men ikke om man tar den andre avgangen. Om ingen endrer avreisetid for å få sitteplass, skulle man vente at denne avgangen hadde dobbelt så mange reisende som den neste. Det kan kontrolleres ved å sjekke at det faktisk er tilfelle når man måler belegget på stasjonene oppstrøms, der alle kan antas å få sitteplass på begge avganger. Hvis det *ikke* er tilfelle, kan det skyldes at ulempen ved å sitte tett slår ut før ulempen med å stå inntreffer, og fører til en viss

preferanse for avgangen som går fem minutter etter den andre. Slik kan man i tilfelle også estimere trengselsulemper for de som sitter. Dessuten kan man bruke stasjoner nærmere byen til å beregne hvordan ulempen med å stå øker med trengselen. Vi kan anta at svært få går av før Hellerud. Det er folk som går av og folk som går på på alle de neste stasjonene, og trengselen om bord er sannsynlig på sitt høyeste på Tøyen (personlig erfaring).

Hvordan skal man så gjøre beregningene? La oss si at vi har 99 passasjerer, og venter oss at 66 går på avgangen som går 5 minutter før den andre, og 33 går på neste avgang. I stedet finner vi at den første avgangen har 50 som går på, og den andre har 49. Det kan tolkes som at 16 har ventet på avgangen etter for å slippe å stå. I gjennomsnitt har denne skjulte ventetida vært på 5 minutter, eller litt mer dersom tendensen til å vente på neste avgang også gjør seg gjeldende blant de som ellers ville hatt veldig god tid til den første banen. Den tida som har gått tapt for de som har utsatt sin avgang, kan verdsettes som skjult ventetid. Problemet er imidlertid at vi har så dårlige data om verdien av skjult ventetid. Enten må vi da gjennomføre en egen liten SP-undersøkelse av det, eller presentere resultatet som et nokså usikkert anslag.

Ved å utvide undersøkelsen til andre stasjoner langs samme linje burde vi i prinsippet kunne gjenskape figur 1 i kapittel 2. Ved å utvide den til flere baner burde vi også kunne redusere forekomsten av tilfeldigheter som gjør anslagene usikre. Og ved å ta med muligheten for at noen av de 16 som har valgt vekk den avgangen som passet dem best, har gjort det ved å framskynde sin avreise, får vi tatt med muligheten for at tid på ankomststedet har en annen verdi enn tid på avreisestedet.

En tilsvarende stated preference-undersøkelse kan også gjennomføres om den ene avgangen har tre vogner og den andre seks.

6 Tilpasninger og tiltak

Det mest naturlige å gjøre når trengselen om bord begynner å bli påtakelig, er å øke frekvensen på tilbudet. Om dette er samfunnsøkonomisk lønnsomt eller ikke, bør avklares med en samfunnsøkonomisk analyse. Til å vurdere hva som sannsynligvis er den samfunnsøkonomisk optimale frekvensen på de enkelte linjene, kan man bruke litteraturen som det er vist til i avsnitt 3.1.

Noen ganger er det ikke mulig å øke frekvensen (antall avganger pr. time). Det gjelder for eksempel t-banetrafikken gjennom sentrum i Oslo. Alternativet kan være å øke kapasiteten pr. avgang. Det krever da sannsynligvis nytt og mer kapasitetssterkt rullende materiell, og i noen tilfeller også infrastrukturinvesteringer, for eksempel plattformforlengelser. Igjen blir det opp til en samfunnsøkonomisk analyse å avgjøre om slike investeringer er lønnsomt. Både når det gjelder å utvide kapasitetsgrensa på antall avganger og når det gjelder å øke passasjerkapasiteten på avgangene, vil en slik analyse nødvendigvis kreve en transportmodell som behandler trengselskostnadene for trafikantene på en god måte. Det er til arbeidet med å utvikle modellapparatet for slike analyser at den foreliggende rapporten er ment å være et innspill.

