



Simulering af passagerforsinkelser på jernbaner

Landex, Alex; Nielsen, Otto Anker

Published in:
Trafikdage 2006

Publication date:
2006

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Landex, A., & Nielsen, O. A. (2006). Simulering af passagerforsinkelser på jernbaner. In *Trafikdage 2006*

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Simulering af passagerforsinkelser på jernbaner

Alex Landex¹, Civilingeniør, al@ctt.dtu.dk

Otto Anker Nielsen¹, Professor, oan@ctt.dtu.dk

¹Center for Trafik og Transport (CTT), Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
Bygning 115, st.tv. Bygningstorvet, 2800 Kgs. Lyngby

1 Resumé

Artiklen beskriver forskellige gængse metoder til opgørelse af passagerernes forsinkelser i jernbanedrift. Metoderne beskrives startende fra de simpleste 0. generations opgørelsesmetoder for (tog-) og passagerforsinkelser, hvorefter de mere avancerede 1. – 3. generations passagerforsinkelsesmodeller præsenteres. De forskellige metoder til opgørelse af passagerforsinkelser sammenlignes og de forskellige metoders fordele og ulemper beskrives.

Efter præsentation af de forskellige metoder til opgørelse af passagerforsinkelser beskrives det hvordan 1. – 3. generations passagerforsinkelsesmodeller kan kombineres med jernbanesimuleringssoftware således at det ud over opgørelser af forsinkelser i eksisterende køreplaner (og infrastruktur) er muligt at forudsige passagerforsinkelser. Derved er modellerne et nyttigt redskab ved vurdering af robustheden af fremtidige køreplaner, kapacitetsudvidelser, ny infrastruktur samt gener ved sporarbejder og anden vedligehold.

For at vurdere forskellene mellem 3. generations passagerforsinkelsesmodeller og tidligere generationer præsenterer artiklen simuleringer af driften på S-banen, og både togenes og passagerernes forsinkelser evalueres.

Resultaterne viser, at der er stor forskel på togregularitet og passagerregularitet – passagererne bliver generelt mere forsinket end togene som følge af uregelmæssigheder i driften. Der er imidlertid stor forskel på om man beregner passagerernes forsinkelser med en 1., 2. eller 3. generations passagerforsinkelsesmodel, da passagererne i 1. generations passagerforsinkelsesmodeller antages at have fuldt kendskab til forsinkelser (også de fremtidige), hvilket ikke er tilfældet for passagerforsinkelsesmodeller af 3. generation. I 2. generationsmodeller antages passagererne at kende sandsynlighederne for forsinkelser, men ikke de konkrete forsinkelser.

Artiklen konkluderer på baggrund af resultaterne at 3. generations passagerforsinkelsesmodeller giver et mere præcist billede af passagerforsinkelserne end passagerforsinkelsesmodeller af 1. og 2. generation. Og eftersom 3. generations passagerforsinkelsesmodeller ikke er vanskeligere eller mere datatunge tidligere generationer af passagerforsinkelsesmodeller anbefales det at der benyttes de mere præcise 3. generations passagerforsinkelsesmodeller i fremtidige analyser.

2 Introduktion

Ved planlægning af større ændringer i infrastruktur og/eller køreplaner vurderes passagerernes kommende forsinkelser ofte. I mange tilfælde vurderes passagerernes kommende forsinkelser blot kvalitativt, mens passagerforsinkelserne i andre tilfælde vurderes kvantitativt – fx ved simulering. Ved den kvantitative vurdering af passagerforsinkelser medtages passagerernes rejseadfærd kun sjældent – det vil sige, at det implicit antages at passagerer ikke skifter mellem tog, at antal ankomende passagerer til et tog ikke påvirkes af forsinkelsen, at passagererne ikke har mulighed for at ændre deres rejserute som følge af forsinkelser og, at der ikke forekommer aflysninger af tog [18]. Disse simple kvantitative (og kvalitative) vurderinger af passagerforsinkelser benævnes i denne artikel som 0. generations passagerforsinkelsesmodeller.

1. generations passagerforsinkelsesmodeller tager (modsat 0. generations passagerforsinkelsesmodeller) højde for at passagerer kan ændre rejserute som følge af forsinkelser. 1. generations passagerforsinkelsesmodeller blev første gang præsenteret i Danmark i forbindelse med udredningen om kapacitetsudvidelse af banestrækningen København – Ringsted i 1999 [12]. En rendyrket form for en sådan model er præsenteret i [15]. I princippet svarer det til at passagerne antages at have fuldt kendskab til nettet og forsinkelser – også før de indtræffer – og derved kan tage højde for disse forsinkelser (jf. afsnit 3.2 Optimal rutevalgmodel (1. generation)).

Imidlertid blev det i dette projekt besluttet at forbedre 1. generationsmodellen ved at forbinde København – Ringsted passagerforsinkelsesmodellen til en rutevalgmodel, således at data fra UX-SIMU¹ blev overført til beregningen af passagerforsinkelser [12][13]. I selve beregningen af passagerforsinkelserne blev det (som i andre 1. generations passagerforsinkelsesmodeller) antaget, at passagererne har fuld information om forsinkelserne i den enkelte simulerede køreplan. Men da flere dage blev simuleret, svarede resultatet til, at passagerne optimerer deres rutevalg, given en empirisk (erfaringsmæssig) sandsynlighedsfordeling for forsinkelser. Derved påvirkes rutevalget, hvis fx bestemte linier er mere forsinket end andre. Men passagerne antages ikke at ændre ruter undervejs på den enkelte dags tur (jf. afsnit 3.3 Passagerforsinkelsesmodel (2. generation)).

Det er først for nylig blevet muligt at modellere passagerernes rejseadfærd, hvorved det er blevet muligt at evaluere de faktisk realiserede passagerforsinkelser på større jernbanenetværk – den såkaldte 3. generations passagerforsinkelsesmodel. 3. generations passagerforsinkelsesmodeller til modellering og evaluering af realiserede passagerforsinkelser blev første gang præsenteret i 2004 [14]. Løsningsalgoritmen er siden blevet optimeret og evalueret [17]. Denne metode til beregning af passagerforsinkelser ved hjælp af en passagerforsinkelsesmodel har hidtil ”kun” været anvendt til evaluering af den realiserede drift på S-banenettet i København [18]. Ved at kombinere den allerede udviklede og gennemprøvede 3. generations passa-

¹ UX-SIMU er et simuleringsprogram, der kan bestemme togforsinkelser på jernbaner.

gerforsinkelsesmodel med standard simuleringværktøjer for jernbaner som fx RailSys er det muligt at forudsige og vurdere fremtidige passagerforsinkelser på jernbanen (jf. afsnit 3.4 Passagerforsinkelsesmodel (3. generation)) – denne ide blev første gang præsenteret i [6].

Første del af artiklen gennemgår forskellige (gængse) metoder til beregning af passagerforsinkelser samt disse metoders fordele, ulemper og begrænsninger. Efterfølgende beskrives det hvordan beregning af passagerforsinkelser kan kombineres med simulering af jernbanetrafik således at man kan forudsige passagerforsinkelser ved ændringer i infrastruktur og/eller køreplaner. Metoden til at forudsige passagerforsinkelser bliver efterfølgende afprøvet på den københavnske S-bane, hvorefter der er en diskussion af beregning af passagerforsinkelser inden der konkluderes og perspektiveres.

3 Metoder til beregning af passagerforsinkelser

Der findes en række forskellige metoder til beregning af passagerforsinkelser. Nogle metoder er simple og lette at anvende, men forsimplede og upræcise, mens andre metoder er mere komplekse, men til gengæld mere præcise. Dette afsnit beskriver en række af de metoder der kan benyttes til bestemmelse af passagerernes forsinkelser, hvorefter metoderne sammenlignes. Metoderne nedenfor er beskrevet med de simpleste 0. generations metoder først, hvorefter metoderne udvides trin for trin til 3. generations metoden, der er mere præcis.

3.1 0. generations-modeller

Fælles for 0-generationsmodellerne er, at de ikke modellerer ændringer i passagers rutevalg. Inden for denne kategori af modeller, er der i praksis benyttet forskellige opgørelsesmetoder til beregning af passagerforsinkelser.

3.1.1 Togforsinkelser (0. generation)

Vurdering af togforsinkelser (uden hensyntagen til passagerer) er den simpleste metode til vurdering af passagerforsinkelser. Denne metode vurderer blot hvor mange tog der vil være forsinket enten som kvalitativ vurdering, skøn, simulering eller som opfølgning af den faktiske togdrift. Passagerforsinkelserne vurderes herefter oftest blot som værende proportional med togforsinkelserne, hvilket imidlertid er en forsimplet antagelse der fejlvurderer passagerforsinkelserne [18].

Selv om togforsinkelserne ikke tager synderligt hensyn til passagererne og passagerernes fordeling på linier og tidspunkter er togforsinkelserne alligevel en vigtig del i andre opgørelsesmetoder af passagerforsinkelser. At togforsinkelser er vigtige i opgørelsen af passagerforsinkelser hænger sammen med at passagererne kun antages at blive forsinkede, såfremt togene også er forsinkede.

