

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

Simulering, trafikmodellering og samfundsøkonomisk vurdering af automatisk S- togsdrift

*Tobias Molich, tubsen@gmail.com
Danmarks Tekniske Universitet*

Abstrakt

Dette indlæg til Aalborg Trafikdage 2016 baseres på en kandidatafhandling fra DTU Transport udført i perioden fra august 2015 til februar 2016 af artiklens forfatter [1]. Rekvirering af den samlede afhandling kan ske ved at sende en forespørgsel til forfatteren pr. mail til tubsen@gmail.com.

Idéen til projektet stammer fra de strategiske analyser af udbygningsmulighederne i Hovedstadsområdet fra det politiske forlig 'En grøn transportpolitik'. I dette projekt er de passagermæssige og samfundsøkonomiske effekter ved en fuld omstilling af den københavnske S-bane undersøgt. Dette er primært gjort ud fra en simulering og trafikmodellering af konkrete køreplansseksempler.

Det er som udgangspunkt for projektet forudsat at det kommende og delvist ibrugtagne CBTC signalsystem er fuldt udrullet på hele den københavnske S-bane, hvilket bl.a. betyder at togene kan køre tættere på hinanden og føreren ikke har indflydelse på den kørte hastighed. Den primære effekt af førerløs drift skal i dette projekt således findes i forbindelse med vending af toget ved endestationerne. Som udgangspunkt skal der med konventionel drift afsættes minimum fem minutter, men ved førerløs drift kan dette reduceres til cirka 40 sekunder.

Der er i alt undersøgt ni forskellige køreplansalternativer. Det ene alternativ udgør basisalternativet, som tager udgangspunkt i den eksisterende køreplan. De resterende otte alternativer er opdelt i par, så der både findes en køreplan med og uden førerløs drift. Fordelen ved dette er at den rene effekt af førerløs drift kan undersøges for hver af de fire overordnede køreplansoplæg. To af de fire overordnede køreplansoplæg er udarbejdet ud fra princippet om gennemgående tog der springer stationer over kombineret med stoptog der standser ved alle stationer undervejs. De andre to overordnede køreplansoplæg er rene metrostyle køreplaner, hvor alle tog standser ved alle stationer. De to principper for køreplaner benævnes *Klassisk* og *Metrostyle*. Internt mellem de to forskellige principielle køreplansoplæg er der varieret mellem hvor meget linjerne sammenbindes på de enkelte fingre ud til

endestationerne. Eksempelvis har Vestbanen ud til Høje Taastrup i det ene metrostyleoplæg tre forskellige linjer med hver deres destination, mens de i det andet metrostyleoplæg har én linje.

Helt overordnet viser resultatet af simuleringerne af de forskellige køreplaner at det ene metrostyleoplæg, hvor linjerne er relativt meget isoleret fra hinanden i nettet, får den bedste afvikling. Afviklingen af basisoplægget er på samme rettidighedsniveau, men i basisoplægget afvikles maksimalt ca. 14 % færre tog på det centrale afsnit omkring Københavns Hovedbanegård, set i forhold til det omtalte metrostyleoplæg. Endvidere er der generelt benyttet et betydeligt højere køretidstillæg i basiskøreplanen. Generelt ses det at de oplæg hvor strækningerne er forsøgt mest muligt sammenbundet klarer sig dårligst i simuleringerne, sammenholdt med de oplæg hvor strækningerne er forholdsvis meget isoleret fra hinanden.

Med hensyn til trafikmodelleringen af de forskellige køreplaner, ses der flest rejser i alternativerne med klassiske køreplaner, hvor gennemkørende tog kombineres med stoptog. Der er dog tale om relativt små forskelle, idet det bedste klassiske oplæg, sammenholdt med det bedste metrostyleoplæg, har 0,2 % flere kollektive rejser, svarende til ca. 3.500 daglige rejser.

Tages de samfundsøkonomiske briller på, hvor både ændringer i driftsomkostninger, tidsgevinster fra simuleringerne i form af forsinkelsestid og tidsgevinster fra trafikmodelleringen medtages, viser det sig at det oprindeligt opstillede basisoplæg Klassisk v1 samfundsøkonomisk giver det bedste resultat sammenholdt med de andre undersøgte oplæg. Den udslagsgivende faktor for resultaterne er primært effekterne i forsinkelsestiden fra simuleringerne.

Indledning

Dette projekt har til formål at undersøge effekterne for passagererne ved en omlægning til førerløs drift af den københavnske S-bane. Dette vil blive belyst ud fra ændringer i rettidighed, rejsetiden samt de drifts- og anlægsøkonomiske konsekvenser. Dertil vil blive benyttet en samfundsøkonomisk analyse hvor alle parametre kvantificeres i kroner og øre.

Hensigten ved omstillingen er primært at skabe en større robusthed i driften, fordi der kræves kortere tid ved endestationerne, når togene skifter køreretning. Endvidere undgås uorden i forbindelse med personalemangel – effekten af dette er dog ikke belyst. De negative konsekvenser er togenes forlængede tekniske reaktionstid i forbindelse med ophold på stationerne, samt udgifter til forbedret sikkerhed langs sporene, så det kommer på niveau med sikkerheden på den københavnske metro.