Om ingenting kan gjøres med frekvensen eller kapasiteten pr. avgang, gjenstår muligheten å bygge ny infrastruktur. Også i dette tilfellet er det viktig å ha en riktig oppfatning av kostnadene ved trengselen om bord, siden de opptrer i nullalternativet (når vi ikke gjør noen tiltak), men formodentlig faller vekk i tiltaksalternativene.

Men alt dette er dyre tiltak. Retningslinjene for utredning og vurdering av slike tiltak (den såkalte firetrinnsmetodikken) sier at før vi kaster oss over dem, må vi vurdere om det finns mindre omfattende tiltak som løser problemet. I rekkefølge skal vi vurdere:

1. Om det finns tiltak som løser problemet ved å påvirke transportetterspørselen eller valget av reisemåte,
2. Om problemet kan løses ved tiltak som gir mer effektiv utnyttelse av eksisterende infrastruktur,
3. Om det kan løses ved å forbedre eksisterende infrastruktur, og
4. Om det trengs nyinvesteringer og større ombygninger av eksisterende infrastruktur.

Gitt at kollektivtransport skal prioriteres over biltransport, er det som regel uaktuelt å påvirke valg av reisemåte. Men det finns en rekke tiltak som kan påvirke transportetterspørselen:

- Man kan innføre rushtidsavgift i kollektivsystemet. Med riktig utforming vil det kunne spre rushtida ut i tid og fjerne reiser som ikke er så viktige. Men det gjelder å finne riktige satser, og det er igjen et område der ulike modeller

med trengsel om bord er påkrevet. Det vil også ha fordelingsvirkninger som det kan være nødvendig å gjøre noe med (Minken 2005).

- I noen store byer i Australia tilbyr man gratis reise i timene før rushtida begynner (Currie 2010, Chow 2013). Dette tiltaket gir større eller mindre forbedring for alle trafikanter, mens kollektivselskapet er taperen. Om tapet oppveies av gevinsten, er igjen et spørsmål om størrelsen på trengselsulempene.
- I Beijing har man fjernet de fleste setene på pendlertogene (Tian m.fl. 2007). De som må stå, er nå ti ganger så mange som de som sitter. Tanken er at ved de trengselsnivåene man har hatt der, er ulempen for de som ikke lenger får sitte, mer enn oppveid av lettelsen for de mange som må stå. Det er et enkelt spørsmål å finne ut av, forutsatt at det er tilfeldig hvem som får sitteplass. Da er det bare å veie gevinsten for de som står både før og etter, målt ved reduksjonen i den vektete tidsverdien, og måle det ved nyttetapet til de som tidligere satt, men nå må stå. Om sitteplassene i etterkant av tiltaket blir tildelt spesielle grupper som trenger det mest, blir det litt vanskeligere, men ikke veldig vanskelig.

Ulempen ved å stå avhenger av hvordan vogna er innredet (Davidson m.fl. 2011). I forbindelse med fjerning av sitteplasser vil det være lurt å vurdere måter å gjøre det mer komfortabelt å stå på.