3.1.2 Snitforsinkelse (0. generation)

De fleste operatørselskaber ved nogenlunde hvor mange passagerer der stiger af og på togene ved de enkelte stationer og afgange. Disse data bruges bl.a. til afregning trafikelskaberne

imellem og til planlægningsformål. Skal toget standse ved stationen eller være gennemkørende? Og hvor længe skal toget i givet fald holde ved stationen (mange passagerer resulterer i længere holdetid end få passagerer).

Når det gennemsnitlige antal passagerer, der stiger af på den enkelte station, kendes sammen med togforsinkelserne – også fordelt på stationer og afgang – er det muligt at beregne passagerforsinkelserne mere præcist end ved togforsinkelsesmetoden. Snitforsinkelsesmetoden tager ikke hensyn til, at antallet af passagerer i de enkelte afgang kan variere fra dag til dag og i forhold til togenes forsinkelser.

3.1.3 Tælletogets forsinkelse (0. generation)

Antallet af passagerer på den enkelte afgang varierer dag for dag. En del af variationen i passagerantallet skyldes naturlige variationer såsom ekstra rejser til stranden når det er varmt, ferier og fridage samt større arrangementer som fodboldkampe og andre arrangementer. Denne form for passagervariation kan imidlertid medtages, hvis man tæller antallet af passagerer, der stiger på og af togene (fx med automatisk tælleudstyr). Derved kan der opnås en mere præcis opgørelse af passagerforsinkelserne.

Opgørelse af passagerforsinkelser ved tælletogets metode medtager imidlertid også variation i passagerantallet som følge af forsinkelser i togdriften. Denne variation kan illustreres ved eksemplet i tabel 1.

	Station A		Station B		Station C	
	På	Af	På	Af	På	Af
Til tiden	100	0	50	50	0	100
Til tiden	100	0	50	50	0	100
5 min forsinket	150	0	75	75	0	150
Til tiden	50	0	25	25	0	100
Til tiden	100	0	50	50	0	100

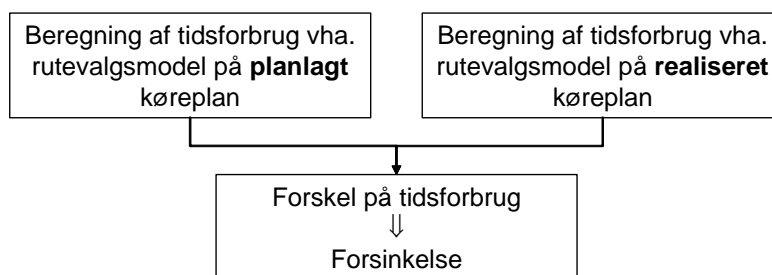
Tabel 1: Eksempel på variationen i passagerantal som følge af togforsinkelser.

Tabel 1 viser en banelinie med 3 stationer (A, B og C), hvor der kører tog hvert 10 minut. Hvis alle tog kører til tiden står der 100 passagerer på ved station A (første station), mens der står 50 passagerer på og af på station B og der står 100 passagerer af på station C. Eftersom toget kører med (forholdsvis) høj frekvens (hvert 10. minut) antages det at passagererne ankommer jævnt fordelt til stationen. Er det ene tog 5 minutter forsinket fra station A, vil der således være flere passagerer i toget samtidig med at der også vil være flere passagerer der venter på station B (jf. tabel 1). Det efterfølgende tog vil derefter have færre passagerer, da en del af passagererne har haft mulighed for at tage det forsinkede tog.

De passagerer, som har nået det forsinkede tog, og ellers skulle have ventet til det efterfølgende tog, hvis toget havde kørt til tiden ankommer før planlagt. Ved talletogsmetoden registreres de passagerer der har nået et tidligere tog som værende forsinkede, da de stiger af et forsinket tog.

3.2 Optimal rutevalgsmodel (1. generation)

Beregning af passagerforsinkelser efter talletogsmetoden tager (som beskrevet i afsnit 3.1.3 Talletogsforsinkelse) ikke højde for variationen af passagerer som følge af forsinkelser – det forsinkede tog vil have flere passagerer mens toget der følger efter det forsinkede tog vil have færre passagerer. Denne passagervariation tages der højde for, hvis der benyttes en (køreplansbaseret) rutevalgsmodel². Rutevalgsmodellen beregner først det tidsforbrug passagererne bruger i tilfælde af at der ikke er forsinkelser i togdriften – dvs. på baggrund af den planlagte køreplan. Derefter gentages rutevalgsberegningen med den realiserede køreplan (inkl. forsinkelser) og passagerernes tidsforbrug beregnes igen. Forskellen i tidsforbrug



Figur 1: Beregning af passagerforsinkelser ved hjælp af en køreplansbaseret rutevalgsmodel.

er derfor den forsinkelse, som påføres passagererne som følge af forsinkede tog, jf. figur 1.

For at kunne beregne passagerforsinkelser ved hjælp af en rutevalgsmodel er det nødvendigt at have kendskab til passagerernes rejsemønster dvs. på hvilket tidspunkt passagererne rejser fra hvilken station til hvilken station – dvs. en OD-matrix segmenteret på tidsintervaller. Dette detaljerede datagrundlag sammen med samtlige køreplaner og realiserede køreplaner gør det muligt at beregne i hvilke tog der kommer flere eller færre passagerer som følge af (tog)forsinkelser.

Beregning af passagerforsinkelser ved hjælp af en rutevalgsmodel gør det endvidere muligt at beregne nogle mere præcise passagerforsinkelser, da der tages højde for skift mellem tog. En passager der skal skifte tog undervejs, men er fx 5 minutter forsinket ved skiftestationen kan risikere at miste sin videre forbindelse, hvorved den samlede rejsetid forlænges, da passageren skal vente på næste forbindelse. Omvendt kan forsinkelsen på 5 minutter være så lille at passageren stadig når sin videre forbindelse, hvorved den samlede rejsetid ikke forøges.

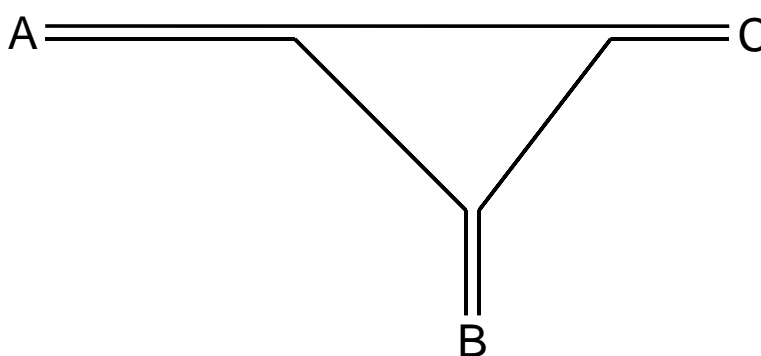
Det detaljerede datagrundlag gør det endvidere muligt at passagererne kan tage andre linier end planlagt – fx linie B fra København H til Lyngby i stedet for linie E (jf. bilag 1). Passage-

² En køreplansbaseret rutevalgsmodel beregner ruter på baggrund af passagerernes præferencer for rejsetid, skiftetid, ventetid m.v. – en frekvensbaseret rutevalgsmodel kan ikke beregne ventetiden korrekt, da denne (oftest) antages at være det halve af frekvensen, men kan for lavfrekvente linier være trunke således at passagererne højst venter et vist antal minutter.

ren kan i nogle tilfælde også vælge en helt anden rejserute – fx at benytte Ringbanen (jf. bilag 1).

Selv om beregning af passagerforsinkelser ved hjælp af en (køreplansbaseret) rutevalgsmode er en forbedring i forhold til de tidligere beskrevne metoder, har metoden dog også nogle ”fejl”. Rutevalgsmødeller er beregnet til at regne på den ideelle situation uden forsinkelser, hvorfor det (som regel) antages at passagererne har fuld information om køreplanerne. Når rutevalgsmødellen så benyttes på en køreplan med forsinkelser har passagererne fuld information om disse forsinkelser – også før forsinkelserne optræder.

At passagererne har kendskab til forsinkelserne allerede inden de optræder, kan resultere i at passagererne vælger en normalt uhensigtsmæssig rute fordi den på det pågældende tidspunkt vil være hurtigere. En sådan situation kan opstå for en passager, der skal rejse fra A til C, jf. figur 2. Toget der kører fra A til C vil gå i stå undervejs (fx pga. signalproblemer eller materielle fejl). Da passageren allerede inden han/hun sætter sig ind i toget på station A ved at toget vil være forsinket ved ankomst til station C vil han/hun i stedet tage et andet tog til station B for at skifte



Figur 2: Stiliseret rutenet.

toget og fortsætte til station C, jf. figur 2. Denne omvej via station B tager måske normalt ca. 15 minutter længere tid end den direkte rute, hvorfor denne rute normalt ikke overvejes. Metoden med at beregne passagerforsinkelser ved hjælp af en rutevalgsmode giver derfor et ”for godt” billede af passagerforsinkelserne. Dette er også tidligere påvist i [18].

Beregning af passagerforsinkelser ved hjælp af optimalt rutevalg er for øjeblikket den mest benyttede metode. Denne metode har været brugt i forbindelse med udredningen om København – Ringsted [12], og ifølge [1] virker det til at det er den metode Banedanmark pt. benytter.

