

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](http://www.trafikdage.dk/artikelarkiv)

# Kvantificering samt forbedring af robusthed og punktlighed i jernbanetransport - en gennemgang af litteraturen

*Jens Parbo\*, Otto Anker Nielsen, Carlo Prato & Alex Landex,*

*Jepar@transport.dtu.dk*

*DTU Transport*

## Abstrakt

I denne artikel gennemgås studier, der har beskæftiget sig med punktlighed og robusthed indenfor jernbanedrift. For disse to servicemål undersøges det hvilke definitioner og kvantificerbare mål litteraturen har benyttet sig af op til i dag. Ligeledes undersøges det også, hvilke metoder der har været anvendt til at forbedre jernbanedriften. Dette studie fremhæver forskellen mellem tog- og passagerforsinkelser samt at måden hvorpå passagerernes rutevalg er estimeret, har signifikant indflydelse på korrektheden af resultaterne når beregnede resultater sammenlignes med virkeligheden. Baseret på denne gennemgang af litteraturen foreslås slutteligt nogle retningslinjer for fremtidige perspektiver.

## Introduktion

De seneste år har danske politikere haft stort fokus på offentlig transport. I en politisk aftale fra 2013 blev det besluttet at øremærke mere end 27 milliarder danske kroner til en opgradering af de danske jernbaner (Transportministeriet, 2013). Fire år forinden blev en anden aftale indgået. Denne aftale fra 2009 sagde at den fremtidige vækst i transport primært skulle ske ved en stigning i offentlig transport (Transportministeriet, 2009). Aftalen fra 2013 sikrer at infrastrukturen i fremtiden vil være i stand til at imødekomme denne stigning i transport. Når infrastrukturen er på plads er det herefter op til planlægger at få planlagt en togdrift, hvor staten får mest tog for pengene. For at opnå den ønskede stigning i antallet af ture taget med offentlig transport ønskes en robust og pålidelig jernbanedrift. Robuste køreplaner og pålidelig drift vil være med til at gøre jernbanen attraktiv, både for eksisterende men også for potentielle kunder. Tabellerne herunder viser henholdsvis passagerkilometer og kilometer jernbane i det meste af verden.

**Tabel 1 – Passagerkilometer (milliarder)**

	2006	2011	Ændring i %
Europa	464,5	485,6	4,54
Amerika	12,8	20,8	62,5
Asien og Mellemøsten	1646,0	2187,8	32,92
Verden (eksl. Rusland og Afrika)	2123,3	2694,2	26,89

Tabel 2 – Kilometer jernbane

	2006	2011	Ændring i %
Europa	264 204,9	270 341,9	2,32
Amerika	285 272,2	369 222,0	-4,17
Asien og Mellemøsten	221 788,0	233 570,4	5,31
Verden (eksl. Rusland og Afrika)	871 265,1	873 134,3	0,21

Tendensen her er at antallet af passagerkilometer har været stigende mens infrastrukturen ikke har ændret sig tilsvarende (UIC, 2011).

Kapacitetsudnyttelsen er altså steget i det meste af verden. Derfor er behovet for robuste køreplaner i fremtiden endnu større, såfremt den leverede togdrift skal være pålidelig.

Dette studie gennemgår eksisterende metoder til at kvantificere og forbedre robusthed og punktlighed på det strategisk/taktiske planlægningsniveau indenfor jernbanetransport. At være bekendt med de eksisterende metoder er essentielt når fremtidige forskningsretninger omhandlende disse to servicemål skal fastlægges.

Denne artikel er struktureret på følgende vis. Efter denne introduktion gennemgås i andet afsnit forskellige definitioner og kvantificerbare mål for robusthed. Tredje afsnit viser hvorledes kvaliteten af servicemål kan forbedres. Afsnit fire indeholder en konklusion samt forslag til fremtidige forskningsretninger.

## Kvantificering af service mål

I dette afsnit gennemgås eksisterende definitioner og kvantificerbare mål for robusthed og punktlighed anvendt indenfor jernbanesektoren. Et godt kvantificerbart mål skal være i stand til at afspejle det leverede serviceniveau og hjælpe med at diagnosticere uregelmæssigheder samt lokalisere deres årsag (Carrasco, 2012). Måden hvorpå servicemålene kvantificeres er af ganske stor interesse, da den valgte metode i nogle tilfælde kan være med til at skævvride billedet af jernbanedriften når denne undersøges. Ydermere kan det faktum at en given egenskab måles medføre at der lægges ekstra vægt på denne fra operatørernes side i forhold til ikke målte egenskaber (Landex, 2007).

En robust jernbanedrift er ofte ensbetydende med at små forstyrrelser kan absorberes af køreplanens tidstillæg.

Punktligheud anvendes af jernbaneoperatører som servicemål for hvor mange tog der ankommer på udvalgte målestationer indenfor en given tidsmargin fra den planlagte. Robusthed og Punktligheud har en klar fællesnævner. En robust jernbanedrift reducerer risikoen for forsinkelser, og i fald forstyrrelser forekommer, vil disse, op til en vis størrelse, absorberes i køreplanen, hvilket medfører et højt niveau af punktlighed.

