

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift

Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet

(Proceedings from the Annual Transport Conference
at Aalborg University)

ISSN 1603-9696

www.trafikdage.dk/artikelarkiv



Netværkseffekter i jernbanekøreplaner

Lars Wittrup Jensen* & Alex Landex, *lawj@transport.dtu.dk

Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Transport, Bygningstorvet 116B, 2800 Kgs. Lyngby

Abstrakt

Netværkseffekter i jernbanekøreplaner opstår, når en ændring ét sted i netværket forårsager ændringer andre steder i netværket grundet linjestruktur og korrespondancer i køreplanen. En præcis definition af denne type netværkseffekter gives, og måder at måle effekten beskrives. Da køreplaner for jernbanenetværk er meget komplekse, er det svært at vurdere ændringer for hele nettet, og dermed mulige netværkseffekter. Denne artikel gennemgår derfor også modeller og metoder, der kan bruges til at måle netværkseffekter og en passende model foreslås.

1 Indledning

Når ændringer i et jernbanenetværk og den dertilhørende køreplan planlægges, vurderes ændringen normalt kun lokalt på grund af den høje kompleksitet i et jernbanenetværk. Det betyder, at virkningerne af ændringen ikke evalueres uden for projektområdet, som kan føre til at fordele og ulemperne bliver overset. (Hansen. 2004, Hansen et al. 2006) beskrev dette og betegner det som netværkseffekter af jernbaneinvesteringer. Disse netværkseffekter opstår på grund af linjestrukturen i køreplanen og er emnet for denne artikel.

Den type netværkseffekt som er beskrevet af (Hansen. 2004) er blot én af mange. Udtrykket netværkseffekt er et generelt udtryk, der anvendes i mange forskningsområder uden nogen klar definition. Det kan generelt karakteriseres som effekten på et netværk som følge af en lokal implementering eller ændring. Indenfor jernbaner og offentlig transport har udtrykket forskellige betydninger. (Laconte. 2002) beskriver en netværkseffekt som at forbedre sammenhængen i netværket for passagerer med integreret billetsystem, chipkort eller andre forbedringer af passagergrænseflader. (Landex. 2008) definerer flere netværkseffekter, den ene af dem er netværkskapacitetseffekten i køreplanen, hvor det ikke er muligt at planlægge flere tog på en jernbanestrækning på grund af utilstrækkelig kapacitet på tilstødende linjer. Indenfor netværksplanlægning præsenterer (Nielsen and Lange. 2008, Nielsen et al. 2005) netværkseffekten som den effekt der opnås, når et offentligt transportsystem er fintmasket med mange skiftepunkter og en høj frekvens. I (van Oort. 2011) er netværkseffekten beskrevet som at overveje effekter i hele systemet, når offentlige transportsystemer evalueres, i modsætning til blot at overveje (lokale) linjeeffekter. Dette understøttes af (Jansson. 1996), som beskriver netværkseffekter som at betragte offentlige transportnetværk som netværk og ikke en række uafhængige ruter. Slutteligt, beskriver (Hansen. 2004) netværkseffekter af køreplansændringer på

en linje grundet afhængigheder i linjestrukturen (køreplanen) i netværket, og betydningen af dette, når infrastrukturprojekter evalueres.

De tre sidste definitioner af (van Oort. 2011, Jansson. 1996, Hansen. 2004) hænger sammen, og understreger vigtigheden af at betragte hele netværket og ikke bare linjer, når et offentlig transportnetværk designes, planlægges og evalueres. Betydningen af dette understøttes af en undersøgelse præsenteret i (Hansen. 2004, Hansen et al. 2006, Landex. 2008), der viser, at en udelukkende lokal evaluering af et projekt vil overse konsekvenserne af projektet i resten af netværket.

På nuværende tidspunkt har ikke megen forskning beskæftiget sig med dette problem, og emnet for denne artikel er derfor konsekvenserne af lokale (køreplans-) ændringer i jernbanenetværket som først beskrevet af (Hansen. 2004), og siden af (Hansen et al. 2006, Landex. 2008, Landex. 2012). Artiklen udvider tidligere forskning inden for denne type netværkseffekt ved en klar definition af, hvornår en netværkseffekt er en netværkseffekt, og hvornår det er en lokal effekt. På grund af kompleksiteten i køreplaner er netværkseffekter svære at måle. Mål for effekten, og hvordan disse mål kan beregnes ved hjælp af modeller præsenteres derfor også ved at gennemgå eksisterende litteratur og foreslå nye mål.