3.3 Passagerforsinkelsesmodel (2. generation)

I 2. generationsmodellerne simuleres køreplanerne en række gange, og passagerne antages at vælge optimale ruter i hver simuleret køreplan [13][14]. Resultaterne af disse simuleringer sammenvægtes ved hjælp af den successive gennemsnits metode. Derved opnås et rutevalg, der svarer til at der tages hensyn til sandsynlighedsfordelingerne for fremtidige forsinkelser. Dette betyder et rutevalg, der indarbejder hensyntagen til hyppigt forsinkede linier. Men den konkrete rute ændres ikke under vejs, selvom passageren måske givet særligt store forsinkelser kunne ændre sin rute.

3.4 Passagerforsinkelsesmodel (3. generation)

Eftersom passagerforsinkelser beregnet ved hjælp af en køreplansbaseret rutevalgsmode (som beskrevet i 3.2 Optimal rutevalgsmode (1. generation)) har mange fordele i forhold til de tidligere beskrevne metoder, er rutevalgsmetoden blevet forfinet [14] til en 2. generationsmodel, således at de ovenfor nævnte indbyggede fejl så vidt muligt undgås. Resultatet af forbedringen af rutevalgsmetoden er en egentlig passagerforsinkelsesmodel. Denne er i nærværende artikel videreudviklet til 3. generation.

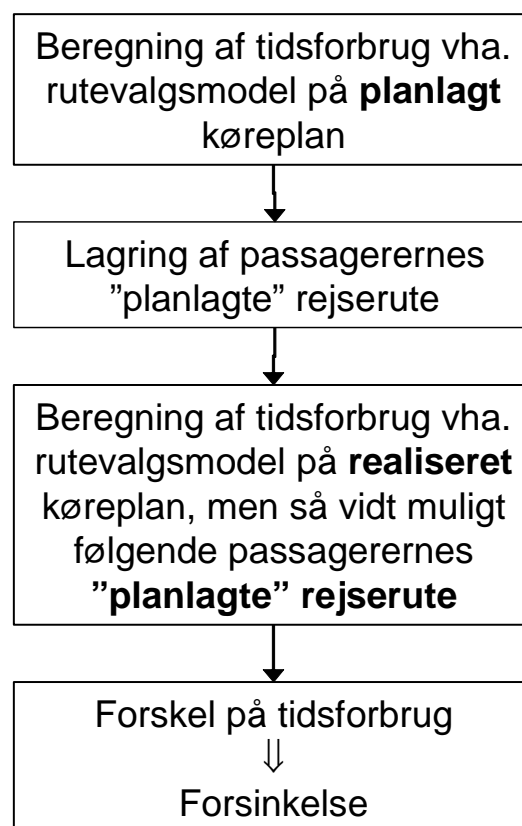
Metoden bag passagerforsinkelsesmodellen er tidligere beskrevet i [15] og [18], hvorfor princippet kun gennemgås kort. Princippet for beregning af passagerforsinkelser er meget lig metoden til beregning af passagerforsinkelser hjælp af en køreplansbaseret rutevalgsmode (som beskrevet i 3.2 Optimal rutevalgsmode (1. generation)). Der beregnes stadig tidsforbrug for den planlagte køreplan og for den realiserede køreplan, men de rejsendes planlagte rejserute (ved den planlagte) køreplan lagres. Det antages at passagererne så vidt muligt følger denne planlagte rejserute i den realiserede køreplan. Forskellen i passagerernes tidsforbrug for de to rutevalgsmodekørsler svarer til passagerens forsinkelse, jf. figur 3.

Det bemærkes, at den planlagte rute kan beregnes ved hjælp af såvel en 1. som en 2. generations rutevalgsmode.

Det er ikke altid muligt for passagererne at følge

deres planlagte rejserute, da tog helt eller delvist kan aflyses eller korrespondancer ikke kan nå som følge af forsinkelser. Derudover kan det være at passagererne kan finde bedre ruter, såfremt deres tog er meget forsinket. Passagerer, der ikke kan følge deres planlagte rejserute har således behov for at genoverveje deres rejserute. Denne genovervejelse af rejserute sker først på det tidspunkt og på det sted, hvor passageren ikke længere kan følge sin planlagte rejserute. På denne måde sikres det at passageren ikke allerede ændrer rejserute før passageren opdager at den planlagte rejserute ikke kan følges, som det sker ved den almindelige rutevalgsmode (jf. 3.2 Optimal rutevalgsmode (1. generation)).

Men passagerer i den virkelige verden følger ikke altid deres planlagte rejserute selvom det er muligt. Bliver passagerer forsinkede begynder de at overveje om det er muligt at tage et andet tog eller alternativt en anden rejserute. Denne mulighed for at genoverveje rejseruten ved forsinkelser er også implementeret i passagerforsinkelsesmodellen. Forsinkes passageren i mo-



Figur 3: Beregning af passagerforsinkelser ved hjælp af passagerforsinkelsesmodellen.

dellen mere end en vis tærskelværdi³ har passageren mulighed for at genoverveje rejsen fra det tidspunkt og sted hvor tærskelværdien er overskredet. Tærskelværdien i 3. generations passagerregularitetsmodellen skal kalibreres sammen med rutevalgmodellens parametre, således at passagerernes modellerede rejser stemmer så godt overens med virkeligheden som muligt. For nogle rejserelationer bør der imidlertid ikke være nogen tærskelværdi, da passagerne blot vælger det først kommende tog – fx mellem Københavns Hovedbanegård og Nørreport (jf. bilag 1).

Uanset hvor meget man kalibrerer modeller (herunder rutevalgsmødeller og passagerforsinkelsesmodeller) skal det huskes at modellernes resultater kun er en model af virkeligheden, og derfor aldrig kan modellere virkeligheden helt korrekt. Information om forsinkelser kan eksempelvis være med til at ændre passagerernes tærskelværdier og derved rutevalg – få passagererne eksempelvis i god tid besked om forsinkelser har de bedre mulighed for at genoverveje deres rejserute og evt. vælge en alternativ rute. Det er imidlertid umuligt at modellere præcis hvordan og hvornår passagerer får information om forsinkelser, hvorfor der vil være en vis usikkerhed på tærskelværdierne.

Beregn passagerforsinkelser ved hjælp af en rutevalgsmødel eller den beskrevne passagerforsinkelsesmødel er der en mulighed for at passagerer ankommer før tid. Dette skyldes fx at en passager der ankommer rettidigt til en station, hvor der skal skiftes til et andet tog kan nå et tidligere tog end planlagt hvis dette tog er forsinket. Eftersom det er muligt at ankomme før tid (en salg negativ forsinkelse) er det ved opgørelse af passagerforsinkelser vigtigt både at opgøre passagerer der ankommer før tid og bliver forsinkede i stedet for blot at opgøre differensen på det totale tidsforbrug som forsinkelse, da dette vil underestimere tidsforbruget.

Sammenlignes resultaterne for 3. generations passagerforsinkelsesmødel med 1. generations optimale rutevalgsmødel er der forskel på forsinkelsestiden. Forskellen skyldes at passagererne i 1. generations optimale rutevalgsmødel har fuld information hvorved passagererne kender til forsinkelserne allerede inden de optræder. Det betyder at passagererne kan vælge en mere optimal rejserute allerede inden afgang og at passagererne evt. vente med at tage hjemmefra.

3.5 Sammenligning

Afsnit 3.1.1 til 3.4 har beskrevet de mest gængse metoder til beregning af passagerforsinkelser og beskrevet disse metoders fordele og ulemper. Tabel 2 giver en kort opsummering af de enkelte metoders fordele og ulemper.

³ Det er muligt at ændre tærskelværdierne i passagerforsinkelsesmodellen - [18] giver et overblik over forskellige tærskelværdiers betydning.

	Togforsinkelser (0. generation)	Snitforsinkelser (0. generation)	Tælletogetsfor- sinkel- se (0. generation)	Optimal rute- valgsmode- l (1. generation)	Passagerfor- sinkel- sesmodel (2. generation)	Passagerfor- sinkel- sesmodel (3. generation)
Hensyntagen til passagerer- nes forsinkelse	NEJ	DEL- VIS	DEL- VIS	DEL- VIS	JA	JA
Kompleksitet	Meget lav	Lav	Lav – Middel	Middel	Middel- Høj	Høj
Behov for information om rejsemønstre	NEJ	Afstige- re	NEJ	JA	JA	JA
Passagerer inddrager erfare- de forsinkelser (forsinkel- sesfordelinger) i deres valg	NEJ	NEJ	NEJ	NEJ	JA	NEJ ⁴
Mulighed for at forudsige forsinkelser (fuld informati- on)	NEJ	NEJ	NEJ	JA (of- test) ⁵	Delvis ⁶	JA, men benyttes sjæl- dent ⁷
Brug af passagerernes rej- semønstre (OD-matrix)	NEJ	NEJ	NEJ	JA	JA	JA
Passagerer kan ankomme før tid	NEJ	NEJ	NEJ	JA	JA	JA

Tabel 2: Sammenligning af metoder til opgørelse af passagerforsinkelser.

4 Simulering af passagerforsinkelser

Beregning af passagerforsinkelser for den faktisk udførte drift efter en eller flere af prognosemetoderne (beskrevet i afsnit 3 Metoder til beregning af passagerforsinkelser) er af interesse for at evaluere togoperatøren (og evt. infrastrukturforvalteren), og derved identificere aspekter og/eller rutiner som kan forbedres.