Det er i projektet forudsat at den igangværende udrulning af CBTC signalsystemet på den københavnske S-bane er afsluttet og at de effekter der fremkommer af dette signalsystem er effektueret. I forhold til den eksisterende afvikling af den københavnske S-bane betyder udrulningen af CBTC at køretidstillægget er reduceret og at togfølgetiden er reduceret, hvilket betyder at togene generelt kan køre med kortere afstande mellem hinanden. Ved omstilling til førerløs drift er der derfor ikke yderligere indregnet effekter af ændret køretidstillæg og togfølgetid.

Artiklen er opbygget af en række metodeafsnit, beskrivelse af de undersøgte alternativer samt resultatafsnit fra de forskellige beregninger. Endeligt følger et afsnit omkring konklusion og perspektivering.

Efterfølgende beskrives de forskelligt valgte metoder der er benyttet gennem analysen. Det drejer sig dels om simuleringen af køreplanerne i Railsys, dels beregninger af tidsgevinster og trafikspring ved brug af Landstrafikmodellen og dels brugen af den samfundsøkonomiske analyse.

Jernbanesimulering i Railsys

Railsys benyttes i dette projekt til at analysere hvilke køreplaner der fysisk kan lade sig gøre at operere med ud fra den givne infrastruktur. Dernæst simuleres køreplanerne ved at indlægge en bestemt mængde planlagte forsinkelser. Dermed fremkommer en indikation på hvor robust det enkelte køreplansoplæg er. Dette måles på rettidigheden, hvor antallet af tog der er mere end 3 minutter forsinket ved ankomst til den enkelte station sammenholdes med det samlede antal togankomster til en station. Endvidere ses på den gennemsnitlige forsinkelse ved ankomst til en station. Hermed er der mulighed for dels at se hvor stor en andel tog der er forsinkede og på hvilket niveau alle tog i gennemsnit er forsinkede.

Landstrafikmodellen

Trafikmodellen er udviklet af Transport DTU med henblik på at skabe en model hvor alle større regionale infrastrukturprojekter i Danmark kan sammenlignes på tværs, hvad end det er et jernbaneprojekt eller et vejprojekt. Dermed er den benyttede metode samt forudsætningerne for beregningerne de samme.

Modellen består af en række delmodeller, herunder en efterspørgselsmodel samt særskilte rutevalgmodeller for bl.a. vejtrafik og kollektiv trafik. Der er mulighed for overflytning i efterspørgslen mellem vejtrafik og kollektiv trafik. Denne effekt vil kort blive behandlet sidst i resultatafsnittet *Tidsgevinster og trafikspring i Landstrafikmodellen*, side 9.

Forudsætninger omkring arbejdspladser, befolkning og bilejerskab stammer fra Danmarks Statistik. Disse data bruges til at kalibrere basisåret 2010 for modellen. Prognoser for udviklingen indenfor de nævnte kategorier stammer fra Finansministeriet [2]. Disse data bruges til at estimere trafikken for fremtidsårene – eksempelvis år 2020.

Efterfølgende beskrives kort modellens udregning af en rejse gennem det kollektive net. Den kollektive rutevalgmodel er køreplansbaseret, hvilket vil sige at indkodningen af nettet er udført med eksakte afgangstider fra de enkelte stop i nettet og de rejsende derfor udlægges på eksakte afgange. Ruten bestemmes ud fra en defineret nyttefunktion der udregner den generaliserede rejsetid GRT [3]:

$$GRT = WalkT \cdot WalkTW + WaitT \cdot WaitTW + ConT \cdot ConTW + WaitZoneT \cdot WaitZoneTW + \sum_n (InVehT \cdot InVehTW) + NumOfCh * ChPen$$

I formlen indgår forskelligt vægtede tidselementer samt andre turelementer:

- $ConT$: Rejsetid på zoneophænget
- $InVehT$: Rejsetiden i transportmidlet
- $WaitT$: Ventetid ved skift
- $WalkT$: Skiftetid
- $WaitZoneT$: Ventetid ved startzonen før den første rejse foretages
- $ChPen$: Skiftestraf
- $NumOfCh$: Totale antal skift på rejsen
- n : Det valgte kollektive transportmiddel
- W : Vægten

Vægtene er forskellige og afhængige af turformålet. Formålet er inddelt i tre kategorier: Bolig-arbejdstrafik, erhvervstrafik og alt andet, herunder fritidsrejser. Vægtene mellem de forskellige tidselementer er forskellige, så modellen sigter hen mod en rejse med kort transporttid i selve nettet og færrest mulige skift. Vægtene for $WaitZoneTW$ er forholdsvis lav, hvilket betyder at tidspunktet hvor den rejsende sætter i

bevægelse i modellen godt kan ligge f.eks. 20 minutter efter det oprindelige starttidspunkt, hvis rejsetiden derefter bliver så kort som muligt og med færrest mulige skift. Der tages i modellen ikke højde for at den rejsende typisk ville ankomme noget tid før – f.eks. fem minutter – til den første station eller stoppested på ruten.