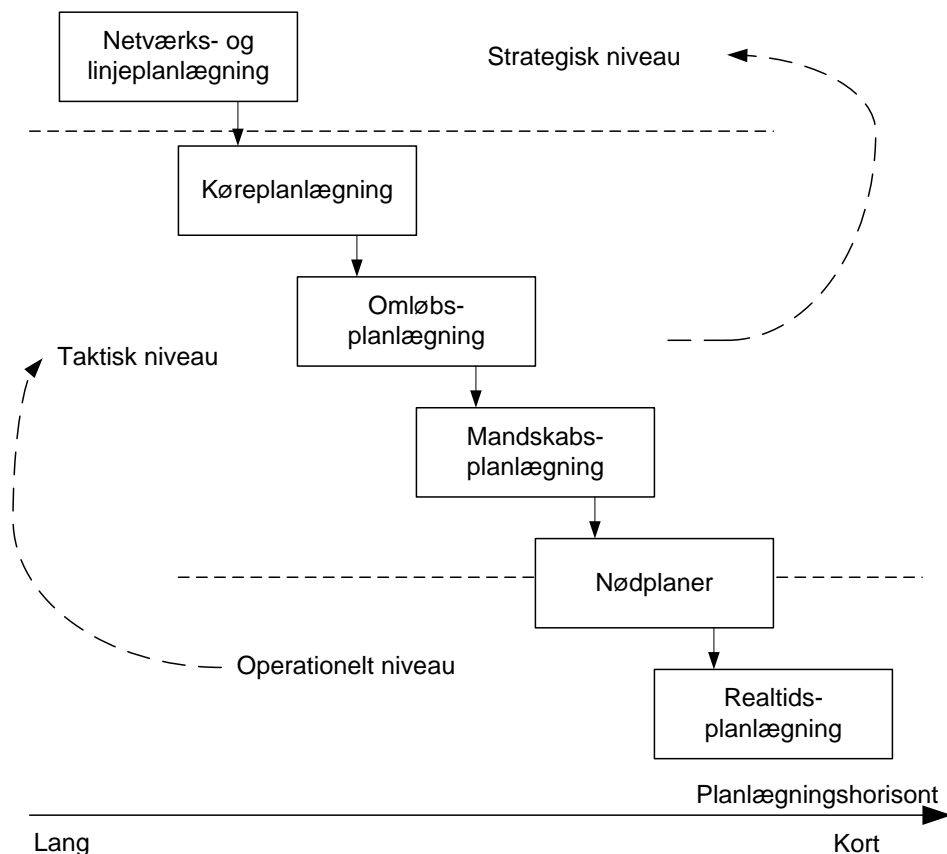
2 Netværkseffekter i jernbanekøreplaner

Netværkseffekter i jernbanekøreplaner opstår hovedsageligt på grund af køreplanlægningsprocessen. I de følgende afsnit er jernbanedriftsplanlægningsprocessen derfor beskrevet, definitionen af netværkseffekter diskuteres og specificeres tydeligere og endelig gennemgås eksempler på netværkseffekter i jernbanekøreplaner.

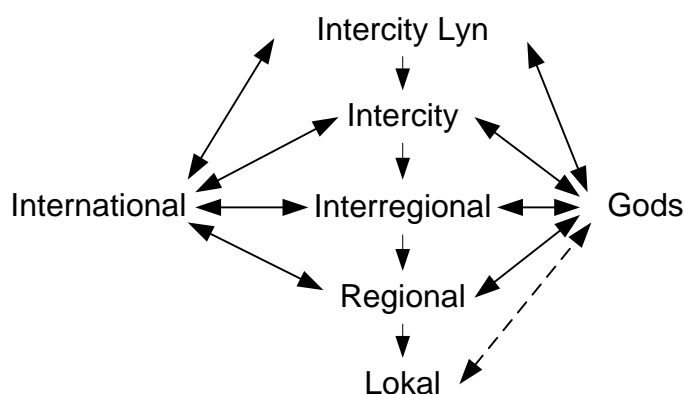
2.1 Jernbanedriftsplanlægningsprocessen

Planlægning af jernbanedriften kan opdeles i flere delprocesser, der tjener til at løse denne komplekse opgave. Ifølge (Ceder. 2007) kan processen for driftsplanlægning af offentlige transportsystemer opdeles i fire aktiviteter: netværksdesign, køreplansudvikling, omløbs-/materielplanlægning og mandskabsplanlægning. Dette understøttes af (Lusby et al. 2011, Kroon et al. 2008, Kaas. 1998). Ud over dette opdeler (Lusby et al. 2011) og (Kaas. 1998) delprocesserne i et strategisk, et taktisk niveau, og et operationelt niveau (indeholder realtidsplanlægning, ikke nævnt i (Ceder. 2007)). Figur 1 viser de forskellige delprocesser i driftsplanlægningsprocessen. Grundet kompleksiteten af hele processen for store systemer udføres de forskellige delprocesser i rækkefølge i stedet for samtidigt, hvor output fra en delproces er input til den næste (Ceder. 2007). Feedback til tidligere delprocesser sker normalt gradvist ved at forbedre driften, uden at foretage for mange ændringer.