De betragtede servicemål i denne artikel er begge driftsrelaterede. Når der tales om driftsrelaterede servicemål er også pålidelighed interessant at undersøge. Pålidelighed er ofte brugt som en generel term, der afspejler jernbanedriftens serviceniveau (Vromans et al, 2006). Mens operatørerne måler pålidelighed i antal tog der kører efter planen, regelmæssige togfølgetider samt minimering af rejsetidsafvigelser, så oplever passagererne primært pålidelighed gennem niveau af punktlighed og varierende rejsetider (Carrasco, 2012). Som det ses falder både robusthed og punktlighed ind under definitionen af pålidelighed. Det valgte fokus på punktlighed og robusthed fremfor andre servicemål som eksempelvis frekvens og kapacitet skyldes at robustheds- og punktlighedsniveauet ofte kan forbedres med færre omkostninger. Ændring af frekvens og kapacitet er oftest efterspørgselsorienterede strategiske beslutninger, der kræver infrastrukturudvidelser eller indkøb af ekstra togsæt.

## Robusthed

Robusthed er et relativt nyt emne indenfor jernbanedrift og har derfor ikke fået lige så meget opmærksomhed som punktlighed eller pålidelighed. Af samme årsag mangler der også stadigt et alment accepteret kvantificerbart mål for robusthed (De-Los-Santos et al, 2012). Dewilde et al (2011) savner ligeledes et alment mål for robusthed. Samtidig undrer det dem at på trods af den forskning, der har beskæftiget sig med robusthed, så synes der at være fravær af en universel enighed om hvad en robust køreplan indebærer.

Indtil nu har studierne, hvor robusthed har været undersøgt og forsøgt forbedret, prøvet at komme med en verbal definition af robusthed, der vil kunne bakke deres optimering af jernbanedriften op. Ved at gennemgå disse studier afsløres manglen på en fælles definition. De første verbale definitioner af robusthed indenfor jernbanedrift fokuserede alene på køreplanens evne til at absorbere mindre forstyrrelser (fx. Medeossi et al, 2009; Salido et al, 2008; Vromans, 2005; Cacchiani et al, 2009; Bush, 2006). Senere har nogle verbale definitioner også forsøgt at inkludere effektiviteten af jernbanedriften (fx. Dewilde et al 2011 & 2013; Schöbel & Kratz, 2009).

Robusthed opfattes generelt som køreplanens evne til at absorbere og modstå de forsinkelser togene påfører hinanden (kendt som sekundære forsinkelser). Initiale forsinkelser skyldes ofte udefrakommende faktorer og er derfor til en vis grad uundgåelige. Sekundære forsinkelser forekommer derimod ofte som følge af en kompakt køreplan. Denne balancegang mellem en kompakt køreplan med høj kapacitetsudnyttelse, der i tilfældet hvor ingen driftsforstyrrelser opstår, vil være i stand til at imødekomme flest mulige tog og så på den anden side en robust køreplan, der kan absorbere nogle af de forstyrrelser, er en af køreplansplanlæggernes store udfordringer. Forskellen mellem en optimal kompakt køreplan og en robust køreplan er i litteraturen kendt som *price of robustness* (Schöbel & Kratz, 2009).

Håndtering af robusthed indenfor jernbanedriften foregår ofte på to planlægningsniveauer. På det strategisk/taktiske niveau, hvor tidstillæg indlægges i den kompakte køreplan. Her er den store udfordring hvor tidstillægene placeres og hvor store disse skal være for at få den optimale *price of robustness* (Cacchiani & Toth, 2012).

### Parametre med indflydelse på robusthed

Ifølge et studie af Salido et al (2012) så er robusthed en afvejning mellem at reducere optimalitet (eksempelvis ved at indlægge tidstillæg eller buffertid), mindske heterogeniteten (eksempelvis ved at harmonisere stoppemønstre og hastigheder), finde den optimale fart (for lav og for høj fart medfører øget blokstørrelser) samt sænke kapacitetsudnyttelsen (eksempelvis ved at indlægge buffertid mellem togene, der anvender samme togspor). Dette bakkes op af Yuan og Hansen (2007), der også uddyber de forskellige parametres effekt. De udviklede en stokastisk model til at estimere hvorledes forsinkelser spreder sig i jernbanenettet fra togstationerne. På baggrund af denne model konkluderes det, at den gennemsnitlige sekundære forsinkelse toge påføres, når de passerer en station, stiger eksponentielt i takt med mindskningen af buffertiden mellem to på hinanden følgende tog. Fra studiet Yuan og Hansen af (2007) blev det gjort klart at kapacitet, men i høj grad også interaktioner mellem toge, har stor indflydelse på jernbanedriftens robusthed, hvilket underbygges i (Schöbel & Kratz, 2009). Et andet studie, der fremhæver effekten af togenes interaktion på robusthed er lavet af Goverde (2010). Han udviklede en model baseret på max-plus algebra til beregning af hvordan initiale forsinkelser spredes i et jernbanenetværk. Han forklarer yderligere at spredning af forsinkelser afhænger af netværkets struktur, deraf interaktioner mellem tog, samt fordelingen af tidstillæg og buffertid.

### Mål for robusthed

Som pointeret tidligere, så savnes der en almen anerkendt definition samt kvantificerbart mål af robusthed indenfor jernbanedrift. Selvom et alment mål for robusthed ikke eksisterer, findes der flere forskellige bud på hvordan robusthed bør defineres og måles. En af vanskelighederne i at definere og måle robusthed er kompleksiteten og det faktum at så mange parametre har indflydelse på robustheden indenfor jernbanedrift.