For at isolere effekten af de eksisterende rejsendes kollektive rutevalg fra ændringer i efterspørgslen, er der i projektet udført isolerede kollektive rutevalg, hvor efterspørgslen fastholdes gennem alle projektberegninger.

Den nuværende version af Landstrafikmodellen er primært blevet frigivet fordi den kan beskrive de overordnede rejsestrømme mellem regionerne i Danmark, der er relevant ved eksempelvis en Kattegatanalyse. Modellen kan derfor ikke nødvendigvis korrekt beskrive en køreplansændring på den københavnske S-bane i detaljer. Specielt kan zoneinddelingen være for upræcis i forhold til at belyse ændringer mellem en klassisk køreplan og en metrostyle køreplan.

Samfundsøkonomisk analyse

Formålet med en samfundsøkonomisk vurdering er at belyse fordele og ulemper systematisk ved et offentligt projekt. Dermed vil der kunne dannes grundlag for en prioritering af samfundets ressourcer. Indeværende projekt benytter en cost-benefit analyse, hvor ulemper og gevinster værdisættes.

Dette projekt benytter en beregningsperiode på 50 år, fordi det kategoriseres som et større anlægsprojekt, hvor gevinsterne over en kort periode er forholdsvis små, men over mange år giver et mere retvisende billede af den samfundsøkonomiske rentabilitet af et projekt.

Der udregnes en nutidsværdi for alle gevinster såvel som udgifter for at kunne sammenligne alle poster på samme grundlag. Der anvendes en bestemt diskonteringsrente, når fremtidige gevinster eller udgifter skal vurderes. Er projektets samlede nutidsværdi positivt, anses det for at være fordelagtigt at udføre [4]. For at gøre analysen konsistent med andre vurderinger er der på forhånd besluttet en række forudsætninger omkring økonomisk udvikling og værdisætning af f.eks. rejsetid. Dette fremgår af de transportøkonomiske enhedspriser. For at gøre selve analysen konsistent er der udarbejdet en skabelon – TERESA – der har til formål at sikre ens grundlag for analysen på tværs af de forskellige sektorer på transportområdet. Version 3.03 er benyttet i denne analyse.

Der er udført følsomhedsberegninger på resultaterne, hvor følgende parametre er blevet justeret:

- Tidsgevinster, ændring i forsinkelsestid, nedjusteret med 50 %
- Anlægsomkostninger, opjusteret med 50 %

De overordnede forudsætninger for denne samfundsøkonomiske analyse er præsenteret i den efterfølgende tabel.

.

Tabel 1. Overordnede parametre for den samfundsøkonomiske analyse

Parameter	Forudsætning
Anlægsoverslag, 2016-pris [5]	2,1 mia. kr.
Fordeling af anlægsudgifter	20 % for hvert år
Anlægsperiode – nævnte år inklusiv	2025-2029
Åbningsår	2030
Driftsperiode	50 år
Kalkulationsrente	4 % 2016-2051, 3 % 2051-2071
Årlig trafikvækst fra år 2025-2040	0 %
Nettoafgiftsfaktor	32,5 %
Arbejdsudbudsforvridning	20 %

Undersøgte alternativer

De undersøgte alternativer består, udover basisalternativet, af 8 forskellige køreplansalternativer. En oversigt over de benyttede oplæg fremgår af nedenstående Tabel 2.

Tabel 2. Anvendte køreplansalternativer.

Alternativ	Betjening			Driftskoncept		Sammenbinding af fingre
	NTO	STO	UTO	Homogen	Heterogen	
1 - Basis	×				×	
2 - Metrostyle v1		×		×		×
3 - Metrostyle v2		×		×		
4 - Klassisk v1		×			×	
5 - Klassisk v2		×			×	×
6 - Metrostyle v1 FD			×	×		×
7 - Metrostyle v2 FD			×	×		
8 - Klassisk FD v1			×		×	
9 - Klassisk FD v2			×		×	×

Basisoplægget skal vise dagens køreplan. Køreplanen for 2014 er valgt, fordi den nuværende køreplan for 2016 på S-banen tager højde for den igangværende udrulning af CBTC signalsystemet. Oplægget står i tabellen under *Betjening* anført som *NTO* – Normal Train Operation [5]. Dette er den mest normale betjeningsform for jernbaner, hvor lokomotivføreren har ansvaret for igangsætning, opbremsning og generel overvågning af toget. Ved de andre betjeningsformer *STO* – Semi-automatic Train Operation – og *UTO* – *Unattended Train Operation* – overtages mere af overvågningen af automatik. Ved *STO* gælder dette selve kørslen der udføres automatisk, mens igangsætning ved perron og betjening ved driftsuorden stadig varetages af lokomotivføreren. Ved *UTO* er al betjening af toget automatiseret og kan således også betragtes som førerløs drift [6].