⁴ I 3. generationsmodeller antages passageren at følge en planlagt rute. Denne rute kan beregnes ud fra den optimale rutevalgsmode i den planlagte (publikums)køreplan. Imidlertid kan man – i princippet – også beregne den planlagte rute i køreplaner med empiriske forsinkelsesfordelinger (dvs. efter princippet i 2. generationsmodellen). Derved samples i hver iteration af simuleringen i 3. generationsmodellen en planlagt rute fra 2. generationsmodellen. Fordelen ved dette er, at passagerens planlagte ruter tager hensyn til linier der hyppigt er forsinkede (eller modsat). Fx. at passagerer planlægger at undgår metro eller Nordbanen under sporarbejder, fordi togene på disse linier ofte er forsinkede. Dette indgår ikke i de gennemførte tests, men er metodisk en simpel justering af 3. generationsmodellen, hvis rutevalget modelleres med successive gennemsnits metode.

⁵ Hvilket er en ulempe, da det er urealistisk at passagerne kan se frem i tid.

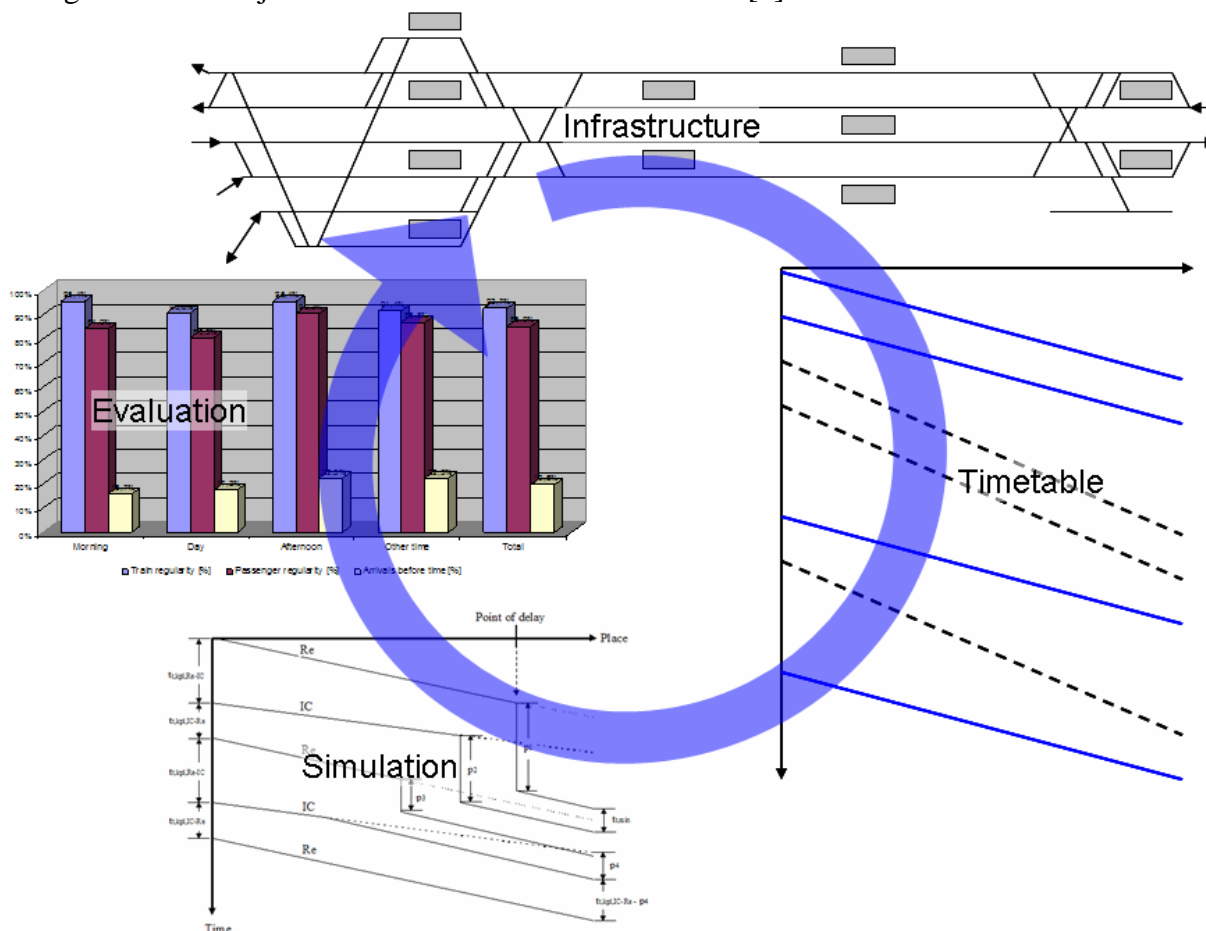
⁶ Via antagede kendte forsinkelsesfordelinger.

⁷ Ved at køre optimistisk rutevalg på både basiskøreplanen og de realiserede køreplaner er det muligt at benytte passagerforsinkelelsesmodellen som en 1. generations optimistisk rutevalgsmode.

Hvis det er muligt at forudsige eller estimere de fremtidige passagerforsinkelser er det muligt at evaluere ændringer i infrastruktur og/eller køreplaner allerede i beslutnings-/planlægningsprocessen. Til evaluering af ændringer i infrastruktur og køreplaner er det almindeligt at evaluere togforsinkelser ved hjælp af simulation. Det er derfor oplagt og interessant at kunne beregne passagerforsinkelser i samme arbejdsgang som togforsinkelserne evalueres ved hjælp af simulation.

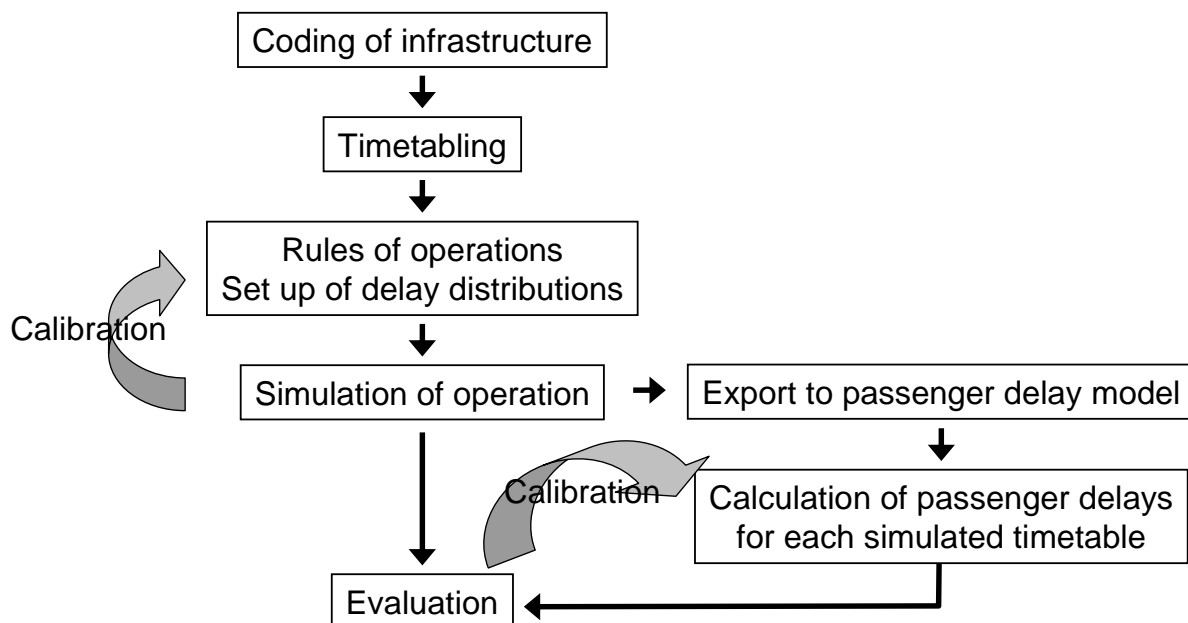
For at kunne beregne tog- og passagerforsinkelser ved hjælp af standard simuleringssoftware som fx RailSys, er det nødvendigt at digitalisere infrastrukturen og lægge køreplanerne ind i systemet. Derefter skal disponeringsreglerne angives for trafikafviklingen ligesom også forsinkelsesfordelinger for de forsinkelser der til dagligt rammer togdriften skal angives.

Når infrastrukturen er digitaliseret, køreplanerne, disponeringsregler og forsinkelsesfordelinger er lagt ind kan togdriften simuleres. Efter simuleringen er det muligt at evaluere togforsinkelserne direkte, mens det kræver en ekstra beregning med passagerforsinkelsesmodellen at kunne bestemme passagerforsinkelserne. Arbejdsprocessen for den traditionelle simulering af togforsinkelser kan ses i figur 4, hvor pilen beskriver rækkefølgen i arbejdsprocessen. Denne arbejdsproces gentages et antal gange således at modellen kalibreres indtil togforsinkelserne i basissituationen stemmer (nogenlunde) overens med virkeligheden – kalibrering af simuleringss modeller for jernbanetrafik er nærmere beskrevet i [4].