I forbindelse med netværkseffekter i jernbanekøreplaner er denne proces afgørende for hvordan netværkseffekter opstår. Beslutninger foretaget på det strategiske niveau i netværks- og linjeplanlægning på grundlag af udbud og efterspørgsel, begrænser køreplanen i form af linjestruktur, stop og korrespondancer. Traditionelt er køreplaner udarbejdet på grundlag af køreplanlæggernes erfaringer og kvalifikationer, støttet af beslutningsstøttesystemer baseret på optimerings-, analytiske og simuleringsmodeller (Kroon et al. 2008). I Danmark og andre lande er der praksis for at planlægge køreplanen ved hjælp af et toghierarki (Hansen et al. 2006, Landex. 2008), jf. figur 2. Linjestruktur og stop er givet ud fra netværks- og linjeplanlægning sammen med en række yderligere begrænsninger. IC-tog er derefter planlagt først (højeste prioritet), efterfulgt af regionaltoget og lokale tog. Godstog samt internationale tog indpasses derefter i køreplanen. Prioriteringen af disse to typer kan ændre sig på baggrund af eksterne faktorer i tilstødende netværk. Denne praksis sikrer en høj kvalitet for de fleste passagerer, og der opnås samtidig en realistisk køreplan. Efterfølgende kan der foretages ændringer og der kan afviges fra hierarkiet for at forbedre kvaliteten af køreplanen. Dette omfatter (begrænset) feedback til netværks- og linjeplanlægning, hvor linjestruktur kan ændres for at forbedre den samlede drift.



Figur 1 – Jernbanedriftsplanlægningsprocessen. Baseret på (Lusby et al. 2011, Ceder. 2007, Kaas. 1998).



Figur 2 – Toghierarki. Baseret på (Landex. 2008).

På grund af linjestrukturen og toghierarkiet er der en stor risiko for, at en tilsyneladende lille ændring i køreplanen vil medføre ændringer i andre dele af køreplanen for at opfylde begrænsninger og opnå en realistisk køreplan, ikke kun på samme linje, men også andre steder i netværket. Fx. hastigheden opgraderes på en del af netværket, hvorved køretiden ændres og dermed også køreplanen på denne del af netværket. Afhængigt af linjestrukturen, skal køreplanen muligvis ændres i hele netværket. Den nye køreplan kan opfylde efterspørgslen bedre eller værre, men dette kan ikke opfanges i en evaluering af projektet, hvis kun en mindre del af netværket bliver vurderet.

2.2 Definition

Som tidligere nævnt kan netværkseffekter i jernbanekøreplaner defineres som:

“Netværkseffekter opstår når en ændring et sted i netværket resulterer i ændringer andetsteds i netværket selv langt fra den oprindelige ændring.” (Hansen et al. 2006)

(Landex. 2012) opdeler netværkseffekter i netværkseffekter i planlægningsprocessen og i nød-drift/uregelmæssig drift. Desuden skelner (Landex. 2012) mellem netværkseffekter for passagerer og for tog. I denne artikel betragtes kun netværkseffekter i planlægningsprocessen, men disse ligner netværkseffekter i uregelmæssig drift. Forskellen er at i planlægningsprocessen sker den oprindelige køreplansændring bevidst på et strategisk/taktisk niveau, mens det i den uregelmæssige drift (som regel) sker utilsigtet på det operationelle niveau.

I (van Oort. 2011) og (Jansson. 1996) skelnes der mellem linjeeffekter og netværkseffekter. Hvor en linje er en planlagt linje, som er en tog-, bus- eller sporvognsline planlagt over et givet sæt stoppesteder/stationer. I jernbanenetværk, løber nogle toglinjer gennem store dele af netværket, og det kan derfor være svært at skelne mellem linjeeffekter og netværkseffekter. Denne artikel foreslår derfor at definere linjer som toglinjesegmenter, hvor disse er toglinjer på sektioner af en jernbane mellem overgangsstationer og/eller endestationer. Hvis der foretages en køreplansændring på et toglinjesegment, og det kun påvirker den linje så defineres dette som en linje(segment)effekt. Hvis ændringen påvirker andre toglinjer, vil netværkseffekter forekomme. Dette er vigtigt i forhold til vurderingen af infrastrukturprojekter eller andre projekter, der kan forårsage køreplansændringer, da linjeeffekter af en indledende køreplansændring ikke medfører behovet for at udvide evalueringsområdet. På baggrund af dette foreslår denne artikel følgende definition på netværkseffekter i køreplaner:

“Hvis en indledende ændring i en køreplan på et toglinjesegment medfører ændringer på andre toglinjer, defineres disse efterfølgende ændringer som netværkseffekter”.

Derudover kan den indledende køreplansændring opdeles i tre kategorier:

- Køretidsændringer
- Ny korrespondance- eller koblingsbegrænsning
- Nye afgang eller toglinjer