- En annen metode er å lage et køsystem på plattformene og regulere hvor mange som får gå om bord på hver avgang. Det vil bare være effektivt hvis rushtida er kortvarig. Igjen er det i utgangspunkt et spørsmål om gevinsten ved mindre trengsel i alle rushtidsavganger blir oppveid av ulempen for de som ikke står slik til i køen at de kommer med den første avgangen som kommer. En komplikasjon er at det trolig vil bli en gruppe som velger å reise på et tidspunkt hvor køen er liten, eller eventuelt velger et annet transportmiddel. Tiltaket er en ulempe for de som må vente på neste avgang, men en fordel for alle når de først er om bord. Spørsmålet er derfor om ulempene oppveier gevinsten. Dersom det ikke er tilfeldig hvem som hver dag kommer først i køen (f.eks. hvis de som blir rammet, bare er de som begynner arbeidsdagen på et bestemt tidspunkt), vil det kunne oppfattes som urettferdig.
- Som vi så i forbindelse med Kraus (1991), er det gode argumenter for høyere billettpris for de som kommer på nær der linja begynner, i og med at de påfører trafikantene nedstrøms en ekstern virkning i form av reduserte sjanser til å sitte. Heller ikke dette er vanskelig å beregne – det er bare å finne differansen mellom den vektete tidsverdien til gjennomsnittspassasjerene og tidsverdien til de som får sitte. Det er også lett å argumentere for, siden lange reiser i mange sammenhenger tradisjonelt har høyere billettpris enn korte.
- Trengsel skaper punktlighetsproblemer, spesielt fordi stopptida på stasjonene varierer med antallet som skal av og på. Punktlighetsproblemer vil ha to effekter. For det første vil passasjerene oppleve dem som uventede forsinkelser. Dette finnes det enhetspriser for i etatenes manualer, og det eneste problemet med å bruke dem er å vite hvordan et tiltak påvirker omfanget av forsinkelsene. Men for det andre fører punktlighetsproblemer også til at det gjennomsnittlige trengselsnivået om bord i avgangene som helhet stiger. Det er en effekt som vi ikke beregner. Den oppstår når togene (trikkene, bussene)

klumper seg, slik de ofte gjør når et tog blir forsinket. Det vil da ikke bare få sine vanlige passasjerer, men også de som kommer til stasjonen i tida fra det skulle ha gått til det faktisk går. Det forsinker dette toget enda mer. Toget bak, derimot, mister passasjerer. Hvis gjennomsnittstrengselen er konveks, som formel (3) i kapittel 2 viser, vil den gjennomsnittlige trengselen om bord i to tog der det ene er unormalt fullt og det andre unormalt tomt, ikke være lik trengselen i hvert av togene hvis de hadde like mange passasjerer, men ligge nærmere det fulle togets trengsel. Dette er et samfunnsøkonomisk tap som ikke er beregnet til nå, men som lett lar seg beregne hvis man har data. Det finns to tiltak som kan redusere tapet. Det ene er å lage ruteplaner der intervallet mellom togene er mest mulig likt når de kommer til områdene der det er spesielt mange som skal på og av. Da reduseres sjansene for at avgangene skal klumpe seg. Det andre er å ha en strategi for hva en skal gjøre når klumping likevel oppstår. Den vanligste strategien kalles 'holding' på engelsk, og består i å holde igjen avganger som har kommet for nær avgangen foran. Det betyr på den andre sida at ruteplanen ryker.²⁰

Tilfeldig klumping som skyldes for høy frekvens, slik at små forstyrrelser forplanter seg bakover, har større konsekvenser enn når ruteplanen medfører ujamne intervaller mellom togene. Det er nemlig godt mulig at passasjerene sjøl vil jamne ut trengselsnivået mellom avgangene ved å tilpasse sine avreisetidspunkter etter kapasiteten på avgangene.

- Kanskje kan man også bruke kampanjer for å stimulere til fleksitid og større spredning av arbeidstida og økt bruk av arbeid hjemmefra, men det spørs hvor effektivt det er.

Vi ser at det ikke er lite man kan gjøre av tiltak mot trengselen på nivå en og to i firetrinnsmetodikken. Kanskje med unntak av noen få steder er de fleste av disse tiltakene uaktuelle i Norge nå, men med tida vil det sannsynligvis endre seg.

²⁰ Det finnes en stor litteratur om holdingstrategier, men vi skal ikke gå inn i den her.