Figur 4: Arbejdsprocessen i en traditionel simulering af togforsinkelser [10][11].

For at kunne beregne passagerforsinkelser kræves der resultatdata fra den traditionelle simulering af togforsinkelser indeholdende både den planlagte og den realiserede/simulerede køreplan med alle ankomster og afgang fra samtlige stationer. Data for den planlagte og realiserede/simulerede driftsafvikling for samtlige stationer skal overføres til passagerforsinkelsesmodellen. Dette simuleres typisk for et antal driftsdage, således at der for hver af disse foreligger en simuleret køreplan. Når samtlige data er overført til passagerforsinkelsesmodellen kan modellen køres for hver af de simulerede køreplaner og resultaterne evalueres – figur 5 viser arbejdsgangen for beregning af passagerforsinkelser med en 3. generations passagerforsinkelsesmodel.



Figur 5: Simulering af passagerforsinkelser (baseret på [10] og [11]).

Af figur 5 ses det at der ved beregning af passagerforsinkelser skal foretages den ”sædvanlige” kalibrering af disponeringsreglerne og forsinkelsesfordelingerne for at kunne få en så korrekt overensstemmelse mellem den faktiske driftsafvikling og simuleringen som muligt. Derudover er det også nødvendigt at kalibrere passagerforsinkelsesmodellen (jf. afsnit 3.4 Passagerforsinkelsesmodel) således at der benyttes tærskelværdier der er så præcist som muligt beskriver passagerernes reaktioner – [18] beskriver følsomheden over for forskellige tærskelværdier i passagerforsinkelsesmodellen.

Når RailSys benyttes som simuleringværktøj i forbindelse med passagerforsinkelsesmodellen kan outputfilen Fahre++.pro, der indeholder informationer overføres til passagerforsinkelsesmodellen. Overførsel af Fahre++.pro filen til passagerforsinkelsesmodellen gøres ved hjælp af et simpelt import-eksport program udviklet i VB.Net. Arbejdsprocessen for beregning af passagerforsinkelser er derfor principielt blot at udvide arbejdsprocessen fra den traditionelle simulering af togforsinkelser (figur 4) til også at omfatte overførsel af outputfilen fra den traditionelle simulering og kørsel af passagerforsinkelsesmodellen.

5 Resultater fra passagerforsinkelsesmodel

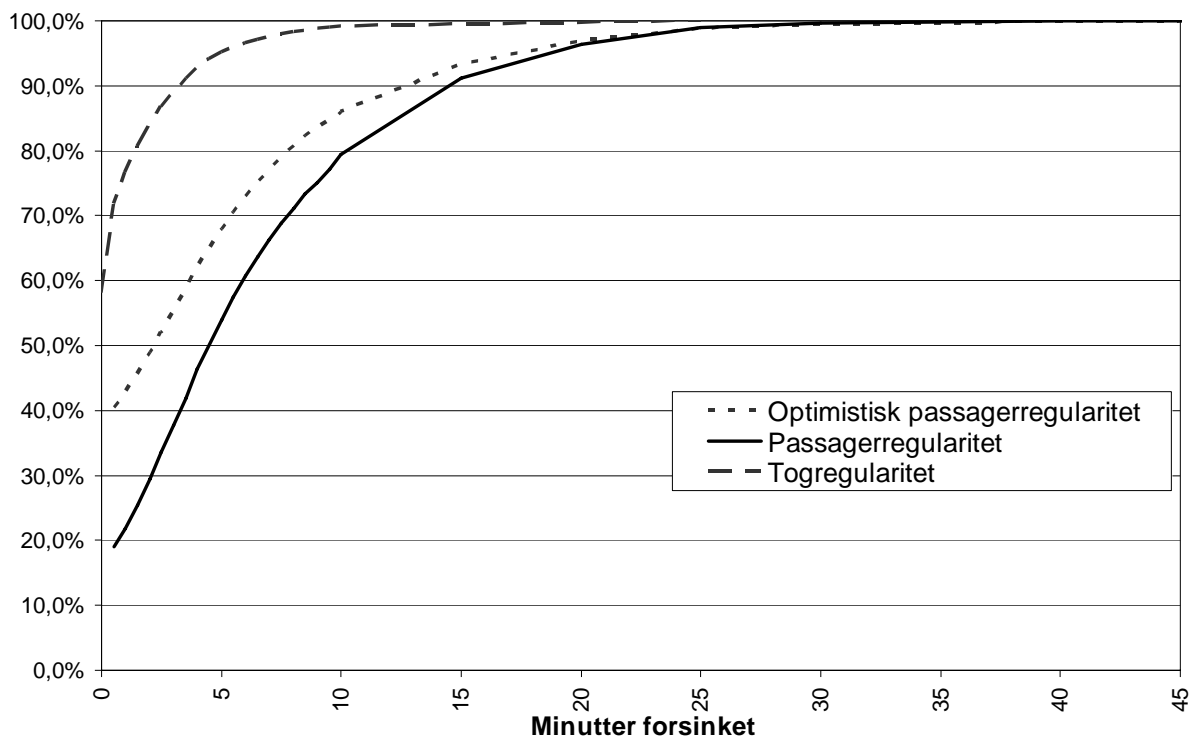
I testene af modellen blev der kørt 100 simuleringer med RailSys, hvoraf 3 af simuleringerne indeholdt deadlocks hvor togene blokerede vejen for hinanden⁸. Derfor var det kun de 97 simuleringer uden deadlocks samt referencesimuleringen uden forsinkelser der blev overført til passagerforsinkelsesmodellen.

Passagerforsinkelsesmodellen blev kørt som både en 1. generations passagerforsinkelsesmodel med optimistisk rutevalg og som en 3. generations passagerforsinkelsesmodel hvor passagererne ikke har kendskab til forsinkelserne før de opstår. Resultaterne fra de to passagerforsinkelsesmodeller blev sammenlignet med togregulariteten.

Resultaterne af simuleringerne og den efterfølgende beregning af passagerforsinkelser/-regularitet viser, at togregulariteten er væsentlig højere end passagerregulariteten – se figur 6. Den simulerede togregularitet på S-banen viser at ca. 90% af S-togene ankommer ”rettidigt” – dvs. under 2½ minut forsinket⁹. Med den optimistiske 1. generations passagerforsinkelsesmodel ankommer cirka halvdelen af passagererne mindre end 2½ minut forsinket, og kun cirka 1/3 af passagererne ankommer mindre end 2½ minut forsinket ifølge beregningen med den mere realistiske 3. generations forsinkelsesmodel. For 90% fraktilen er der imidlertid ikke så stor forskel på 1. og 3. generations forsinkelsesmodellerne, da passagererne ankommer med hhv. 13 og 15 minutters forsinkelse.

⁸ Det er almindeligt, at der findes en vis procentdel af simuleringerne der indeholder deadlock. Jo mere kapacitetsudnyttet og kompliceret netværk, der simuleres, desto flere deadlocks må forventes. Deadlocks kan til dels undgås ved mere restriktive ”regler” i simuleringen, men det er en balancegang, da for mange ”regler” kan resultere i en mere restriktiv driftsafvikling end i den virkelige verden. Eftersom der ikke opstår deadlock-situationer i den virkelige verden (eller i hvert fald kun meget sjældent), og da resultaterne fra en deadlock giver urealistisk høje forsinkelser er det almindelig praksis at se bort fra simuleringer der indeholder deadlock.

⁹ DSB S-togs mål for rettidighed er at 95% af togene skal ankomme mindre end 2½ minut forsinket. At regulariteten i figur 6 er mindre end DSB S-togs mål skyldes de i det behandlede scenarios valgte forudsætninger omkring forsinkelsesfordeling, infrastrukturforhold m.v. Den lidt lavere togregularitet (90% i stedet for 95%) er valgt for at tydeliggøre forskellene på de forskellige opgørelsesmetoder.