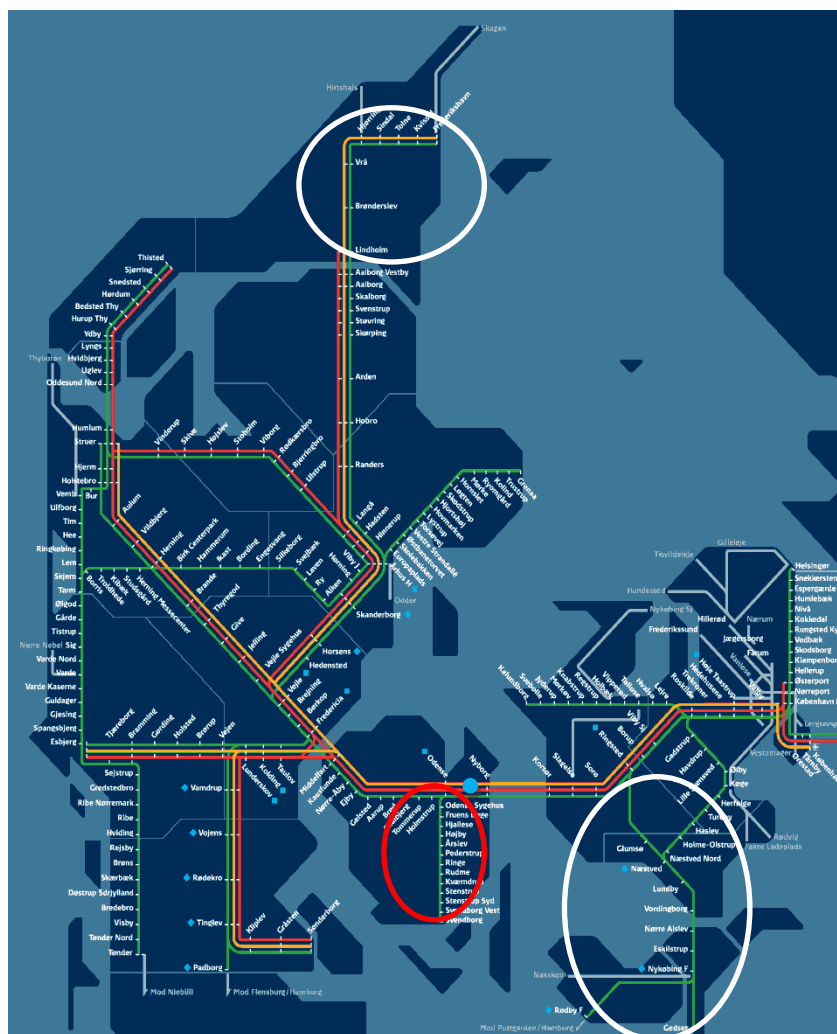
Køretidsændringen kan især være forårsaget af mange ting. Bl.a. ændring i strækningshastighed, nyt rullende materiel, oprettelse eller nedlæggelse af stoppesteder, osv. Både forøgelse og reduktion af køretiden kan føre til netværkseffekter. Men med faldende køretid, er det muligt at opretholde den oprindelige køretid, hvis påvirkningerne i netværket er for store. Der er normalt ikke denne mulighed ved forøgelse af køretider.

Hvis en ny korrespondance- eller koblingsbegrænsning introduceres på en linie vil det sandsynligvis blive nødvendigt at ændre afrejse- og ankomsttider hvilket kan forårsage netværkseffekter. I tilfælde af at afrejse/ankomst tider i køreplanen ikke ændres, kan det stadig forårsage netværkseffekter i uregelmæssig drift, når korrespondancer eller koblinger ikke kan overholdes. I nogle tilfælde er det ikke være muligt at opfylde en ny begrænsning uden at overtræde andre begrænsninger, hvorved indførelsen af en ny korrespondance eller kobling ikke er mulig.

Ved indførelse af nye toglinjer eller flere afgang på en eksisterende toglinje vil kapacitetsforbruget uundgåeligt stige. Dette kan forårsage netværkseffekter som følge af trængsel, da der er en risiko for at eksisterende afgang vil blive forskudt tidsmæssigt.

2.3 Eksempler

De følgende tre eksempler fra det danske jernbanenetværk viser, hvordan indledende køreplansændringer kan påvirke køreplanen i resten af netværket. Eksemplerne viser, hvordan et lokalt hastighedsopgraderingsprojekt, nyt rullende materiel og åbningen af en ny station kan påvirke hele netværket i Danmark, selv om den indledende køreplansændring kan virke lille.



Figur 3 – Linjestructur for regional- og fjerntog i Danmark.

(Hansen et al. 2006) viser, hvordan en indledende køreplansændring i den nordlige del af Jylland påvirker køreplanen for regionaltog i den sydøstlige del af Danmark (se figur 3). Dette sker da hastigheden opgraderes på den enkeltsporede strækning nord for Aalborg og køretiden som følge af dette reduceres. På grund af denne køretidsændring og da strækningen er enkeltsporet skal krydsningerne ændres på strækningen for at opnå køretidsbesparelsen. Da de tog, der kører på strækningen er en del af det landsdækkende IC-system, breder den indledende køreplansændring sig til andre toglinjer i netværket, der er afhængige af IC-service, f.eks. de regionale tog, der kører København-Nykøbing F i den sydøstlige del af Danmark. Hvor gode korrespondancer eksisterer, vil den indledende køreplansændring forværre korrespondancer, såfremt den forbindende toglinje ikke kan omlægges. På den anden side kan der også være fordele, hvor en dårlig korrespondance kan blive forbedret på grund af den indledende køreplansændring.

I 2011 testede DSB nyt rullende materiel på linjen mellem Odense og Svendborg på Fyn. Det rullende materiel (IC4) bruger mere tid end det eksisterende rullende materiel på dørlukning og afgangspåklæbning. Dette resulterer i længere holdetider og på grund af de mange stop på linjen var toget ikke i stand til at holde den nuværende køreplan på prøvekørslen. Dette betyder, at hvis denne form for rullende materiel skulle ibrugtages på linjen, vil den eksisterende køreplan skulle ændres. I tilfælde af linjen mellem Odense og Svendborg vil dette ville kun skabe en linjeeffekt, da togene på denne linje ikke kører på den øvrige del af netværket og samtidig har de lavere prioritet end andre tog på Odense station. Selv i tilfælde af, at det nye rullende materiel var i stand til at holde køreplanen på bekostning af køretidstillæg, vil dette føre til en mindre robust service, hvor der er en større risiko for spredning af forsinkelse (netværkseffekter i uregelmæssig drift).