7 Drøfting og konklusjoner

Trengselen om bord på kollektive transportmidler er i ferd med å bli et problem i rushtida i osloområdet og noen andre byområder i Norge. Derfor blir det nå nødvendig å ta hensyn til trengselen i transportmodellene som brukes i byområdene og i nytteberegningen av tiltak. I noen få utredninger er endringene i trengselskostnadene beregnet og lagt til trafikantnyttene, uten at den påvirker etterspørselen og den vanlige nytteberegningen. Dette gjør trengsel til en kostnad som trafikantene som helhet påfører seg sjøl uten å ta det inn over seg. De handler som om de ikke registrerer at de påfører hverandre kostnader. Det sier seg sjøl at dette ikke er bra nok. Det er kanskje til og med verre enn ingenting, for det medfører at trengselen og etterspørselen begge overvurderes. Jernbaneverkets modell Trenklin gir trafikantene mulighet til å ta hensyn til trengselen i form av reisetidspunkt, men metodikken forøvrig legger sterke begrensninger på anvendelsesområdet til modellen.

En nødløsning på kort sikt kan være å anslå på aggregert nivå hvordan trengselen påvirker etterspørselen, og hvordan dette gir en likevekt med litt mindre av både trengsel og etterspørsel. Opplegget er skissert i kapittel 4. Dette er fremdeles en beregning på utsiden av modellsystemet, og både brukerkostnader, etterspørsel og brukernytte i modellen vil fortsette å være som før. Men trengselskostnadsberegningen som gjøres på utsida av systemet, er i alle fall redusert til et rimeligere nivå.

Skal vi komme videre, må vi integrere trengselskostnadene i selve modellsystemet, hvilket naturligvis er et større arbeid. Det er med sikte på dette arbeidet at vi har gjennomført en litteraturstudie. Den er rapportert i kapittel 2 og 3. Det viser seg at trengsel er studert med to ulike teoretiske tilnærminger, nemlig frekvensbasert kollektiv rutevalg og ruteplanbasert kollektiv rutevalg. Den sistnevnte er i nær slekt med Vickreys flaskehalsmodell for kø i biltrafikken, og innebærer at trafikantene må gjøre et valg av *når* de skal reise. Det karakteristiske resultatet i slike modeller er at kø eller trengsel medfører at rushtida blir utvidet. Om vi altså skal bruke ruteplanbaserte kollektiv rutevalg som grunnlag for å inkludere trengsel i modellene, må vi først utvide valgmulighetene i etterspørselsmodellen med valg av avreisetidspunkt.

Rushtidsspredning er en svært viktig tilpasning til kø og trengsel, men sjøl om ruteplanbasert rutevalg gir viktig teoretisk innsikt om nettopp denne typen tilpasning, er det samtidig også vanskeligere å utvide fra en typisk kollektivlinje til et helt nettverk. Alt i alt virker det derfor som det beste å satse på frekvensbaserte modeller, der kollektivlinjene drives med faste frekvenser i hele perioden vi ser på (dvs. i hele rushtida). Vi står da overfor et valg mellom tre alternativer: Vi kan anta at det finns gitte kapasitetsskranker, og modellere overskridelser av dem som gjensitting, eller vi kan legge vekt på skillet mellom stående og sittende. Endelig kan vi legge vekt på hvordan gjennomsnittlig trengsel gradvis øker med belegget.

Siden gjensitting ikke ser ut til å være vanlig i Norge, er det de to andre forenklingene som virker mest aktuelle.

Det er ikke gjennomført mange undersøkelser for å verdsette trengselsulempene i Norge. Det finnes imidlertid gode muligheter til å verdsette dem med revealed preference, eventuelt i kombinasjon med stated preference av skjult ventetid.

Reint praktisk er det mange mindre tiltak som kan settes i verk for å redusere trengselskostnadene. Vi har trukket fram sju. De hører alle med på de to første trinnene i firetrinnsmetodikken.