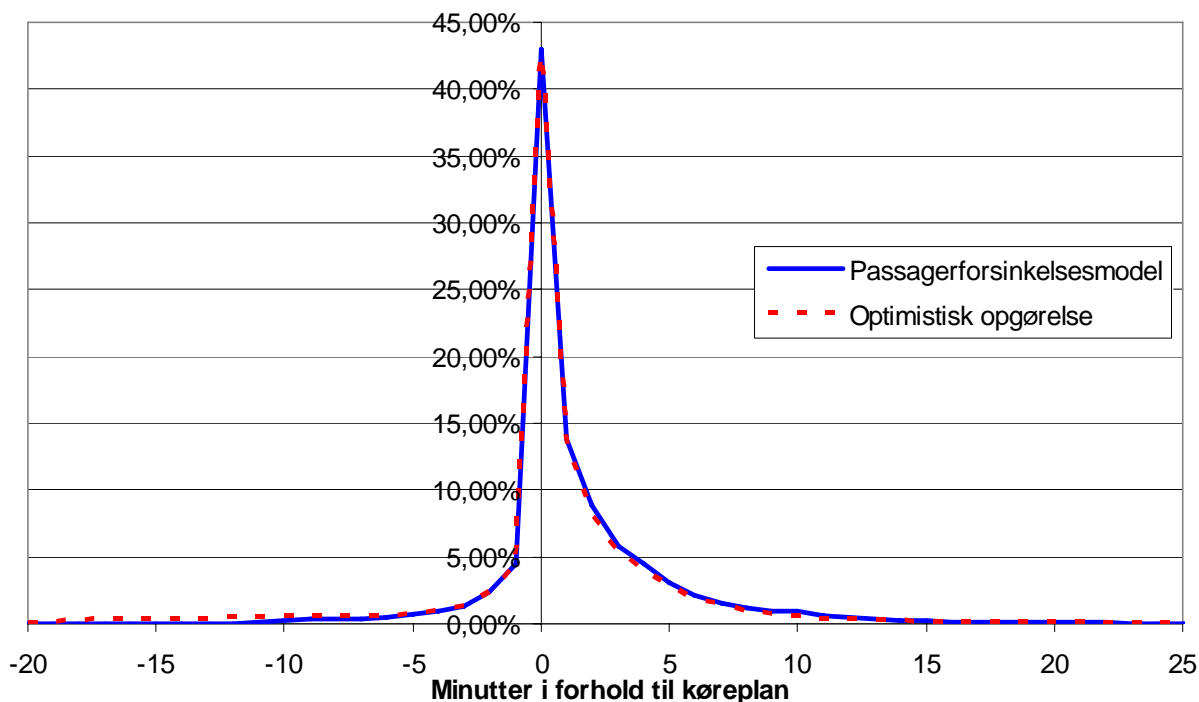
Figur 6: Simuleret tog- og passagerregularitet for S-banen.

Forskellen mellem tog- og passagerregulariteten skyldes at der er et forskelligt antal passagerer i togene hen over dagen. Derudover er der passagerer der skifter fra et tog til et andet med risiko for at miste det korresponderende tog. Forsinkede tog behøver dog ikke nødvendigvis at resultere i passagerforsinkelser – nogle passagerer kan endda få en fordel ud af togforsinkelserne. Passagerer der ankommer ”tilfældigt” til en station (fx som følge af høj frekvens eller ankomst med bus) kan måske nå et tidligere tog end forventet. Hvis det forsinkede tog efterfølgende indhenter sin forsinkelse ankommer passagererne i toget til tiden, og de passagerer der ellers ikke ville have nået toget ankommer før tid. En tilsvarende situation optræder når passagerer skal skifte fra en linie til en anden – er den linie passagererne skal med forsinket kan passagererne måske nå et tidligere tog end planlagt og derved reducere den samlede rejsetid. Ifølge passagerforsinkelsesmodellerne ankommer ca. 16% af de rejsende før tid¹⁰ med den optimistiske 1. generations passagerforsinkelsesmodel, mens der kun er ca. 12% af passagererne der ankommer før tid med den mere realistiske 3. generations passagerforsinkelsesmodel. Andelen af passagerer der ankommer før tid kan virke høj – især for den optimistiske passagerforsinkelsesmodel, men den faktiske drift hos DSB S-tog har vist tilsvarende af rejsende der ankommer før tid ved sammenligneligt forsinkelsesniveau [18]. At simuleringen og resultater fra den faktiske drift har nogenlunde samme andel af passagerer der ankommer før tid tyder på at simuleringen afbilleder virkeligheden godt.

Vurderes andelen af passagerer der ankommer inden for forskellige minutintervaller – både før og efter den planlagte ankomsttid – ses der ikke umiddelbart den store forskel mellem 1.

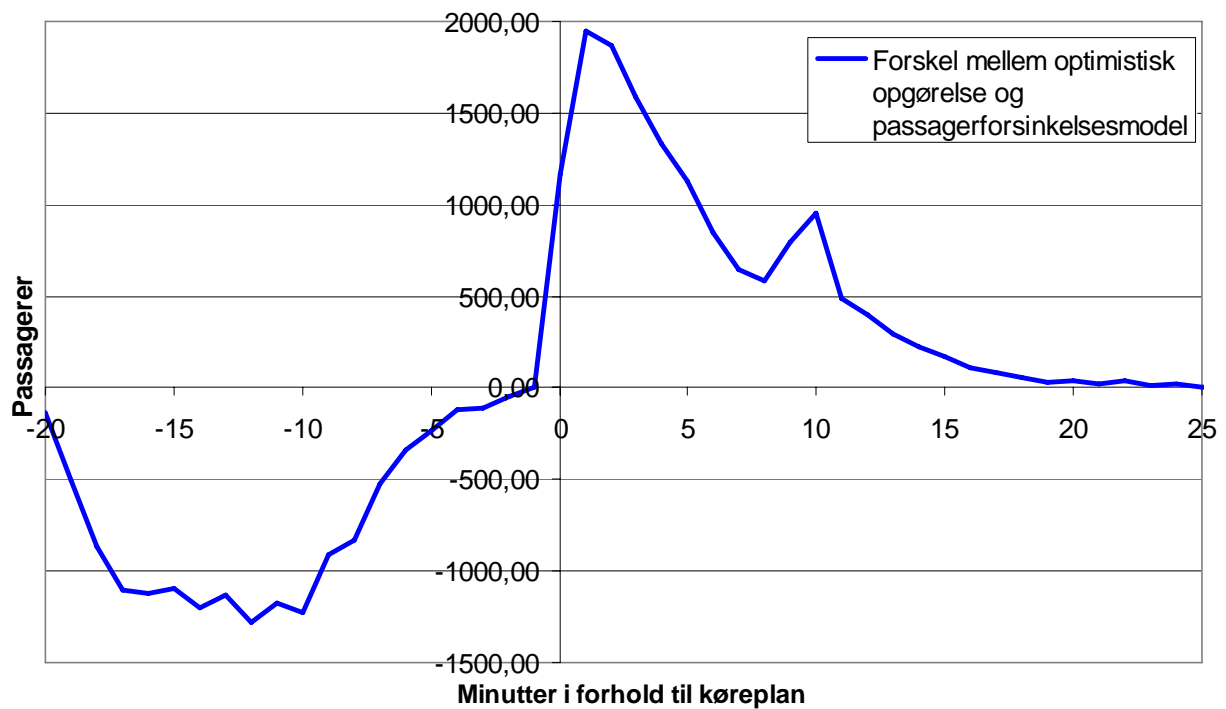
¹⁰ Ankomster før tid er i dette tilfælde regnet som passagerer der blot ankommer et enkelt sekund før tid

og 3. generations passagerforsinkelsesmodeller (jf. figur 7). Selv om der på figur 7 ikke umiddelbart er stor forskel på opgørelsesmetoderne er der en tendens til at 1. generations optimistiske passagerforsinkelsesmodel giver flere passagerer der ankommer før tid i forhold til den mere realistiske 3. generations passagerforsinkelsesmodel.



Figur 7: Relativ forskel mellem den 1. og 3. generations passagerforsinkelsesmodeller.

Selv om den relative forskel på 1. og 3. generations passagerforsinkelsesmodeller ikke er stor kan det alligevel resultere i store tidsforskelle i fx samfundsøkonomiske beregninger – især hvis der er mange passagerer der benytter togene. Figur 8 viser at der i absolut forskel er mange flere passagerer, der ankommer før tid med den optimistiske 1. generations passagerforsinkelsesmodel, mens der er flere passagerer der ankommer mere forsinket med 3. generations passagerforsinkelsesmodellen (jf. figur 8).



Figur 8: Absolut forskel mellem 1. og 3. generations passagerforsinkelsesmodeller.

Den absolutte forskel på beregningerne med de to passagerforsinkelsesmodeller viser at ca. 15.000 flere passagerer der ankommer før tid i den optimistiske 1. generations passagerforsinkelsesmodel end ved den mere realistiske 3. generations passagerforsinkelsesmodel. Derimod er der ca. 11.000 flere passagerer der ankommer mere end 2½ minutter senere end planlagt med 3. generations passagerforsinkelsesmodellen i forhold til 1. generations passagerforsinkelsesmodellen.