Det er blevet besluttet at åbne en ny station i Langeskov mellem Odense og Nyborg på Fyn. Østfyn betjenes i øjeblikket kun af intercitytog. Indføres der et ekstra stop på en af de eksisterende toglinjer vil dette forlænge køretiden med 2-3 minutter. Da Intercitytogene kører gennem en stor del af Danmark, og har en høj prioritet, kan det have en enorm indflydelse på netværket, hvis køretiden (og dermed køreplanen) for en af intercitytogslinjerne ændres. Alternativt kan regionaltogslinjen mellem Fredericia og Odense udvides til Korsør for at servicere den nye station. Dette vil have en mindre indvirkning på netværket, da kapacitetsforbruget på det østlige Fyn er lavt, men driftsøkonomien kan være dårlig på grund af antallet af passagerer.

3 Mål for netværkseffekter

Uanset om den oprindelige ændring i køreplanen er lille eller stor, skyldes ændringer i infrastruktur eller rullende materiel, i passager- eller operatørbehov, er de samlede konsekvenser i køreplanen vanskelige at vurdere, som det ses i eksemplerne. Det er normalt forholdsvis enkelt at vise, om en lille ændring på en toglinje påvirker resten af netværket. Men det er vanskeligt at estimere omfanget af ændringer, og om de er positive eller negative. Litteraturen foreslår, at planlagt ventetid kan bruges til at måle netværkseffekter, hvilket beskrives i afsnit 3.1. I afsnit 3.2 og 3.3 foreslås to supplerende mål af denne artikel, som kan bruges til at måle netværkseffekter i køreplaner. I afsnit 4 gennemgås det hvordan disse mål kan beregnes.

3.1 Planlagt ventetid

(Hansen. 2004, Hansen et al. 2006, Landex. 2008) foreslår, at planlagt ventetid kan anvendes som et mål for netværkseffekter i køreplaner. Planlagt ventetid forekommer i køreplansprocessen på grund af eksempelvis trængsel/konflikter (begrænset kapacitet) og planlagte korrespondancer og kan sammenlignes med forsinkelser (ventetid) i uregelmæssig drift (Wendler. 2007). Det er vigtigt at bemærke, at ikke alt planlagt ventetid i en køreplan skyldes netværkseffekter. Derfor bør man sammenligne en køreplan med en mulig køreplan, hvor en indledende køreplansændring er implementeret. Hvis det er muligt, bør den planlagte ventetid kategoriseres efter årsag for at opnå mere detaljerede resultater.

3.2 Driftspålidelighed

Et parameter, der ofte overses inden for offentlige transport er pålidelighed. Normalt opnås de fleste gevinster i en cost-benefit-analyse, inden for det offentlige transportområde, fra rejsetidsreduktioner. Driftspålidelighed kan dog ofte bidrage med store gevinster på grund af øget pålidelighed (van Oort. 2011). I forhold til netværkseffekter i køreplaner, kan indledende køreplansforandringer forårsage pålidelighedsændringer i netværket. I køreplaner kan dette være forårsaget af ændringer i buffertider mellem togene i netværket. Planlagt ventetid tager ikke højde for dette, da det indikerer forlængelse af rejsetiden.

3.3 Kapacitetsudnyttelse

Netværkseffekter i køreplanen kan også udtrykkes i ændringer i kapacitetsforbruget. I netværk med heterogen drift afhænger kapacitetsforbruget af togrækkefølgen. En ændring i togrækkefølgen i netværket på grund af en indledende lokal ændring kan medføre ændringer i kapacitetsforbruget for hver jernbanelinje. Dette mål er relateret til driftspålidelighed og planlagt ventetid, da en ændring i kapacitetsforbruget vil påvirke de to andre mål, især hvis kapacitetsforbruget er højt (på grund af lave buffertider).

4 Metoder til at beregne mål

For at vurdere netværkseffekter og beregne mål for disse i form af planlagt ventetid, driftspålidelighed og kapacitetsudnyttelse kan analytiske metoder eller køreplansgenerering benyttes. Køreplansgenerering kan bruges til at vurdere ændringer i driftsoplægget, infrastrukturen, det rullende materiel mv. for hele netværket før og efter ændringen. At gøre dette manuelt er en omstændelig proces og ikke en mulighed i store netværk. Køreplansgenerering kan ske ved hjælp af simulering eller optimering, beskrevet og gennemgået i afsnit 4.2. Ved brug af analytiske metoder kan mål vurderes på grundlag af linjestructur, frekvens, infrastrukturen og det rullende materiel, disse metoder er dog ikke nærmere beskrevet her, da de har en del

mangler i forhold til vurdering af netværkseffekter. I afsnit 4.1 er detaljeringsgraden i infrastrukturmodellering og betydningen heraf beskrevet.