Som det ses af Tabel 2 er der både udarbejdet køreplansalternativer med homogen drift, betegnet *Metrostyle*, og alternativer med heterogen drift, betegnet *Klassisk*. Homogen drift er et koncept som det kendes fra den københavnske metro, hvor alle tog stopper ved alle stationer på linjen. Heterogen drift skal forstås som en betjeningsform, hvor gennemgående tog kombineres med stoptog. Dermed tilgodeses kortere rejsetider samtidigt med at alle stationer som minimum betjenes af en linje hvert 10. minut i dagtimer. Det er for visse oplæg endvidere forsøgt at sammenbinde de enkelte fingre på S-banen, så flere

direkte relationer muliggøres uden skift undervejs. Ulempen ved denne sammenbinding er at afviklingen kompliceres væsentligt mere, fordi flere tog bliver afhængige af at andre tog kører rettidigt.

Betegnelsen *FD* for alternativ 6 til 9 er en forkortelse for førerløs drift.

En overordnet beskrivelse af forudsætningerne omkring infrastrukturen i Railsys er efterfølgende kort beskrevet:

- Der er ikke foretaget ændringer i infrastrukturen i alternativ 1, sammenlignet med dagens situation.
- I alle andre alternativer opereres med flydende blokke som sikringssystem på den frie strækning mellem stationerne, mens der inde omkring perronerne opereres med faste blokke.
- Der er foretaget en hastighedsopgradering til 120 km/t på Nordbanen mellem Lyngby og Hillerød, hvilket muliggør op til 2 minutters rejsetidsbesparelse i forhold til basisalternativ 1.

Omkring opsætningen af køreplanerne er der truffet følgende valg:

- Togenes køreegenskaber er generelt baseret på de nuværende københavnske S-banes SA-togsæt.
- Holdetiderne er generelt fastsat på baggrund af den gældende tjenestekøreplan for S-tog for 2016, med enkelte undtagelser.
- Den tekniske reaktionstid er i alternativ 2-5 – oplæggene uden førerløs drift – 6 sekunder.
- Med førerløs drift – alternativ 6-9 – er den tekniske reaktionstid 9 sekunder.
- Omkring vending af tog er der i alternativ 1-5 sat en grænse på minimum fem minutter fra toget ankommer til toget kan afgang igen.
- I oplæggene med førerløs drift – alternativ 6-9 – er der sat en grænse på minimum 40 sekunder.
- Der er generelt ikke ændret i betydeligt i størrelsen på den køreplanlagte vendetid.
- Der er generelt anvendt et køretidstillæg i basisalternativet på 13 %. Køretidstillægget er i alle andre alternativer generelt reduceret til 8 %.

For nærmere uddybning omkring forudsætninger i Railsys og opsætning af køreplaner henvises til forfatterens kandidatafhandling [1].

Resultater

I det efterfølgende afsnit følger resultaterne fra de forskellige analyser af køreplansoplæggene. Først følger et afsnit omkring simuleringen af køreplanerne. Dernæst følger resultaterne fra Landstrafikmodellen, og sidst følger et afsnit omkring den samlede samfundsøkonomiske vurdering af køreplansoplæggene samt førerløs drift.

Simuleringer i Railsys

De overordnede resultater for simuleringerne af de forskellige driftsoplæg fremgår af nedenstående Tabel 3.

Tabel 3. Overordnede resultater fra simuleringerne i Railsys.

Samlet resultat af simuleringer		
Alternativ	Rettidighed på 2:29 (%)	Middelforsinkelse (mm:ss)
1 - Basis	98,8	00:14
2 - Metrostyle v1	86,0	01:09
3 - Metrostyle v2	98,8	00:44
4 - Klassisk v1	97,2	00:27
5 - Klassisk v2	92,5	00:47
6 - Metrostyle v1 FD	94,0	00:47
7 - Metrostyle v2 FD	97,0	00:34
8 - Klassisk v1 FD	98,6	00:19
9 - Klassisk v2 FD	95,6	00:43

Det fremgår at alternativ 1 og 3 har den højeste rettidighed. For alternativ 1 skyldes det at der generelt anvendes et højere køretidstillæg end i alle de andre alternativer – specielt inde omkring det centrale afsnit ved København H. Endvidere afvikles der højst 30 tog i timen pr. retning på det centrale afsnit, ligesom alternativ 4 og 8. I de andre alternativer afvikles der op mod 35-36 tog pr. time pr. retning. For alternativ 3 skyldes den høje rettidighed at linjerne er meget isolerede fra hinanden, eftersom de enkelte fingre kun betjenes af en enkelt linje. Kun på det centrale afsnit mellem Hellerup og Valby betjenes strækningen af flere linjer.