Et af de første studier, der adresserede robusthed indirekte var (Vromans, 2005). Han fokuserede alene på heterogeniteten af jernbanedriften. I den forbindelse blev to mål for heterogenitet udviklet.

$$SSHR = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^-}$$

$$SAHR = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^A}$$

Første kvantificerbare mål er *SSHR*, *Sum of Shortest Headway Reciprocals*. Her refererer  $h_i$  til den mindste planlagte afstand i tid mellem tog  $i$  og  $i+1$ . Dette mål antager implicit at afstanden mellem to tog ved afgang fra en station er ligeså vigtig som afstanden ved ankomsten til en station. Imidlertid ser det ud til at afstanden ved ankomst er mere vigtig når det kommer til spredning af sekundære forsinkelser (Vromans, 2005). For at tage højde for dette blev *SAHR*, *Sum of Arrival Headway Reciprocals*, udviklet. Dette mål betragter kun afstanden mellem to på hinanden følgende tog ved ankomst til en station,  $h_i^A$ . Omend *SAHR* var en videreudvikling af *SSHR*, så mente Vromans at målet kom til kort fordi det er enkelt-punkts mål, som ikke tager højde for afstanden mellem togene mellem stationerne. Derfor endte han med at anbefale et heterogenitetsmål der er et vægtet gennemsnit af *SSHR* og *SAHR*, som det mest retvisende.

Som det er set benytter flere en verbal definition af robusthed, der henviser til evnen til at absorbere eller modstå mindre forsinkelser. Dog er det de færreste der reelt angiver en størrelse af hvad 'mindre' forsinkelser dækker over. Nogle af de første til at omtale forsinkelsernes størrelse eksplicit var Schöbel og Kratz (2009), der udviklede robusthedsmål, der teoretisk set vil kunne absorbere forsinkelser af enhver størrelse.

To af dem er vist herunder.

$$R_{no}(s, V) \quad R_{del}(s, V)$$

Det første af de to refererer til det maksimale antal passagerer, der vil miste en korrespondance hvis alle forsinkelser er mindre end  $V$ , mens det andet dækker over den maksimale sum af alle passagerers forsinkelser såfremt forsinkelser holdes mindre end  $V$ . For begge af disse mål gælder at  $s$  er køreplanen. Idéen bag disse to mål er at finde den optimale brug af tidstillæg i forhold til balancen mellem berørte passagerer og jernbanesystemets effektivitet, kendt som *price of robustness*.

Salido et al (2008) foreslår at måle robusthed for dobbeltsporede strækninger med en slags robustheds indikator  $R(x)$ . Idéen er at bevæge sig væk fra kun at betragte én parameters indflydelse på driftens robusthed.

Som det fremgår af nedenstående tages flere forskellige parameter i betragtning når robustheden bestemmes.

$$R(x) = \sum_{T=1}^{NT} \sum_{S=1}^{NS} Buff_{TS} * \%Flow_{ST} * TT_S * NSucT_T * (NS - S)/NS$$

En væsentlig ting i forhold til dette robusthedsmål er, at i den nuværende udgave er målet ikke universelt. Det giver derfor kun mening at bruge målet som sammenligning mellem to køreplaner for det samme netværk. Robusthedsmålet eller indikatoren betragter følgende parametre:

- Buffer tid
- Passager flow
- Tætheden af tog
- Antallet af tog
- Antallet af stop

Andre studier, der har inkluderet flere parametre i bestemmelsen af et jernbanenetværks eller en køreplans robusthed er Medeossi et al (2009), der i særdeleshed kigger på balancen mellem punktlighed og kapacitetsudnyttelse, hvilket også Armstrong (2012) gør. Han forsøger ydermere at minimere kapacitetsudnyttelsen, og som følge deraf at maksimere pålideligheden og potentialet for at indsætte ekstra tog da kapaciteten er reduceret.

Dewilde et al (2013) advokerer som flere andre for at inkludere passagerernes rejsetid i et robusthedsmål. De måler en køreplans robusthed ved brug af følgende robusthedsmål, Normaliseret Robusthed (NR).

$$NR = \frac{(\text{Realized passenger travel time} + \text{passengers' perceived extra waiting cost})}{(\text{Nominal passenger travel time})}$$

Passagerernes opfattede ekstra venteomkostninger knytter sig her til de uudnyttede tidstillæg, hvilket skal ses som et irritationsmoment når togene faktisk kører som foreskrevet. Faktisk og idéel rejsetid er beregnet ved hjælp af korteste vej algoritmer for netværket med og uden forstyrrelser (Dewilde et al, 2013). Ved at inkludere rejsetiden samtidig med at også uudnyttet tidstillæg straffes, undgås det at en køreplan bliver ineffektiv når robustheden bliver forsøgt forbedret.

## Metoder til at forbedre jernbanedriften

I dette afsnit gennemgås metoder der har haft til formål at forbedre jernbanedrift (særligt fokus på robusthed, således også punktlighed). Som det ses i næste underafsnit, er en af de mest udbredte metoder til at forbedre en køreplans robusthed overfor forstyrrelser, indlæggelse af tidstillæg. I andet underafsnit fremhæves alternative metoder til at forbedre jernbanekøreplaners robusthed. Fælles for de to første underafsnit er at studierne, der gennemgås, alle antager at passagerernes rutevalg er uforandret før og efter køreplansændringerne. I det tredje og sidste underafsnit kigges der på studier, som giver mulighed for at passagerernes rutevalg kan ændres i takt med at køreplanen ændres.