4.1 Infrastrukturmodellering

Infrastrukturmodellen er grundlaget for enhver model, der anvendes til at analysere et jernbanesystem eller dele heraf. Moderne infrastrukturmodeller benytter grafteori til at repræsentere spor, signaler, sporskifter mv. i form af knuder og kanter (Radtke. 2008). Detaljeringsgraden i en infrastrukturmodel kan være makroskopisk, mikroskopisk eller mesoskopisk (i mellem).

I en makroskopisk infrastrukturmodel, modelleres jernbanesystemet meget enkelt, hvor knuder repræsenterer stationerne og linjen mellem er repræsenteret som kanter. Køretider og minimum togfølgetider, beregnet på grundlag af makroskopiske infrastruktur data, er grove skøn. Desuden er toglængde og køretidstillæg typisk ikke inkluderet. Den makroskopiske model er god til store netværk, da den er hurtig og kræver en lille mængde input. Præcisionen er dog lav og kvaliteten af output er ikke god nok til grundige analyser på grund af grove skøn af køretider samt dårlig konfliktdetektering. For tidlige planlægningsfaser på det strategiske niveau er metoden god, men er uegnet til generering af køreplaner (Radtke. 2008).

Modsat den makroskopiske model er der den mikroskopiske infrastrukturmodel, som kræver detaljeret input til modellering af togfølge- og køretider mere præcist. Signaler, sporskifter, hastighedstavler, mm. modelleres som knuder og sporsektionerne mellem dem som kanter (Radtke. 2008). Da de mikroskopiske modeller kræver mere input er det indledende arbejde større. Til gengæld opnås mere præcist output, hvilket gør de mikroskopiske infrastrukturmodeller mere velegnet til dybdegående analyse. Mikroskopiske infrastrukturmodeller kræver lange beregningstider på grund af den øgede kompleksitet, hvilket gør dem uegnede til store netværk.

Mesoskopiske modeller kombinerer elementer fra mikroskopiske og makroskopiske modeller for at øge præcisionen i forhold til makroskopiske modeller og samtidig reducere beregningstider og input, der kræves i forbindelse med mikroskopiske infrastrukturmodeller.

4.2 Generering af køreplaner ved simulering og operationsanalyse

Ved brug af automatisk køreplansgenerering, på basis af infrastruktur, rullende materiel, linjestructur og frekvenser, er det muligt at vurdere omfanget af netværkseffekter forårsaget af en lokal ændring. En køreplan genereres før og efter ændringen i input (fx infrastrukturoppgradering, nyt rullende materiel, ekstra stop, etc.). De to køreplaner kan derefter evalueres ved hjælp af de mål beskrevet i afsnit 3. Brugen af simuleringmodeller til at generere køreplaner garanterer ikke en optimal køreplan. Der er derfor risiko for at basiskøreplanen er tættere på en optimal køreplan end køreplanen i scenariet eller omvendt, hvilket skaber usikkerhed i målene og dermed evalueringen. I princippet er det muligt at finde den optimale køreplan ved hjælp af kombinatoriske optimeringsmodeller og dermed fjerne usikkerheden i evalueringen. Grundkompleksitetsproblemer er det dog ikke muligt at finde en optimal køreplan i store netværk. Øvre grænser kan dog normalt beregnes, hvilket angiver kvaliteten af den genererede køreplan. I de følgende to afsnit, vil køreplansgenerering ved hjælp af simulering og optimering blive beskrevet og eksempler på modeller og formuleringer vil blive givet.

4.2.1 Simulering

Køreplansgenerering ved hjælp af simulering, uanset detaljegraden i simuleringen, kan enten ske ved en synkron fremgangsmåde eller asynkron fremgangsmåde. I den asynkrone fremgangsmåde planlægges togene i rækkefølge baseret på det enkelte togs prioritet (Siefer. 2008, Jacobs. 2008, Nash and Huerlimann. 2004, Kaas. 1998). Dette svarer til det naturlige forløb i køreplanlægningen (jf. afsnit 2.1) (Jacobs. 2008, Kaas. 1998). Den asynkrone fremgangsmåde har den fordel, at konfliktfri køreplaner kan genereres hurtigt og deadlocks kan undgås. En ulempe ved denne fremgangsmåde er afhængigheden af togprioriteringer, som kan føre til store mængder af planlagt ventetid for lavere prioriterede tog, hvilket resulterer i en køreplan af lav kvalitet (Kaas. 1998).

Den synkrone simuleringstilgang benytter den traditionelle diskrete tidsmodel, hvor togene planlægges samtidig inden for et givent diskret tidsinterval (Jacobs. 2008). Den synkrone tilgang er ikke i stand til at forudse konflikter i forvejen, som det er muligt med den asynkrone tilgang. Kun ganske indlysende konflikter kan opdages og der er derfor risiko for deadlocks. Mens den asynkrone tilgang afspejler køreplansprocessen godt, afspejler den synkrone tilgang selve driften bedre end den asynkrone tilgang.