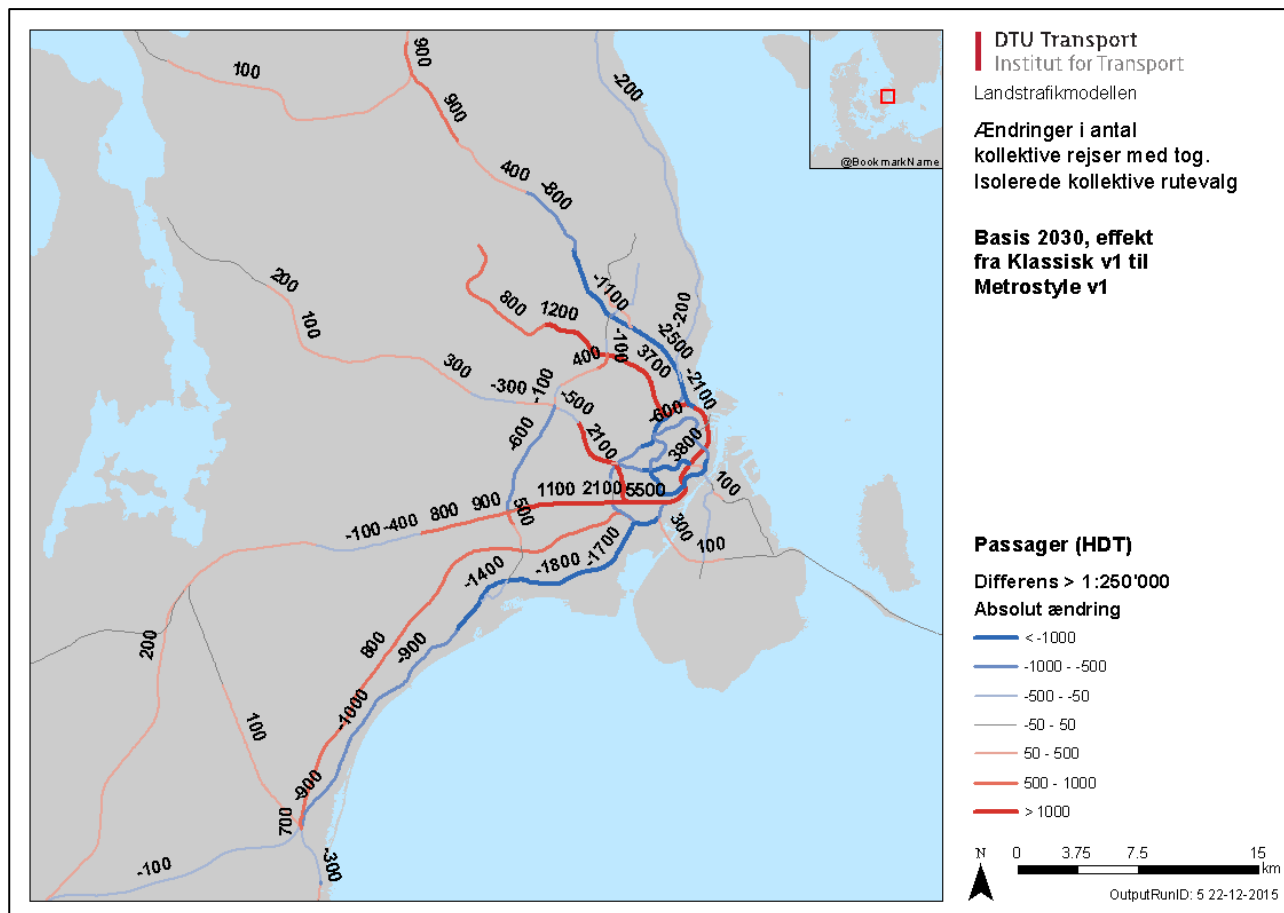
I den samfundsøkonomiske vurdering er effekterne i middelforsinkelserne medtaget. Effekterne er udregnet ved, for hver delstrækning mellem to stationer, at multiplicere antallet af passagerer med den gennemsnitlige effekt i ankomstmiddelforsinkelsen for de berørte linjer. Den fulde gevinst tilfalder de eksisterende rejser, mens den halve gevinst tilfalder nye rejser.

Tidsgevinster og trafikspring i Landstrafikmodellen

Da der ikke er nogen betydelig effekt i rejsetiden for alternativerne med førerløs drift, analyseres disse ikke i Landstrafikmodellen.

For de isolerede modelkørsler er der generelt tale om ændringer der kan forklares ud fra de ændringer der er foretaget i køreplanen. Som eksempel er nedenfor vist ændringerne geografisk i antal rejser på de enkelte fingre i nettet, fra alternativ 4, Klassisk v1 til alternativ 2, Metrostyle v1. Dette sammenholdes senere med ændringerne for de samme modelkørsler, men hvor hele modellen har været kørt igennem.

Det fremgår af Figur 1 at de største absolutte nedgange i antal daglige rejser sker på Køge Bugt-banen og Nordbanen til Hillerød. Dette skyldes rejsetidsforlængelsen på strækningerne som følge af overgangen fra betjening med en vis andel af gennemgående tog til betjening med udelukkende stoptog. Endvidere sker der stigninger på op mod 3.700 daglige rejser på Farumbanen og Vestbanen mod Høje Taastrup. Dette skyldes at der på disse baner i forvejen ikke var specielt store udsving i rejsetiderne mellem de forskellige linjer, men at der omvendt på visse stationer er sket mere end en fordobling i antal daglige afgang.



Figur 1. Ændringer i strækningsbelastninger fra alternativ 4 til 2

Sammenholdes dette med ændringer mellem de samme alternativer, men hvor den fulde Landstrafikmodel inklusiv efterspørgselsmodellen er benyttet, fremkommer generelt de samme ændringer. De absolutte ændringer langs strækningerne er dog på et noget højere niveau, fordi modelåret er ændret fra 2010 til 2030. Der henvises endvidere til forfatterens kandidatafhandling for en dybere gennemgang af effekterne fra isolerede kollektive rutevalg til effekterne af den fulde Landstrafikmodel [1].