Litteraturliste

- Aarhaug, J., Caspersen, E., Fearnley, N., Ramjerdi, F., Ranheim, P. og Steinsland, C. (2013) Dokumentasjonsrapport: Inkrementell etterspørselsmodell. TØI-rapport 1283/2013.
- Aashtiani, H.Z. and Magnanti, T.L. (1981) Equilibria on a congested transportation network. *SIAM Journal of Algebraic Discrete Methods* **2**(3), 213-226.
- Accent Marketing and Research and Hague Consulting Group (2006) Rail customers' valuations of sitting, standing and crowding. Report prepared for Transport for London.
- Alonso, W. (1964) *Location and Land Use. Toward a General Theory of Land Rent*. Harvard University Press. (Finnes som e-bok.)
- Aranguren, M. and Tonnelat, S. (2014) Coping with crowdedness in mass transportation. The role of emotions in the Paris metro. *Metropolitics* 26 February 2014.
- Batarce, M., Munoz, J.C., Ortuzar, J.D., Raveau, S., Mujica, C. and Rios, R.A. (2015) Valuing crowding in public transport systems using mixed stated/revealed preferences data: The case of Santiago. Paper presented to TRB 94th annual meeting.
- Beckmann, M., McGuire, C.B. and Winsten, C.B (1956) *Studies in the Economics of Transportation*. New Haven, Yale University Press.
- Björklund, G. and J.-E. Swärdh (2015) Valuing in-vehicle comfort and crowding reduction in public transport. CTS Working Paper 2015:12.
- Caspersen, E., Ranheim, P. og Aarhaug, J. (2014) Dokumentasjonsrapport: Trenklin 1.17. TØI-rapport 1341.
- Chang, S.K. and Schonfeld, P.M. (1991) Multiple period optimization of bus transit system. *Transportation Research B*, **25**, 453-478.
- Chow, J. (2013) Early Birds Get Free MRT Rides from Today. The Straits Times.
- Currie, G. (2010) Quick and Effective Solution to Rail Overcrowding: Free Early Bird Ticket Experience in Melbourne, Australia. *Transportation Research Record* **2146**, 35-42.
- Davidson, B., Vovsha, P., Abedini, M., Chu, C. and Garland, R. (2011) Impact of capacity, crowding, and vehicle adherence on public transport ridership: Los Angeles and Sidney experience and forecasting approach. Proceedings of 34th Australasian Transport Research Forum. Adelaide, Australia.
- De Palma, A., Kilani, M. and Proost, S. (2010). The location and pricing of mass transit stations. In: *Selected Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society*, 11-15 July, Lisbon.

- De Palma, A., Kilani, M. and Proost, S. (2015) Discomfort in mass transit and its implication for scheduling and pricing. *Transportation Research B* **71**, 1-18.
- Douglas, N. and Karpouzis, G. (2005) Estimating the cost to passengers of station overcrowding. 28th Australasian Transport Research Forum (ATRF), Sidney September 2005.
- Douglas, N. and Karpouzis, G. (2006) Estimating the passenger cost of train overcrowding. 29th Australasian Transport Research Forum (ATRF), Gold Coast September 2005.
- Fickling, R., Gunn, H., Kirby, H., Bradley, M. and Heywood, C. (2008) The productive use of rail travel time and value of travel time saving for travelers in the course of work. European Transport Conference.
- Flügel, S. og Hulleberg, N. (2016) Trenklin 2 – gjennomgang av modellen og drøfting av anvendelsesområde. TØI-rapport 1534/2016.
- Fujita, M. (1989) *Urban Economic Theory: Land Use and City Size*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Gripsrud, M. and Hjorthol, R. (2012) Working on the train: from ‘dead time’ to productive and vital time. *Transportation* **39**(5), 941-956.
- Hamdouch, Y., Ho, H.W., Sumalee, A. and Wang, G. (2011) Schedule-based transit assignment model with vehicle capacity and seat availability. *Transportation Research B* **45**(10), 1805-1830.
- Haywood and Konig (2015) The distribution of crowding costs in public transport: New evidence from Paris. *Transportation Research A*, **77**, 182-201.
- Hensher, D.A., Rose, J.M., Collins, A. (2011) Identifying commuter preferences for existing modes and a proposed metro in Sidney, Australia, with special reference to crowding. *Public Transport* **3**(2), 109-147.
- Herbon, A. and Hadas, Y. (2015) Determining optimal frequency and vehicle capacity for public transit routes: A generalized newsvendor model. *Transportation Research B* **71**, 85-99.
- Huang, H.J. (2000) Fares and tolls in a competitive system with transit and highway: The case of two commuter groups. *Transportation Research E* **36**(4), 267-284.
- Huang, H.J., Tian, Q. and Gao, Z.Y. (2005) An equilibrium model in urban transit riding and fare policies. Proceedings of the First International Conference on Algorithmic Applications in Management, Xian, China, June 22-25, 2005. *Lecture Notes in Computer Science* **3521**, 112-121.
- Koning, M. and Haywood, L. (2011) Pushy Parisian elbows: taste for comfort in public transport. ERSA Conference Papers, ersa11 p815, European Regional Science Association.
- Kraus, M. (1991) Discomfort externalities and marginal cost transit fares. *Journal of Public Economics* **29**(2), 249-259.
- Kroes, E, Kouwenhoven, M., Debrincat, L. and Pauget, N. (2014) Value of crowding on public transport in Ile-de-France, France. *Transportation Research Record* **2417**, 37-45.