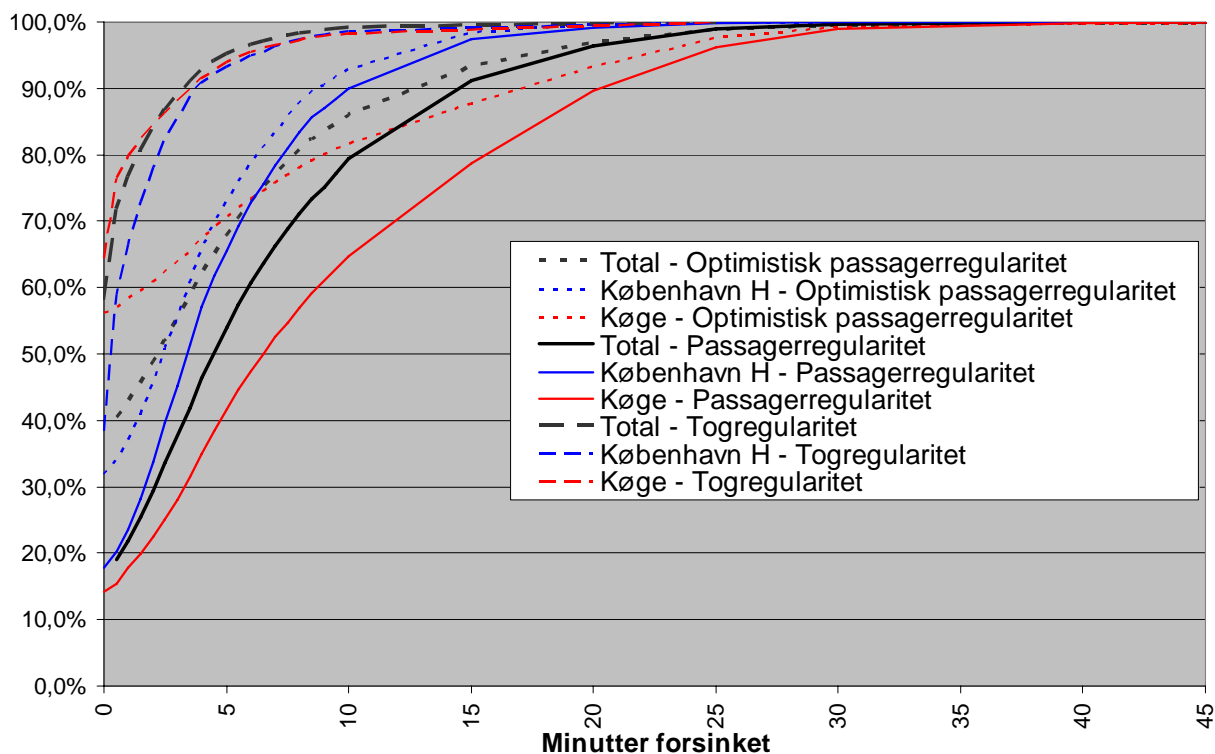
Den store absolutte forskel mellem 1. og 3. generations passagerforsinkelsesmodeller betyder, at der ved samfundsøkonomiske beregninger vil være stor forskel på hvilken metode der vælges til beregning af passagerforsinkelser. 1. generations passagerforsinkelsesmodellen vil på grund af antagelsen om fuld information om forsinkelserne (også før de optræder) have et for optimistisk bud på de samfundsøkonomiske konsekvenser af driften¹¹.

Evalueringen af forsinkelser for både tog og passagerer kan opgøres for hele analyseområdet som vist ovenfor eller på enkelte stationer som vist på figur 9. Her ses det at der på en station som København H med mange S-togslinier er en mindre forskel mellem den optimistiske 1. generations passagerforsinkelsesmodel og den mere realistiske 3. generations passagerforsinkelsesmodel end stationer med færre linier som fx Køge¹². Endvidere ses det af figur 9 at pas-

¹¹ En del af fejlen omkring den for gode samfundsøkonomi vil udjævnes når to alternativer sammenlignes, men usikkerheden vil stadig være til stede.

¹² I beregningerne af passagerregularitet er der kun regnet på S-tog, hvorfor Lille Syd (Roskilde – Køge – Næstved) ikke er medtaget. Der ville dog ikke være nogen større ændring af resultatet da Lille Syd og S-banen (næsten) ikke løber parallelt.

sagererne har færre store forsinkelser på København H end på Køge station, hvilket skyldes at mange passagerer på København H har mulighed for at tage alternative linier, mens dette ikke er muligt for passagererne på Køge station.



Figur 9: Tog- og passagerregularitet for Køge og København H sammenlignet med den totale regularitet.

6 Diskussion

DSB S-togs passagerforsinkelsesmodel køres i dag hos DSB S-tog hver nat for at evaluere de forsinkelser, som passagerne på den københavnske S-bane er blevet påført dagen før [18]. Passagerforsinkelsesmodellen har (ligesom resultaterne i denne artikel) vist at passagerforsinkelserne generelt er større end togforsinkelserne [17]. Det er endvidere vist, at der er stor lighed mellem den daglige evaluering af passagerforsinkelser og de simulerede passagerforsinkelser [10][11]. Det viser at resultaterne fra passagerregularitetsmodellen (kombineret med simuleringssoftwaren RailSys) giver valide, og dermed brugbare resultater, der kan bruges til at forudsige fremtidige passagerforsinkelser.

Ved at benytte passagerforsinkelsesmodellen til at evaluere forsinkelser for tog og passagerer på enkelte stationer og/eller udvalgte strækninger er det muligt at identificere kritiske stationer og/eller strækninger i netværket. Disse kritiske stationer og strækninger kan senere analyseres med henblik på reduktion af forsinkelserne. Passagerforsinkelsesmodellen kan derved bruges til at evaluere (og prioritere mellem) infrastrukturforbedringer. Fordelene (og ulemperne) for passagerer i form af rejsetid og forsinkelser kan nemlig estimeres og sammenlignes med anlægsomkostningerne i en samfundsøkonomisk analyse. Endvidere kan forskellige køreplansforslag blive vurderet og sammenlignet, så der set for passagerernes synspunkt laves en så god køreplan som muligt.

6.1 Kalibrering af togsimuleringsmodellen

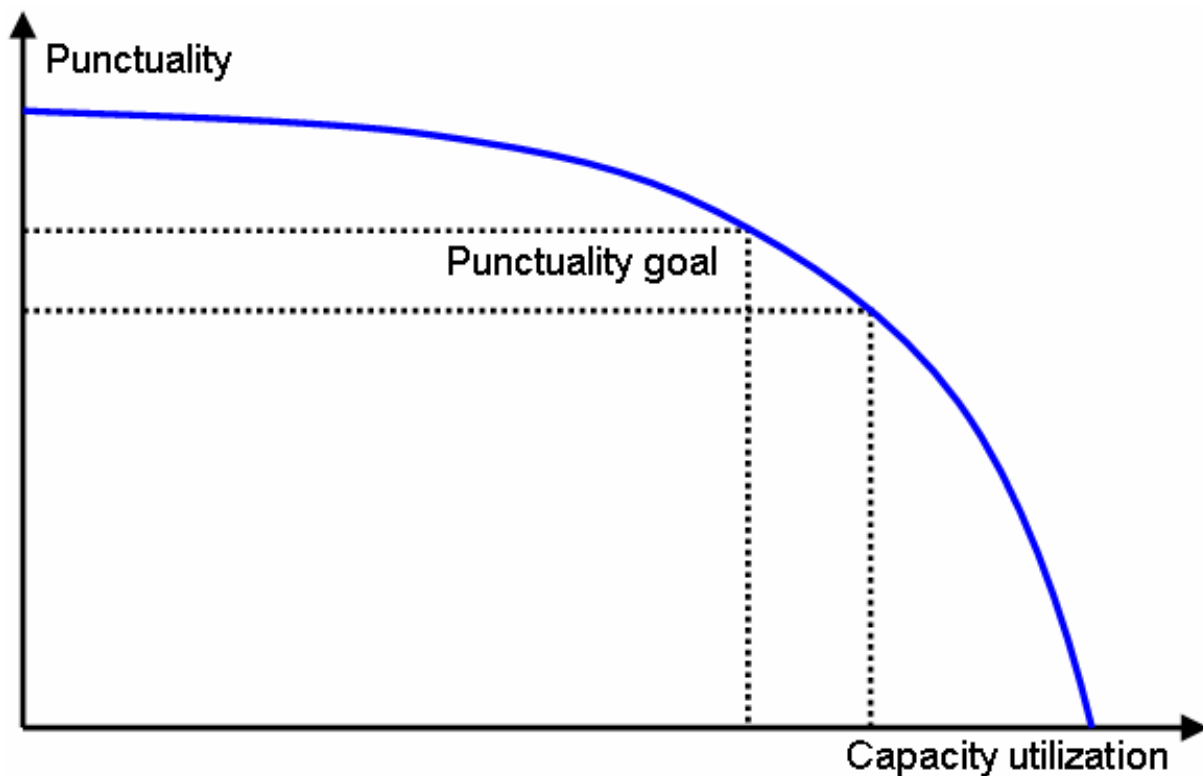
Selvom simuleringssoftware som RailSys (der er benyttet i denne artikel) reproducerer resultaterne fra Københavns S-bane forholdsvis godt, kan resultaterne blive forbedret. For at forbedre resultaterne fra RailSys er det nødvendigt at kalibrere RailSys-modellen bedre, således at RailSys-modellen giver de samme gennemsnitlige forsinkelser for samtlige stationer som den daglige drift. Denne kalibrering af simuleringsmodeller jernbaner er meget tidskrævende, da det nærmest er umuligt at opnå præcis den samme forsinkelsesfordeling som den daglige drift. RailSys-modellen kalibreres derfor ”kun” således at forsinkelserne i modellen og i den daglige drift er på samme niveau (og ikke eksakt ens) [4].

6.2 Forbedring af passagerforsinkelsesmodellen

Udover selve RailSys-modellen kan passagerforsinkelsesmodellen i sig selv også blive forbedret. I den nuværende passagerforsinkelsesmodel vil passagerne ikke skifte rejserute før en vis forsinkelse er opnået, men på nogle stationer og/eller rejse-relationer vil passagererne blot tage det første tog i deres retning. Dette fænomen er specielt karakteristisk som fx for korte rejser, hvor togene kører med høj frekvens, og er fx observeret på rejser mellem Østerport og Vesterport på det københavnske S-banenet (se bilag 1), hvor der er en 2 minutters frekvens i hver retning. Fænomenet kan dog også observeres på OD-relationer med en lavere frekvens – fx Lyngby-Nørreport (se bilag 1). For at kunne modellere at passagererne på nogle rejserelationer er mere villige til at ændre rejserute er det nødvendigt at arbejde mere med at estimere de rette tærskelværdier til at beskrive passageres valg af rejserute.