Efterfølgende beskrives ændringer for de samlede kørsler med Landstrafikmodellen. Nedenfor vises Tabel 4 med de overordnede ændringer mellem de undersøgte alternativer. Det fremgår at alternativ 5 – Klassisk v2 – har flest rejser. Relativt set er der tale om meget små ændringer, men dog større end hvis ændringer mellem to identiske kørsler sammenlignes [1]. Det fremgår endvidere at begge alternativer med metrostyle køreplan på S-banen – alternativ 2 og 3 – har færre rejser end de andre opgraderede køreplansoplæg.

Tabel 4. Overordnede resultater i LTM

Hele modellen	Rejser			Personkilometer		
	Relativ og absolut vækst fra Basis			Relativ og absolut vækst fra Basis		
Alternativ	Samlet	/ Klassisk v1		Samlet	/ Klassisk v1	
1 - Basis	17.333.712	-	-	405.981.313	-	-
2 - Metrostyle v1	17.333.761	-0,0046%	-796	406.227.310	-0,023%	-92.404
3 - Metrostyle v2	17.333.405	-0,0066%	-1.152	406.091.217	-0,056%	-228.497
4 - Klassisk v1	17.334.558	0,0049%	846	406.319.714	0,083%	338.401
5 - Klassisk v2	17.335.054	0,0029%	497	406.417.731	0,024%	98.017

Af Tabel 5 fremgår ændringerne isoleret for den kollektive trafik. Generelt er der tale om de samme tendenser, bortset fra at alternativ 2 – Metrostyle v1 – her har flere daglige rejser end alternativ 4 – Klassisk v1.

Tabel 5. Overordnede ændringer i den kollektive model

	Kollektive rejser			Passagerkilometer		
	Relativ og absolut vækst fra Basis			Relativ og absolut vækst fra Basis		
Alternativ	Samlet	/ Klassisk v1		Samlet	/ Klassisk v1	
1 - Basis	1.778.345	-	-	39.580.190	-	-
2 - Metrostyle v1	1.790.242	0,061%	1.090	39.790.173	-0,02%	-7.667
3 - Metrostyle v2	1.788.267	-0,049%	-885	39.706.787	-0,23%	-91.053
4 - Klassisk v1	1.789.152	0,608%	10.807	39.797.840	0,55%	217.649
5 - Klassisk v2	1.793.693	0,254%	4.541	39.885.068	0,22%	87.229

Samtidigt ses en nedgang i antal personkilometer, og årsagen til den samlede nedgang i antal ture skyldes derfor at fremgangen i antal korte ture er højere end tilbagegangen i lange ture. Tilbagegangen i lange ture skyldes rejsetidsforlængelser for en del relationer langs Køge Bugt-banen, Frederikssundbanen og Nordbanen til Hillerød som følge af rejsetidsforlængelser. Dette underbygges af den efterfølgende Tabel 6, der viser ændringerne i den gennemsnitlige turlængde samt rejsetidsforbrug fordelt på de forskellige tidskomponenter. En forklaring til forkortelserne benyttet i tabellen følger her:

- M_j : Samlet rejsetid i minutter
- M_{InVeh} : Rejsetid brugt i de kollektive transportmidler i minutter
- M_{WaitCh} : Ventetid ved skift i minutter
- M_{Change} : Skiftetid på skiftekanter i minutter
- M_{WaitSt} : Ventetid ved starten af rejsen i minutter
- $M_{NumChange}$: Antal skift
- M_l : Antal tilbagelagte kilometer for rejsen

Tabel 6. Gennemsnitligt tidsforbrug og turlængde i det kollektive net.

Alternativ	M_j	M_{InVeh}	M_{WaitCh}	M_{Change}	M_{WaitSt}	$M_{NumChange}$	M_L
1 - Basis	38,48	20,46	0,96	0,73	7,28	0,32	22,26
2 - Metrostyle v1	38,46	20,44	0,92	0,72	7,07	0,32	22,23
3 - Metrostyle v2	38,47	20,43	0,93	0,72	7,04	0,32	22,20
4 - Klassisk v1	38,37	20,30	0,96	0,72	7,26	0,32	22,24
5 - Klassisk v2	38,34	20,24	0,95	0,72	7,20	0,32	22,24
Vækst - fra Alternativ 1 til 4	-0,3%	-0,8%	-0,1%	-1,5%	-0,2%	-1,4%	-0,1%
Vækst - fra Alternativ 4 til 2	0,2%	0,7%	-4,5%	0,1%	-2,6%	-0,1%	-0,1%
Vækst - fra Alternativ 4 til 3	0,2%	0,6%	-3,3%	0,0%	-3,1%	0,1%	-0,2%
Vækst - fra Alternativ 4 til 5	-0,1%	-0,3%	-1,5%	-0,1%	-0,8%	-0,1%	0,0%
Ekstra 4, Klassisk v1	38,37	20,30	0,96	0,72	7,26	0,32	22,24
Vækst - fra Alternativ 4 til dublet	-0,0002%	0,0000%	0,0001%	0,0004%	0,0004%	0,0003%	-0,0001%

Det ses af tabellen at der sker en nedgang på 0,1-0,2 % fra Klassisk v1 til Metrostyle v1 og v2 i den gennemsnitlige turlængde M_L . Dette virker umiddelbart som en negligérbar ændring, som kunne forklares af de generelle udsving i modellens resultater. Som det dog fremgår af de nederste rækker i tabellen ses det at ændringer mellem identiske kørsler kun kan forklare ændringer i størrelsesorden 0,0001 %.