- Jansson, J. O. (1980) A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy* **14**(1), 53-80.
- Jansson, J. O. (1984) *Transport System Optimization and Pricing*. Wiley&Sons, Chichester.
- Jara-Diaz, S.R. and Gschwender, A. (2003) Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews* **23**(4), 453-469.
- Lam, W.H.K, Cheung, C.Y., and Lam, C.F. (1999) A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations. *Transportation Research A* **33**, 401-415.
- Last, A. and Leak (1976) TRANSEPT: A Bus Model. *Traffic Engineering and Control* **17** (1976).
- Leurent, F. and Liu, K. (2009) On seat congestion, passenger comfort and route choice in urban transit: a network equilibrium assignment model with application to Paris. Proceedings of 88th TRB Annual Meeting, Washington DC.
- Li, Z. and Hensher, D.A. (2011) Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy* **18**(6), 880-887.
- Maunsell, F. and MacDonald, M. (2007) Rail overcrowding, reliability and frequency. Report for Centro, the West Midlands Passenger Transport Executive.
- Minken, H. (2009) Kollektivselskapets kostnader, optimalt kollektivtilbud, og verdien av forbedringer. Arbeidsdokument TØ/2157/2009, inntatt som vedlegg 5 i Minken m.fl. (2009) Konseptvalgsutredninger og samfunnsøkonomisk analyse, TØI-rapport 1011/2009.
- Minken, H. (2014) Tilgang til sporet avgjør prisen. Bladet Samferdsel nr. 7/2014. <https://samferdsel.toi.no/nr-07/tilgang-til-sporet-avgjor-prisen-article32654-1463.html>
- Minken, H. (2005) Vegprising, kollektivtiltak og sosial ulikhet. TØI-rapport 815/2005.
- Moccia, L. and Laporte, G. (2016) Improved models for technology choice in a transit corridor with fixed demand. *Transportation Research B*, **83**, 245-270.
- Mohd Mahudin, N.D., Cox, T. and Griffiths, A. (2012) Measuring rail passenger crowding: Scale development and psychometric properties. *Transportation Research F*, **15**, 38-51.
- Mohring, H. (1972) Optimization and scale economies in urban bus transportation. *American Economic Review* **62**(4), 591-604.
- Mohring, H. (1976) Ed: *Transportation Economics*. Cambridge, Massachusetts.
- MVA Consultancy (2008) Understanding the passenger: valuation of overcrowding on rail services. Report for the Department of Transport, London UK.
- Nguyen, S. and Pallottino, S. (1988) Equilibrium transit assignment for large scale networks. *European Journal of Operations Research* **37**, 176-186.