I et litteraturstudie af metoder til at generere robuste køreplaner af Cacchiani og Toth (2012) fremhæves kravene til en robust køreplan. Evnen til at absorbere forsinkelser er essentielt for at undgå spredningen af disse. Samtidig med at evnen til at absorbere forsinkelser forbedres er det nødvendigt at gå på kompromis med køreplanens effektivitet. I studiet af Cacchiani og Toth (2012) gennemgås to matematiske paradigmer der har været anvendt til at generere robuste jernbanekøreplaner, nemlig robust optimering og stokastisk programmering. Begge paradigmer fokuserer, på deres egen måde, på at indlægge tidstillæg med det formål at forbedre evnen til at absorbere mindre forsinkelser. Selvom begge paradigmer er kendt for at være i stand til at generere robuste køreplaner, fremhæver studiet af Cacchiani og Toth (2012) også nogle af ulemperne ved de to teknikker. Typisk evner stokastisk programmering ikke at håndtere problemer af en vis størrelse da beregningerne bliver for 'tunge'. Robust optimering har ofte den ulempe at de genererede køreplaner bliver for konservative, simpelthen fordi den robuste optimering sikrer sig overfor flere forskellige *worst case scenarios* samtidigt. I dette afsnit vil fokus være på idéen bag metoderne til at forbedre jernbanedriften fremfor de matematiske aspekter af de anvendte algoritmer.

### Metoder - tidstillæg

Foruden de to generelle paradigmer fremhævet (robust optimering og stokastisk programmering), har også metaheuristikker været anvendt til at generere robuste køreplaner ved at indlægge tidstillæg. I et studie af Tormos et al (2008) udvikledes en genetisk algoritme til effektivt at allokere tidstillæg, der kunne absorbere stokastisk genererede forstyrrelser samtidig med rejsetiden ikke blev mærkbart forværret. Deres mål var at højne robustheden samtidig med at forskellen mellem den planlagte og den faktiske rejsetid blev på et minimum. Den genererede køreplans kvalitet blev evalueret ved brug af simulation. Deres metode viste sig at være velfungerende i en lille test på en mindre del af det spanske jernbanenetværk (Tormos et al, 2008). Vansteenwegen og Oudheusden (2007) fremhævede i deres studie en strategi til at forbedre robustheden af en jernbanekøreplan ved at placere tidstillæg således at de minimerer en ventetids-omkostningsfunktion, der inkluderer omkostningerne ved forlænget holdetid, ekstra tid til opretholdelse af korrespondancer samt omkostningerne ved at afvige fra den først planlagte køreplan. Deres metoder består af tre trin. I første trin bestemmes den idéelle størrelse af tidstillæggene ud fra den antagelse at forsinkelserne sker efter en eksponentiel fordeling. Dernæst anvendes lineær programmering til at placere tidstillæg for at sikre korrespondancerne samt minimere den omtale ventetids-omkostningsfunktion. Til sidst evalueres den nye køreplan ved brug af simulation. Denne metode er testet på IC-netværket i Belgien, hvor togfølgetider enten er 30 eller 60 minutter. Det betyder altså at en mislykket korrespondance har en mærkbar indflydelse på den samlede rejsetid for passagererne. I dette tilfælde havde den ekstra fokus på korrespondancer altså en klar positiv effekt.

Studiet af Vromans (2005) fokuserede på at placere tidstillæg med det formål at minimere den gennemsnitlige togforsinkelse. Studiet konkluderer at en uniform placering af tidstillæg ikke nødvendigvis fører til den mindst mulige gennemsnitlige togforsinkelse. Tidstillæg placeret på den første del af en toglinje, og i særdeleshed tidstillæggene placeret på den sidste del af linjen, skal ifølge studiet være lavere end det gennemsnitlige tidstillæg. Tidstillæggene først på linjen behøver ikke være særligt store da

forsinkelser ofte ikke har nået at bygge sig op her. I tilfældet hvor for store tidstillæg placeres irriteres passagererne, da de påføres unødigt ventetid, og på den måde går tidstillægene spildt. Tidstillægene på den sidste del af toglinjerne har en begrænset effekt, da de kun forbedrer punktligheden på få stationer sammenlignet med tidstillæg placeret tidligere på linjen. Antallet af stationer der passerer har ifølge studiet altså også en indflydelse på, hvor tidstillægene bør placeres.