Med hensyn til overflytning mellem vejtrafik og kollektiv trafik i efterspørgselsmodellen, ses der, om end relativt små, betydelige ændringer i efterspørgslen. I overordnede tal er ændringerne dog generelt ikke højere end det kan forklares med generelle udsving i modellen, jævnfør Tabel 7.

Tabel 7. Sammenligning af antal personrejser i vejvalgsmodellen.

Alternativ	Personrejser på vejnettet		
	Samlet	Relativ vækst fra Basis / Klassisk v1	Absolut vækst fra Basis / Klassisk v1
1 - Basis	7.636.983	-	
2 - Metrostyle v1	7.634.593	0,006%	471
3 - Metrostyle v2	7.634.862	0,010%	739
4 - Klassisk v1	7.634.770	-0,029%	-2.214
5 - Klassisk v2	7.634.123	-0,008%	-647
Ekstra Klassisk v1	7.634.906	-0,027%	-2.078

Ses der på de største ændringer i antal rejser fra den enkelte zone, er zonerne placeret i Hovedstadsområdet. F.eks. ses der generelt en tilbagegang i antal rejser i vejvalgsmodellen fra zoner langs Nordbanen mod Hillerød, fra alternativ 1 til alternativ 4. Da disse tilbagegange modvejes af en vækst i de samme zoner for den kollektive trafik, antages det at der her er tale om en overflytning mellem efterspørgslen for de to transporttyper. Tilsvarende kan der også findes zoner fra alternativ 4 til alternativ 5, hvor effekten i antal rejser fra de enkelte zoner for de to transporttyper kan forklares med overflytning.

Det kan konkluderes at Landstrafikmodellen generelt viser forklarlige ændringer som kan forklares med de ændringer der generelt er foretaget mellem køreplansoplæggene. Selvom de overordnede resultater for modellen generelt ikke er på et niveau, hvor generelle udsving mellem resultaterne kan udelukkes, kan resultaterne fra den kollektive model isoleret godt forklares ud fra køreplansændringerne.

Samfundsøkonomiske resultater

Efterfølgende i Tabel 8 præsenteres den kombinerede effekt af førerløs drift og de forskellige køreplansoplæg. Effekterne skal ses i forhold til oplægget Klassisk v1 *uden* førerløs drift. Der fremkommer

generelt negative resultater ved et ændret køreplansoplæg med netto-utidsværdier på mellem 10,8 og 34,7 mio. kr. Der ses et positivt resultat for Klassisk v1. Årsagen til resultaterne skyldes generelt ændringerne i passagerforsinkelserne fra simuleringerne – posten ' – heraf forsinkelsetid'.

Tabel 8. Samfundsøkonomisk resultat ved effekt af førerløs drift og køreplansoplæg, sammenlignet med alternativ 4.

Resultat - samfundsøkonomisk vurdering af førerløs drift og forskellige køreplansoplæg				
mio. DKK	Metrostyle v1	Metrostyle v2	Klassisk v1	Klassisk v2
Anlægsomkostninger	-1.826	-1.826	-1.826	-1.826
Restværdi	302	302	302	302
Fornyelse- og vedligeholdelsesomkostninger, bane	-2.704	-2.484	-1.477	-2.011
Driftsomkostninger, passagertog	821	1.328	4.138	1.621
- heraf lokomotivfører	8.792	8.792	8.792	8.792
- heraf metrostewards	-5.374	-4.728	-3.301	-4.438
- heraf materiel	-2.597	-2.736	-1.353	-2.732
Billetindtægter, kollektiv trafik	-134	-426	-	363
Tidsgevinster, kollektiv transport	-26.488	-5.904	6.617	-21.543
- heraf rejsetid	-2.399	-2.364	-	821
- heraf forsinkelsetid	-29.593	-9.235	6.617	-23.462
- heraf til- og frabringertid	23	-53	-	-426
- heraf skiftetid	4.672	4.967	-	1.339
- heraf frekvens	728	797	-	134
- heraf skiftestraf	81	-17	-	50
Øvrige poster	-4.700	-1.740	1.031	-3.512
I alt netto-utidsværdi (NNV)	-34.728	-10.751	8.785	-26.605

Effekten 'Øvrige poster' dækker over statens arbejdsudbudseffekter, afgiftskonsekvenser og eksterne omkostninger, såsom luftforurening.