Et eksempel på en simuleringstilgang er SCAN- modellen (Strategic Capacity Analysis of Networks), der blev udviklet i 1998 i Danmark. Modellen anvender en mesoskopisk tilgang til at repræsentere infrastrukturen. Modellen genererer et stort antal køreplaner, hvor togene starter tilfældigt i hver genereret tidsplan. Modellen anvender en synkron tilgang til at planlægge tog, og ved at prioritere tog er det muligt at løse konflikter der opstår til fordel for det vigtigste tog. Modellen gør det muligt at vurdere netværkseffekter, og er også den model, der anvendes i studiet af den nye jernbane mellem København og Ringsted som er beskrevet i (Hansen. 2004, Hansen et al. 2006, Landex. 2008). Modellens primære formål er at evaluere kapaciteten i et jernbanesystem, og identificere flaskehalse (Kaas. 1998). Til dette formål anvendes nu primært mikroskopiske simuleringsværktøjer og SCAN-modellen er ikke længere i brug.

To af de mest populære simuleringsværktøjer til rådighed, er OpenTrack og RailSys. Disse systemer genererer dog ikke køreplaner, men er målrettet mod simulering af jernbanedrift/forsinkelser baseret på en given køreplan. Begge systemer bruger en mikroskopisk infrastrukturmodel og en synkron planlægningstilgang til at løse konflikter, der opstår på grund af forsinkelser (Nash and Huerlimann. 2004, Bendfeldt et al. 2000). Grundet disse programmets fokus på simulering af forsinkelser, er det ikke direkte muligt at bruge dem til at måle netværkseffekter i planlægningsprocessen uden en potentiel høj mængde af manuelt arbejde. De kan dog bruges til at måle netværkseffekter i uregelmæssig drift ved evaluering af spredning af forsinkelse. På grund af den mikroskopiske repræsentation af infrastrukturen opnås en høj præcision på bekostning af kompleksitet.

Andre synkrone modeller er VISION, RailPlan, SIMONE, FALKO, TRANSIT, RAILSIM og RTC (Siefer. 2008). Mens andre asynkrone modeller er ASDIS, BABS og STRESI (Siefer. 2008, Jacobs. 2008). Nogle af disse benytter også optimeringsmodeller til at løse delproblemer i planlægningen.

4.2.2 Optimeringsmodeller

Generelt kan generering af køreplaner ved hjælp af kombinatoriske optimeringsmodeller opdeles i planlægningen (afgangs- og ankomsttider) af jernbanedrift og valg af togveje gennem stationerne (Kroon et al. 2008). I de nuværende optimeringsmodeller løses de to trin individuelt i stedet for i en integreret tilgang, grundet kompleksitetsproblemer, især når komplekse stationer betragtes (Lusby et al. 2011).

Den mest anvendte optimeringsmodel for cykliske køreplaner er PESP (the periodic event scheduling problem) (Kroon et al. 2008), og blev oprindeligt foreslået af (Serafini and Ukovich. 1989). PESP dækker dog kun planlægning af afgang- og ankomsttider, og ikke valg af togveje gennem stationerne (Liebchen and Möhring. 2007, Kroon et al. 2008). Den reelle gennemførlighed af køreplansløsningen er derfor ikke garanteret, da valg af togveje på stationer kan føre til konflikter, der vil resultere i at løsningen reelt ikke kan bruges. Desuden betyder det også, at PESP ikke producerer en endelig køreplan, da valg af togveje og persontog stadig skal foretages.

Optimeringsproblemet vedrørende valg af togveje gennem stationer kan modelleres ved hjælp af konfliktgrafer, constraint programming, set packing, alternative grafer, multicommodity flow eller generalized set packing. (Lusby et al. 2011) har gennemgået litteraturen, hvor de forskellige modeller og løsningsmetoder er benyttet (fx heuristiske, branch-&-cut/bound, graph coloring eller constraint propagation). Konfliktgrafer er den mest anvendte model til at repræsentere optimeringsproblemet vedrørende valg af togveje gennem stationer (Lusby et al. 2011).

Selvom mulige løsninger kan findes for selv store netværk, er en genereret køreplans gennemførlighed relateret til modelformuleringen og er derfor måske ikke mulig at gennemføre i virkeligheden. Dette skyldes den trinvis metode til at generere køreplaner, og det faktum at infrastrukturen ofte er repræsenteret på det makroskopiske til mesoskopisk niveau. Ved at integrere de to trin kan en køreplan af højere kvalitet opnås (Kroon et al. 2008). Også kombinationen med konfliktløsning baseret på en mikroskopisk infrastrukturmodel kan forbedre gennemførligheden ved at fjerne løsninger, der er mulige ifølge optimeringsmodellerne, men ikke af den mikroskopiske model.

5 Konklusion

Nærværende artikel har beskæftiget sig med netværkseffekter i køreplaner, hvor en lokal køreplansændring kan forplante sig til andre steder i netværket på grund af linjestruktur og korrespondancer i køreplanen. Denne type netværkseffekt er i høj grad afhængig af, hvor den indledende ændring er foretaget, og hvis toglinjen, som indledningsvis påvirkes, løber gennem store dele af nettet, eller kun på en sekundær linje. I det første tilfælde er risikoen for netværkseffekter høj, mens det sjældent vil være tilfældet for den sekundære linje. Denne artikel foreslår, at konsekvenser af en indledende ændring defineres som en linje-effekt, hvis ændringen kun påvirker et toglinjesegment mellem overgangs- og/eller endestationer. Hvis ændringen påvirker flere linjesegmenter vil netværkseffekter forekomme.