- OECD/ITF (2014) Valuing convenience in public transport. ITF Round Tables 156. OECD Publishing, France.
- Oppenheim, N. (1995) *Urban travel demand modeling: from individual choices to general equilibrium*. John Wiley and Sons, New York.
- Pel, A.J., Bel, N.H. and Pieters, M. (2014) Including passengers' response to crowding in the Dutch national train passenger assignment model. *Transportation Research A* **66**, 111-126.
- Proud'homme, R., Konig, M, Lenormand, L. and Fehr, A. (2012) Public transport congestion costs: The case of the Paris subway. *Transport Policy* 21(C) ,101-109.
- Qin, Feifei (2012) Essays on efficient operational strategy of urban rail transit. PhD dissertation, Molde University College.
- Ramjerdi, F., Flügel, S., Samstad, H. og Killi, M. (2010) Den norske verdsettingsstudien. Tid. TØI-rapport 1053B.
- Raveau, S., Muñoz, J.C. and de Grange, L. (2011) A topological route choice model for metro. *Transportation Research A*, **45**(2), 138-147.
- Rouwendal, J. and E.T. Verhoef (2004) Second best pricing for imperfect substitutes in urban networks. Page 27-60 in: Santos, G. (Ed), *Road pricing: Theory and Evidence*. Oxford: Elsevier.
- Schmöcker, J.D., Fonzone, A., Shimamoto, H, Kurauchi, F., and M.G.H. Bell (2011) Frequency-based transit assignment considering seat capacities. *Transportation Research B* 45(2), 392-408.
- Spiess, H. and Florian, M. (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. *Transportation Research B*, 23(2), 83-102.
- Tian, Q., Huang, H.J. and Yang, H. (2007) Equilibrium properties of the morning peak-period commuting in a many-to-one mass transit system. *Transportation Research B* **41**, 616-631.
- Tirachini, A. (2013) Bus dwell time: The effects of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Transportmetrica A: Transport Science*, **9**(1), 28-49.
- Tirachini, A., Sun, L., Erath, A. and Chakirov, A. (2016) Valuation of sitting and standing in metro trains using revealed preferences. *Transport Policy* **47**, 94-104.
- Tirachini, A., Hensher, D. and Rose, J.M. (2013) Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research A* **53**, 36-52.
- Tirachini, A., Hensher, D. and Rose, J.M. (2014) Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: the interplay between traffic congestion and bus crowding. *Transportation Research B*, **61**, 33-54.
- Tirachini, A., Hensher, D. and Jara-Diaz, S.R. (2010) Restating model investment priority with an improved model for public transport analysis. *Transportation Research E*, **46**, 1148-1168.

- Vickrey, W.S. (1969) Congestion Theory and Transport Investment. *American Economic Review* **59**(2), 251-260.
- Wardman, M. and G. Whelan (2011) Twenty years of rail crowding valuation studies. Evidence and lessons from British experience. *Transport Reviews* **31**(3), 379-398.
- Whelan, G. and Crockett, J. (2009) An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding. International conference on choice modelling, Harrogate, England, April.
- Wu, J.H., Florian, M. and P. Marcotte (1994) Transit Equilibrium Assignment: A Model and Solution Algorithms. *Transportation Science* **28**(3), 193-203.
- Zorn, L., Sall, E. and Wu, D. (2012) Incorporating crowding into the San Fransisco activity-based travel model. *Transportation* **39**(4), 755-771.

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 70 høyt spesialiserte forskere.

Instituttet utgir tidsskriftet Samferdsel med 10 nummer i året 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.

TØI er partner i CIENS Forskningscenter for miljø og samfunn, lokalisert i Forskningsparken nær Universitetet i Oslo (se 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
Gautstadalléen 21
NO-0349 Oslo

22 57 38 00
toi@toi.no
www.toi.no