Ud fra disse anbefalinger er det klart, at placering af tidstillæg er meget afhængig af det fysiske jernbanenetværkslayout. I det præsenterede studie af Vromans oplever togene sjældent forstyrrelser på den første del af linjen, hvorimod det modsatte kan være tilfældet i et andet netværk. Ligeledes har måden hvorpå punktligheden måles også en effekt på hvor tidstillægene smartest placeres. I et studie af Kroon et al (2007) bakkedes de fremhævede anbefalinger for placering af tidstillæg op. I den forbindelse bør det dog nævnes at Vromans er medforfatter på artiklen af Kroon et al (2007). Et tredje studie, der også har fokuseret på placering af tidstillæg er lavet af Fischetti et al (2009). Dette studie taler for placering af større tidstillæg på den første del af toglinjerne. På den måde sikres det bedst muligt at togene ankommer rettidigt på de efterfølgende stationer. Her bør det nævnes at det er tilladt for togene at afgang fra en station tidligere end planlagt, hvilket betyder at tidstillægene ikke går tabt såfremt, der ingen forstyrrelser er. Alle tre studier testede deres metode på en enkelt sporet korridor fra hhv. det hollandske og italienske jernbanenetværk. Studierne giver klare anbefalinger for hvorledes tidstillæg bør placeres. Dog er de ikke helt enige. Derfor kan det forsigtigt konkluderes, at placering af tidstillæg i høj grad afhænger af netværkets layout, måden hvorpå punktlighed måles samt om togene må afgang fra en station før planlagt, og i så fald hvor meget.

Ifølge et studie lavet af Fischetti og Monaci (2009) er en af ulemperne ved de fleste metoder, der anvendte robust optimering, at de har en tendens til at indlægge for store tidstillæg. Det betyder således at systemets effektivitet reduceres. I den forbindelse introducerede Fischetti og Monaci (2009) konceptet *Light Robustness*. Dette koncept eller nærmere denne metode tager udgangspunkt i en optimal køreplan uden tidstillæg. Derefter besluttet det hvor stor en afvigelse fra denne plan, der ønskes. Dernæst anvendes robust optimering til placering af disse tidstillæg (total størrelse forudbestemt). Denne metode sikrer at kun en begrænset mængde af tidstillæg indlægges, hvilket betyder at effektiviteten opretholdes.

## Alternative metoder

I et studie af Higgins et al (1997) fremhæves en alternativ måde at reducere togenes indbyrdes afhængighed på for enkeltsporede strækninger. I dette studie har de udviklet en metode til at finde den bedste placering af sidespor for at minimere konflikter mellem tog. Metoden skifter mellem at finde den optimale placering af sidespor samt at tilpasse køreplanen til den optimerede infrastruktur. Dewilde et al (2013) forsøger i et studie at forbedre jernbanedriftens robusthed ved at fokusere på potentialet ved at udvide kapaciteten på store stationer gennem forbedrede valg af togenes rute gennem stationen, forbedrede køreplaner samt ændringen af tildelingen af platform til tog. Som input benyttes den eksisterende køreplan samt det eksisterende jernbanenetværk for Bruxelles og Antwerpen i Belgien. Dewilde et al (2013) definerer i dette studie robusthed som: *det at minimere passagerernes faktiske rejsetid i tilfælde af mindre forstyrrelser*. Robusthed kvantificeres ved brug af Normaliseret Robusthed (NR) som defineret i afsnit 2.

NR er ikke ligetil at implementere i matematisk programmering, hvilket betyder at det simplificeres. Formålet med optimeringen er nu at sprede togene mest muligt på stationerne, hvilket indirekte kan sammenlignes med at forbedre robustheden. Målfunktionen er den reciproke værdi af buffertiden mellem to på hinanden følgende tog på samme strækning. Med andre ord medfører en lille buffertid mellem to tog en højere omkostning samtidig med at den marginale omkostning ved at øge buffertiden mindskes. Rutefastlæggelsen af togene og køreplanen optimeres sekventielt med det formål at maksimere togenes spredning. Når det ikke længere er muligt at øge togenes spredning eller når der opstår konflikter mellem to tog, forsøges det at ændre togenes placering ved platformene. Denne fremgangsmetode har en forbedrende effekt på NR for de to betragtede netværk (Dewilde et al, 2013). Carey (1999) drog en lignende konklusion i et tidligere studie. Her konkluderedes det at udjævningen af togfølgetider reducerer risikoen for spredningen af forsinkelser. I højfrekvente systemer tilrådes det at maksimere den mindste togfølgetid så meget som muligt (Carey, 1999). Hvad dette studie ikke tager højde for er at togenes

regularitet vedligeholdes. Dette er ellers ifølge et studie af Sun og Xu (2012) vigtigt for at sikre tilfredshed blandt passagererne.

Yderligere kan ændringen af togenes placering ved platformene også kritiseres, da inkonsistente ankomster og længere gåafstande ved skift er et irritationsmoment for de fleste passagerer (Dollevoet, 2013).

Forskellen i passagerforsinkelser og togforsinkelser opstår blandt andet når passagerer skal skifte mellem to tog og et af togene er forsinkede. I dette tilfælde vil passagererne i det forsinkede tog miste deres korrespondance og skal altså vente på næste tog.

En af metoderne til at håndtere dette på, er ved at holde tog tilbage for at sikre korrespondancerne. At holde tog tilbage for at sikre korrespondancer forsinker passagererne på det tilbageholdte tog. I et studie af Oort (2010) anvendes forskellige strategier for at holde tog tilbage med det formål at reducere overflødig rejsetid, hvilket passagerer der mister en korrespondance kan opleve. Disse strategier anvendes under driften, hvor togene tilbageholdes op til en vis margin for at sikre de vigtigste korrespondancer. Denne metode fungerer godt i praksis, hvor metoden er testet på en letbanelinje fra det hollandske jernbanenetværk.