Netværkseffekter kan måles ved planlagt ventetid, driftspålidelighed/robusthed og kapacitetsudnyttelse. For at beregne disse mål kan analytiske metoder anvendes eller køreplaner før og efter en ændring kan genereres. Målene kan derefter beregnes ud fra disse genererede tidsplaner.

En gennemgang af køreplansgenerering i denne artikel viser, at køreplaner kan genereres ved hjælp af optimerings- eller simuleringsmodeller. Simuleringsmodeller kan adskilles i modeller der benytter asynkron scheduling og modeller der benytter synkron scheduling. Da de forskellige tilgange har forskellige fordele og ulemper, foreslår denne artikel, at den bedste model til at generere køreplaner for at evaluere jernbanenet er en simuleringsmodel der benytter primært asynkron planlægning med synkron elementer og evt. kombinatorisk optimering i stationsområder. Detaljeringsgraden i infrastrukturmodellen skal være mesoskopisk for at opnå en passende præcision uden at øge kompleksiteten for meget. En model som denne eksisterer endnu ikke, men en sådan model vil gøre det muligt at vurdere effekterne af indledende ændringer på netværksniveau. Dette vil hjælpe køre- og infrastrukturplanlæggere til hurtigt og nemt at estimere netværkseffekter, sammenlignet med metoder og modeller til rådighed i dag.

Tak til

Forskningen i forbindelse med denne artikel er en del af forskningsprojektet RobustRails, som er finansieret af Det Strategiske Forskningsråd.

Referencer

Bendfeldt, J., Mohr, U. and Müller, L. (2000) RailSys, a system to plan future railway needs, pp. 249-255.

Ceder, A. (2007) Public transit planning and operation: theory, modeling and practice: Elsevier, Butterworth-Heinemann).

Hansen, S. (2004) Store transportinfrastrukturprojekter og deres strategiske virkninger med særlig fokus på effekter for virksomheder.

Hansen, S., Landex, A. and Kaas, A.H. (2006) The network effects of railway investments, 88, pp. 45-54.

- Jacobs, J. (2008) Rescheduling, in: I.A. Hansen and J. Pahl (Eds.) *Railway Timetable & Traffic*, pp. 182-191: *Railway Timetable & Traffic*).
- Jansson, K. (1996) Welfare and markets in passenger transport, *International Journal of Social Economics* , 23(10), pp. 120-136.
- Kaas, A.H. (1998) *Metoder til beregning af jernbanekapacitet*: Ph. D.-afhandling: Institut for Planlægning, Danmarks Tekniske Universitet).
- Kroon, L., Huisman, D. and Maróti, G. (2008) *Optimisation Models for Railway Timetabling*, in: I.A. Hansen and J. Pahl (Eds.) *Railway Timetable & Traffic*, pp. 135-154: Eurailpress).
- Laconte, P. (2002) Smart Segments for Urban Public Transportation: An International Survey of Practices, *Jpn Railw Transp Rev* (32), pp. 4-11.
- Landex, A. (2008) *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*.
- Landex, A. (2012) Network effects in railways, *WIT Transactions on the Built Environment* , 127, pp. 391-402.
- Liebchen, C. and Möhring, R.H. (2007) The Modeling Power of the Periodic Event Scheduling Problem: Railway Timetables - and Beyond, in: F. Geraets, L. Kroon, A. Schoebel, D. Wagner and C. Zaroliagis (Eds.) *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, pp. 3-40: Springer Berlin Heidelberg).
- Lusby, R.M., Larsen, J., Ehrgott, M. and Ryan, D. (2011) Railway track allocation: models and methods, *OR spectrum* , 33(4), pp. 843-883.
- Mussone, L. and Wolfler Calvo, R. (2013) An analytical approach to calculate the capacity of a railway system, *European Journal of Operational Research* .
- Nash, A. and Huerlimann, D. (2004) Railroad simulation using OpenTrack, *Computers in railways IX* , pp. 45-54.
- Nielsen, G., Nelson, J., Mulley, C., Tegner, G., Lind, G. and Lange, T. (2005) *Public Transport-Planning the Networks-HiTrans Best Practice Guide 2*.
- Nielsen, G. and Lange, T. (2008) *Network Design for Public Transport Success—Theory and Examples*, Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo .
- Radtke, A. (2008) *Infrastructure Modelling*, in: I.A. Hansen and J. Pahl (Eds.), pp. 43-57 (Hamburg, Germany: Eurail Press).
- Serafini, P. and Ukovich, W. (1989) A mathematical model for periodic scheduling problems, *SIAM Journal on Discrete Mathematics* , 2(4), pp. 550-581.
- Siefer, T. (2008) *Basics of Railway Simulation*, in: I.A. Hansen and J. Pahl (Eds.) *Railway Timetable & Traffic*, pp. 155-169: Eurailpress).
- van Oort, N. (2011) *Service reliability and urban public transport design* (Delft: TRAIL Research School).

Wendler, E. (2007) The scheduled waiting time on railway lines, *Transportation Research Part B* , 41(2), pp. 148-158.