Følsomhedsberegninger på tidsgevinster og anlægsoverslag

Som beskrevet i metodeafsnittet på side 4 er der udført to følsomhedsberegninger på resultaterne. Resultaterne fremgår af nedenstående Tabel 9 og det ses at en forøgelse af anlægsoverslaget på 50 % ikke ændrer betydeligt på resultatet af de forskellige effektberegninger. Valget af denne følsomhedsberegning skyldes en generel usikkerhed omkring den anslåede udgift kan dække de fulde udgifter forbundet ved en omstilling fra et konventionelt jernbaneanlæg til et anlæg hvor der opereres med førerløs drift. Der er så vidt vides ingen eksempler på denne type omstilling.

Tabel 9. Netto-utidsværdien for følsomhedsberegningerne.

Følsomhedsberegninger, samfundsøkonomisk vurdering				
I alt netto-utidsværdi (NNV) (mio. DKK)	Metrostyle v1	Metrostyle v2	Klassisk v1	Klassisk v2
Anlægsoverslag +50%	-35.673	-11.696	7.840	-27.550
Tidseffekt, forsinkelsetid ÷50%	-17.998	-5.530	5.044	-13.342

I den anden følsomhedsberegning ses et markant anderledes resultat for de enkelte alternativer ved en halvering af tidseffekterne specifikt for passagerforsinkelserne fra jernbanesimuleringerne. Konklusionen på hvilket alternativ der klarer sig bedst ændres dog ikke. Effekten af passagerforsinkelserne er således stadig den mest betydende faktor for resultaterne. Årsagen til at effekten af forsinkelsetiden er blevet udsat for en følsomhedsvurdering er at denne tidseffekt for passagererne i det oprindelige resultat fra Tabel 8 er den klart mest dominerende effekt for resultatet.

Konklusion og perspektivering

Simuleringen af køreplanseksemplerne viser generelt at koncepter, hvor strækningerne kun betjenes af en enkelt linje, er betydeligt mere robuste overfor forstyrrelser i driften. Endvidere ses det at overgangen til førerløs drift generelt medfører betydelige positive ændringer i rettidighed såvel som middelforsinkelsen, som følge af den mere fleksible vending.

Trafikmodelleringen af de fem forskellige driftsoplæg viser at den kollektive trafik har flest rejser ved at fastholde det nuværende koncept med gennemgående tog der kombineres med stoptog.

Metrostyleoplæggene har således begge et betydeligt lavere antal rejser i den kollektive model.

Den samfundsøkonomiske vurdering af førerløs drift viser at en omstilling til førerløs drift fra det nuværende driftskoncept giver negative nettonutidsværdier. Værst ser det ud ved en omstilling af driften til et metrostyleoplæg – Metrostyle v1 – med en negativ nettonutidsværdi på 34,7 mia. kr. Resultatet skyldes generelt store negative effekter fra jernbanesimuleringen, hvor passagertallene på de enkelte delstrækninger er ganget med effekten i ankomstmiddelforsinkelsen. Halveres tidsgevinsten specifikt for denne tidskomponent, ser resultaterne for de forskellige alternativer anderledes ud. Der ændres dog ikke på konklusionen om hvilket alternativ der klarer sig bedst. Konklusionen ud fra denne samfundsøkonomiske vurdering er derfor at en omstilling til førerløs drift helst skal ske uden en ændring af det nuværende driftsoplæg – Klassisk v1.

Effekten i forbindelse med vending, hvor toget skifter kørselsretning, kunne i princippet også opnås ved konventionel drift med lokomotivfører ved at have en ekstra lokomotivfører klar ved endestationen, der skal stå i modsat ende af toget for at overtage styringen umiddelbart efter at toget er ankommet. Dette forudsætter at overleveringen af toget fra den ene lokomotivfører til den anden lokomotivfører kan gøres ved et minimalt tidsforbrug på under ca. ½ minut, og uden at de to ser hinanden ansigt til ansigt som det ellers praktiseres i dagens drift. Dermed fjernes behovet for yderligere anlægsinvesteringer for at opnå resultaterne fra simuleringerne. Ved at se bort fra forsinkelseeffekten i den samfundsøkonomiske vurdering ændres der dog ikke på konklusionen om hvordan alternativerne præsterer overfor hinanden.

Referencer

- [1] Molich, T., 2016. *Simulering, trafikmodellering og samfundsøkonomisk vurdering af automatisk S-togsdrift*. Kandidatspeciale, Danmarks Tekniske Universitet.
- [2] Brems, C.R. & Pedersen, S.H., januar 2016. *Forudsætninger for Basis 2020 og Basis 2030*. Notat, DTU Transport. Tilgængelig her: <http://www.landstrafikmodellen.dk/Dokumentation> - hentet 02.08.16.
- [3] Israelsen, T.(Rapidis), 2013. *LTM supportforum - Nyttefunktionen for den kollektive rutevalgsmode*.
- [4] Transportministeriet, marts 2015. *Manual for samfundsøkonomisk analyse på transportområdet – anvendt metode og praksis i Transportministeriet*.
- [5] Transportministeriet, 2013. *Analyse af mulighederne for automatisk S-banedrift*.
- [6] Parsons Transportation Group, 2011. *Copenhagen S-Bane Automation Study*.