I et studie af Goerigk et al (2011) blev idéen bag *Light Robustness* overført til et andet tema indenfor køreplanlægning, nemlig det der på engelsk kendes som *Timetable Information Problem*. Formålet er at identificere alternative ruter for passagererne i tilfælde af forstyrrelser. I studiet betragtes forskellen mellem fuldstændig robusthed og *Light Robustness*. Dette studie har til formål at identificere robuste ruter, her defineret som ruter, der selv i tilfælde af forstyrrelser, vil bringe passagererne til deres destination. Deres definition af let og fuldstændig robusthed er analoge til dem, der blev præsenteret af Fischetti og Monaci (2009). I denne kontekst dækker fuldstændig robusthed derfor over en rute, hvor alle korrespondancer opretholdes for samtlige forsinkelsesscenarier. Let robusthed dækker i denne kontekst over en rute som kun opfylder disse krav i de fleste af forsinkelsesscenarierne. I studiet fra Goerigk et al (2011) undersøges afvejningen mellem et garanteret robusthedsniveau og den medfølgende øgede rejsetid.

Det viser sig at der kan drages samme konklusion i denne kontekst som Fischetti og Monaci (2009) drog for køreplanlægningsproblemet. Fuldstændig robusthed er for konservativ når det kommer til den øgede rejsetid, mens let robusthed sikrer en fornuftigt robusthedsniveau samtidig med at rejsetiden kun øges marginalt for de fleste passagerer (Goerigk et al, 2011).

## Passagerforsinkelser vs. togforsinkelser

Størstedelen af de jernbanestudier, der har til formål at reducere passagerforsinkelser baserer deres metoder på et forud estimeret rejsemønster for passagererne, som ofte anvendes som vægte i en målfunktion. Studier, der benytter forud estimerede rejsemønstre, tager ikke højde for at passagererne kan ændre deres rejsemønster når jernbanedriften ændres, hvilket er en simplificering. I et studie af Vansteenwegen og Oudheusden (2006) anvendtes passagertællinger om bord til at estimere rejsemønstre. Denne metode er på flere måder anvendelig og retvisende, når der tages højde for spidstime-, trængsels- og sæsoneffekter. Dog kommer den til kort når passagerernes skiftemønstre skal bestemmes. En anden metode til at estimere rejsemønstre kan derfor være at benytte data fra billet salg som eksempelvis (Sels et al, 2012). Denne metode kræver detaljeret data om begyndelses- og endestation såvel som skiftestation(er). I tilfældet, hvor detaljeret data ikke er tilgængeligt, kan forskellige metoder til estimering af rejsemønstre anvendes. Korrektheden af disse rejsemønstre varierer blandt de forskellige metoder. Vigtigheden af at have præcise estimater for folks rejsemønstre er essentielt når ekstra tidstillæg skal placeres for at tilgodese udvalgte korrespondancer.

Som Dewilde et al (2013) viser, medfører opretholdelse (vha. ekstra tidstillæg) af korrespondancer med få eller ingen passagerer en suboptimal jernbanedrift. Corman et al (2012) skitserer en metode til forsinkelseshåndtering med fokus på identificering af konflikter samt løsning af disse mens de opstår (operationelt planlægningsniveau). Formålet med denne metode er at minimere antallet af tabte korrespondancer (korrespondancerne tildeles en vægt, der modsvarer det estimerede antal passagerer, der benytter korrespondancen) samt at undgå togkonflikter når der re-planlægges ved driftsforstyrrelser. Denne metode er testet på to hollandske jernbanenetværk. Efter at have testet deres metode på disse to netværk, drog Corman et al (2012) den konklusion at opretholdelsen af en korrespondance er et

kompromis mellem total rejsetid for de berørte passagerer og spredning af forsinkelser som følge af tilbageholdte tog.

Et andet studie, hvor forskellen på tog- og passagerforsinkelser fremhæves, er af Jiang et al (2012). Her foreslås det at anvende en simulering til at undersøge forskellene. Passagerforsinkelser måles ved at kigge på forskellen mellem faktisk og planlagt ankomsttid på destinationen. I simuleringen antages det at passagererne er bekendte med samtlige forsinkelser i netværket inden rejsens påbegyndelse, hvilket medfører at de kan tage højde for dette. Derfor har de mulighed for at planlægge en alternativ rute hjemmefra, fremfor først at planlægge den når de møder forsinkelsen. Denne metode har derfor en tendens til at underestimere forsinkelsernes effekt på passagerernes ventetid. Studiet konkluderer at mindre togforsinkelser ikke nødvendigvis medfører passagerforsinkelser, faktisk kan det komme passagerer til gode at nogle tog forsinkes kortvarigt. Ydermere konkluderer studiet at togforsinkelser har størst effekt på de passagerer, der enten går om bord eller stiger af toget på den station hvor forsinkelsen opstår (Jiang et al, 2012). Et studie af Nielsen et al (2009) undersøgte passagerernes rutevalg i et jernbanenetværk med forstyrrelser. Passagerernes rettidighed måles her som procentdelen af passagererne, der ankommer indenfor en given margin fra den planlagte ankomsttid på deres endestation. I denne metode antages det at passagererne ikke er bekendte med forsinkelserne før de påbegynder deres rejse. Først kort efter forsinkelsen sker, antages det at passagererne gentænker deres rutevalg. Forskellige responstider er testet: 50, 150, 248 og 400 sekunder. Des hurtigere passagererne responderer på en forsinkelse og gentænker deres rutevalg, des mindre bliver deres forsinkelse ved endestationen. I en sammenligning af passagerernes og togenes rettidighed i procent ses det at forskellen er signifikant. Studiet konkluderer at årsagen er de skiftende passagerer, der forsinkes med op til en hel følgetid hvis en korrespondance tabes (Nielsen et al, 2009).