6.3 Netværkseffekter

Passagerforsinkelsesmodellen kan sammen med simuleringssoftware for jernbanetrafik såsom RailSys også bruges til at estimere netværkseffekterne for passagererne når køreplanerne ændres. Dette er specielt interessant, da det i dag er vanskeligt at forudsige netværkseffekterne for det samlede jernbanenetværk [2][3][7], og i særdeleshed for passagererne. En mindre ændring ét sted i netværket kan resultere i at passagerernes foretrukne rejserute andre steder i netværket ændres som følge af nye eller mistede korrespondancer. Mistede korrespondancer kan resultere i færre passagerer som følge af længere totale rejsetider mens nye/bedre korrespondancer kan føre til flere passagerer som følge af en lettere rejse. En ny toglinie og/eller afgang på et eksisterende jernbanenetværk kan også resultere i netværkseffekter. Det øgede kapacitetsforbrug som følge af en ny togrute og/eller afgang vil som regel resultere i en reduktion i togenes rettidighed, jf. figur 10. Det er imidlertid ikke sikkert at passagerernes rettidighed også vil falde (særlig meget), da passagerforsinkelserne er et resultat af både togforsinkelser antallet af ruter og antallet af afgang. Ved togforsinkelser kan passagererne vælge andre afgang og/eller ruter, hvorved passagererne ikke nødvendigvis forsinkes.



Figur 10: Samspillet mellem rettidighed og kapacitetsudnyttelsen på jernbaner (baseret på [4]) [8][9].

7 Konklusion og perspektivering

I artiklen er forskellige metoder til beregning af passagerforsinkelser gennemgået. De simpleste metoder (0. generationsmodeller) giver et hurtigt, men forsimplet skøn over passagerernes forsinkelser, mens de mere avancerede metoder (3. generationsmodeller) giver et mere nøjagtigt bud på passagerernes forsinkelser – til gengæld kræves der mere detaljerede data.

Det er vist, at det er muligt at kombinere avancerede passagerforsinkelsesmodeller med simuleringssoftware således at det er muligt at forudsige fremtidige forsinkelser på større jernbanenetværk. Det er endvidere vist, at der er stor forskel mellem togforsinkelser og passagerforsinkelser. Forskellen mellem togforsinkelser og passagerforsinkelser skyldes at passagerer varierer hen over dagen og (til en vis grad) passagerens mulighed for at ændre rejserute ved forsinkelser, ligesom der er større risiko for forsinkelser i myldretiderne som følge af et mere stresset system (pga. flere og længere tog samt flere passagerer).

Evaluering af passagerforsinkelser ved hjælp af simuleringssoftwaren RailSys og passagerregularitetsmodellen på den københavnske S-bane er sammenlignelige med de passagerforsinkelser der er beregnet for den daglige drift. Benyttes der en kalibreret RailSys-model (og passagerforsinkelsesmodel) er det muligt at identificere kritiske strækninger og stationer i jernbanenetværket. Det er endvidere muligt at sammenligne rejsetider og forsinkelser for forskellige fremtidsscenarier for ændringer i infrastruktur og/eller køreplaner. På denne måde er det muligt at vælge det bedst mulige fremtidsscenario.

Selv om resultaterne i denne artikel er meget lig de beregnede passagerforsinkelser for den københavnske S-bane er det stadig muligt at forbedre resultaterne. Forbedringerne kan fx være bedre kalibrering af RailSys-modellen og mere korrekte tærskelværdier for hvornår passagererne begynder at genoverveje deres rejserute.

I artiklen er der benyttet RailSys som input til den egentlige driftsafvikling. Andre køreplans-/simuleringsværktøjer vil imidlertid også kunne bruges, hvis det blot er muligt at lave et udtræk af selve driftsafviklingen. På denne måde vil det være muligt at benytte det køreplans-/simuleringsværktøj, som i forvejen benyttes i virksomheden – der skal blot ændres i import-/eksportværktøjet.

På sigt når Rejsekortet indføres vil det være muligt at få endnu bedre data for rejsemønstre således at 3. generations passagerforsinkelsesmodellen (og andre modeller) kan give mere præcise opgørelser af passagerernes forsinkelser. Rejsekortet gør det endvidere muligt også at inkludere busnettet i opgørelsen af passagerforsinkelser, da det bliver muligt at registrere bussernes faktiske placering til en given tid, ligesom det også er muligt at bestemme buspassagerernes og derved samtlige passagerers rejsemønstre i det kollektive netværk.

8 Tak til...

Rapidis Aps takkes for programmering af passagerforsinkelsesmodellen. Banedanmark takkes for at udlåne infrastrukturdata og diskussioner omkring S-banemodellen i RailSys. DSB S-tog takkes for at stille fremtidige køreplaner og OD-matricer til rådighed for beregning af passagerforsinkelser. Stephen Hansen og Kenneth Christensen fra Center for Trafik og Transport på Danmarks Tekniske universitet takkes for at udvikle import-eksport værktøjet og værktøj til brug for evaluering af resultatdata.

Referencer

- [1] Hansen, J. I.. Benefitmodel – togpassageres tidsgevinster ved regulatitetsforbedringer. *Trafikdage*, 2006.
- [2] Hansen, S., Landex, A. & Kaas, A.H., The Network effects of Railway Investments, *10. Internationale konference om Computers in Railways*, eds. J. Allan, C.A. Brebbia, A.F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone & C.J. Goodman, pp. 45-54,2006
- [3] Hansen, S., Store transportinfrastrukturprojekter og deres strategiske virkninger med særlig fokus på effekter for virksomheder, *Ph.D.-afhandling ved Center for Trafik og Transport, Danmarks Tekniske Universitet*, 2004.
- [4] Kaas, A.H., Punctuality model for railways. *7. Internationale konference om Computers in Railways*, eds. J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto & S. Sone, pp. 853-860, 2000
- [5] Kaas, A.H., Metoder til beregning af jernbanekapacitet, *Ph.D.-afhandling ved Institut for Planlægning, Danmarks Tekniske Universitet*, 1998
- [6] Landex, A., Nielsen, O.A. & Seest, E., Dårligere passager- end togregularitet, *Nordisk Järnbane Tidsskrift nr. 2*, pp. 11, 2006
- [7] Landex, A., Kaas, A.H. & Hansen, S., Railway Operation, *Teknisk rapport ved Center for Trafik og Transport, Danmarks Tekniske Universitet*, 2006

- [8] Landex, A., Kaas, A.H., Schittenhelm, B. & Schneider-Tilli, J., Evaluation of railway capacity, *Trafikdage*, 2006
- [9] Landex, A., Kaas, A.H., Schittenhelm, B. & Schneider-Tilli, J., Practical use of the UIC 406 capacity leaflet by including timetable tools in the Investigations, *10. Internationale konference om Computers in Railways*, eds. J. Allan, C.A. Brebbia, A.F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone & C.J. Goodman, pp. 643-652, 2006
- [10] Landex, A., Nielsen, O.A., Modelling expected train passenger delays on large scale railway networks, *7th World Congress on Railway Research*, 2006
- [11] Landex, A. & Nielsen, O.A., Simulation of disturbances and modelling of expected train passenger delays, *10. Internationale konference om Computers in Railways*, eds. J. Allan, C.A. Brebbia, A.F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone & C.J. Goodman, pp. 521-530, 2006
- [12] Nielsen, O.A., Thorlacius, P., Nielsen, E. R., Grevy, B., Brix, J. W. & Jensen, K. E. O., København – Ringsted modelkomplekset – Fra togsimulering til samfundsøkonomi, *Trafikdage*, 1999.
- [13] Nielsen, O.A., Hansen, C.O. & Daly, A., A Large-scale model system for the Copenhagen-Ringsted railway project, *Travel behaviour Research: The Leading Edge*, eds. Hensher, H. Elsevier. pp. 603-626, 2001.
- [14] Nielsen, O.A., A large scale stochastic multi-class schedule-based transit model with random coefficients. Schedule-Based Dynamic Transit Modelling – Theory and Applications. *Schedule-Based Dynamic Transit Modelling: theory and applications*, eds. Wilson, N. & Nuzzolo, A. Kluwer Academic. pp. 51-77, 2004.
- [15] Nielsen, O.A., Modelling train passenger delays based on realised timetables, *Second workshop on the Schedule-Based Approach in Dynamic Transit Modelling – Theory and applications*, 2005
- [16] Nielsen, O.A. & Frederiksen, R.D., Optimisation of timetable-based, stochastic transit assignment models based on MSA. Artikel accepteret for *Annals of Operations Research special issue on Optimisation in Transportation*. Kommende, Elsevier, 2006.
- [17] Nielsen, O.A. & Frederiksen, R.D., Modelling train passenger delays. *Symposium on The Reliability of Travelling and the Robustness of Transport Systems*, eds. van Zuylen, H.J., pp. 137-156, 2005.
- [18] Seest, E., Nielsen, O.A. & Frederiksen, R.D., Opgørelse af passagerregularitet i S-tog. *Trafikdage*, 2005.