### Passageradfærd når jernbanedriften forbedres

I et studie af Sels et al (2012) anvendes en variant af det velkendte PESP til optimering af køreplaner, nemlig FA-PESP (*Flow Allocation Periodic Event Scheduling Problem*). Denne nye variant skifter mellem at optimere køreplanen (PESP) samt at genberegne passagerernes rejsemønstre som følge af køreplansændringerne (FA).

Formålet med denne metode er at minimere passagerernes forventede rejsetid. Denne metode simplificerer måden hvorpå passagerernes rejsemønstre beregnes. I FA antages det at passagererne er bekendte med forsinkelserne inden rejsens påbegyndelse. Gentænkningen af passagerernes rutevalg sker altså inden forsinkelsen opstår. På den måde undgår passagererne at blive direkte berørt af forsinkelserne. Togenes rejsetider antages deterministiske og passagerne vælger altid den korteste vej fra A til B med den nye køreplan. Studiet af Sels et al (2012) adresserer robusthed ved at minimere passagerernes rejsetid. Det antages at passagererne er bekendt med forstyrrelserne samt at de finder sted på de stationer, som oftest lider under forstyrrelser af togdriften. Metoden udviklet af Sels et al (2012) skifter mellem det de kalder *retiming* og *reflowing*. *Retiming* dækker her over optimering af køreplaner, mens *reflowing* er estimeringen af passagerernes tilpassede rejsemønstre (korteste vej algoritmer, hvor passagererne er bekendt med forstyrrelserne inden afgang) med den nye køreplan. Denne metode at anvendt på det belgiske jernbanenetværk, hvor forsinkelser er indlagt. Metoden resulterer i en køreplan, der er robust overfor de systematiske forstyrrelser. Ydermere ses en signifikant reduktion af passagerernes rejsetid. Ifølge studiet af Nielsen et al (2009) er måden Sels et al (2012) beregner passagerernes rutevalg en simplificering, der resulterer i en undervurdering af passagerforsinkelserne, da passagererne er bekendt med forsinkelserne inden de opstår.

### Konklusion

I dette litteraturstudie er forskellige definitioner og kvantificerbare mål for punktlighed og robusthed blevet fremhævet og forklaret. Metoder til at forbedre jernbanedriften med særlig fokus på robusthed, således også punktlighed er gennemgået. Det ses at de nyeste metoder adresserer passagerernes tilpassede rejsemønstre som følge af køreplansændringer eksplicit når driften skal forbedres.

I forlængelse af punkterne ovenfor, anbefales det at fokus i fremtiden bliver på at betragte køreplanernes robusthed fra passagerernes perspektiv.



Angående definitionen af robusthed, konkluderer flere studier, at overholdelsen af rejsetider bør vægtes højere end reduktioner i rejsetid. En fremtidig definition af robusthed samt relaterede kvantificerbare mål bør derfor være i stand til at indfange jernbanedriftens kvalitet samt diagnosticere driftsforstyrrelser. På samme tid er det også nødvendigt at forbedringen af robusthed ikke sker på baggrund af en reduktion i jernbanesystemets effektivitet. Da variationer i rejsetid (synonym med robusthed) er vanskelige at inkludere eksplicit i en målfunktion, kan det være nødvendigt at simplificere måden hvorpå det inddrages i målfunktionen. Eksempler på dette, er gennemgået i dette litteraturstudie.

I forhold til forbedring af robustheden i fremtidige jernbanekøreplaner, er det væsentligt at tage højde for passagerernes tilpasninger af rejsemønstre eksplicit for at højne korrektheden, således også anvendeligheden af resultaterne. For at højne korrektheden yderligere, advokerer nogle studier for at skelne mellem passagergrupper baseret på, hvor hurtigt de reagerer på forsinkelser samt deres risikovillighed.

Andre relevante emner for fremtidig forskning kunne være hvordan en ineffektiv og ikke-robust køreplan vil påvirke passagerernes afrejsetidspunkt, deres valg af transportmiddel samt rutevalg sammenlignet med et velfungerende og robust system.

## **RobustRails**

Nærværende litteraturstudie er en del af et større tværfagligt projekt, nemlig RobustRails. RobustRails er et samarbejde mellem fire institutter på DTU samt flere industrielle partnere. Projektet er finansieret af det strategiske forskningsråd. Projektets fornemste opgave er at besvare spørgsmålet: Kan vi få togene til at køre til tiden?

## Referencer

- Armstrong, J., Preston, J., Potts, P., Paraskevopoulos, D & Bektas, Tolga. (2012). Scheduling Trains to Maximize Railway Junction and Station Capacity.
- Cacchiani, V., Caprara, A., & Fischetti, M. (2009). Robustness in Train Timetabling. In *CTW* (pp. 171-174).
- Cacchiani, V., & Toth, P. (2012). Nominal and robust train timetabling problems. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 727-737.
- Carrasco, N. (2012). Quantifying Reliability of Transit Service in Zurich, Switzerland. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2274(1), 114-125.
- Carey, M. (1999). Ex ante heuristic measures of schedule reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(7), 473-494.
- Ceder, A. & Hassold, S. (2012). Applied Analysis for Improving Rail-Network Operations.
- Corman, F., D'Ariano, A., Pacciarelli, D., & Pranzo, M. (2012). Bi-objective conflict detection and resolution in railway traffic management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 79-94.
- Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., & Vansteenwegen, P. (2013, May). Robust Railway Station Planning: an interaction between routing, timetabling and platforming. In *5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis-RailCopenhagen* (pp. 1-20).
- Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., & Vansteenwegen, P. (2011). Defining robustness of a railway timetable. In *25th Annual Conference of the Belgian Operations Research Society* (pp. 108-109).
- Dollevoet, T. A. B. (2013). *Delay Management and Dispatching in Railways*. Erasmus University Rotterdam.
- DSB. (2009). *Kunder til tiden*. <http://www.dsb.dk/om-dsb/presse/nyheder/dsbs-pracision-skal-i-europas-top-3/>. 04-06-2013.
- Fischetti, M., & Monaci, M. (2009). Light robustness. In *Robust and online large-scale optimization* (pp. 61-84). Springer Berlin Heidelberg.
- Fischetti, M., Salvagnin, D., & Zanette, A. (2009). Fast approaches to improve the robustness of a railway timetable. *Transportation Science*, 43(3), 321-335.
- Goerigk, M., Knott, M., Müller-Hannemann, M., Schmidt, M., & Schöbel, A. (2011, September). The Price of Robustness in Timetable Information. In *ATMOS* (pp. 76-87).
- Goverde, R. M. (2010). A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(3), 269-287.
- Higgins, A., Kozan, E., & Ferreira, L. (1997). Modelling the number and location of sidings on a single line railway. *Computers & operations research*, 24(3), 209-220.
- Kroon, L. G., Dekker, R., & Vromans, M. J. (2007). Cyclic railway timetabling: a stochastic optimization approach (pp. 41-66). *Springer Berlin Heidelberg*.

- Landex, A. (2007). Tog-og passagerregularitet på jernbaner. Conference paper presented at TrafikDage August.
- Landex, A. (2012). Robust RailS Work Package 3.1 – Operations Planning. *Presentation from RobustRailS meeting November 2012*.
- Medeossi, G., Marchionna, A. & Longo, G. (2009). Capacity and Reliability on Railway Networks: A Simulative Approach.
- Nielsen, O.A., Landex, A. & Frederiksen, R.D. (2009). Passenger delay models for rail networks. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series 46 (1)*, pp. 1- 23.
- Oort, N. v., Wilson, N. H., & Van Nes, R. (2010). Reliability Improvement in Short Headway Transit Services. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2143(1), 67-76.
- Salido, M. A., Barber, F., & Ingolotti, L. (2012). Robustness for a single railway line: Analytical and simulation methods. *Expert Systems with Applications*, 39(18), 13305-13327.
- Salido, M. A., Barber, F., & Ingolotti, L. (2008, June). Robustness in railway transportation scheduling. In *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on* (pp. 2880-2885). IEEE.
- Schöbel, A. & Kratz, A. (2009). A Bi-criteria Approach for Robust Timetabling. *Robust and Online Large-Scale Optimization. Lecture Notes in Computer Science* Vol. 5868 pp. 119-144.
- Sels, P. H. A., Dewilde, T., Vansteenwegen, P., & Cattrysse, D. (2012, January). Automated, passenger time optimal, robust timetabling, using integer programming. In *Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways* (pp. 87-92). Springer Berlin Heidelberg.
- Sun, Y. & Xu, R. (2012). Passenger Oriented Disruption Management in Railways.
- Tormos, M. P., Lova, A. L., Ingolotti, L. P., & Barber, F. (2008). *A genetic approach to robust train timetabling*. Technical Report ARRIVAL-TR-0173, ARRIVAL Project. <http://arrival.cti.gr>.
- Transportministeriet. (2009). A green Transport policy. The Danish Ministry of Transport. Political agreement. 29.1.2009.
- Transportministeriet. (2013), Railway of the future. The Danish Ministry of Transport. Political agreement. 06.03.2012.
- UIC. (2011). Railway Statistics - Synopsis Year 2011 (Accessed 09/07/2013). Available from <http://www.uic.org>.
- Vansteenwegen, P., & Van Oudheusden, D. (2007). Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(4), 478-492.
- Vansteenwegen, P., & Oudheusden, D. V. (2006). Developing railway timetables which guarantee a better service. *European Journal of Operational Research*, 173(1), 337-350.
- Vromans, M.J.C.M. 2005. *Reliability of Railway Systems*.
- Vromans, M. J., Dekker, R., & Kroon, L. G. (2006). Reliability and heterogeneity of railway services. *European Journal of Operational Research*, 172(2), 647-665.

Jiang, Z. B., Li, F., Xu, R. H., & Gao, P. (2012). A simulation model for estimating train and passenger delays in large-scale rail transit networks. *Journal of Central South University, 19*, 3603-3613.