

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



Stationskapacitet

Alex Landex, al@transport.dtu.dk

DTU Transport

1 Abstrakt

Stationer er ofte begrænsende for kapaciteten i jernbanenetværk da der er brug for ekstra spor når tog holder stille, tog har brug for længere opholdstid når de skifter køreretning og der (ofte) er konfliktende togveje. På trods af at stationer ofte udgør kapacitetsmæssige flaskehalse fokuserer de fleste metoder til analyse af jernbanekapacitet på den frie bane mellem stationerne.

Denne artikel præsenterer tre forskellige metoder til at analysere stationskapacitet:

1. En metode til bestemmelse af behovet for perronspor på stationer
2. En skalerbar metode til at analysere konflikter i sporskiftezoner
3. En metode til analyse af hvor optimalt perronsporskapaaciteten udnyttes ved at analysere togenes ankomst- og afgangsmønstre.

Metoderne beskrevet i denne artikel kan bruges separat til at analysere specifikke karakteristika for stationskapacitet eller de kan kombineres til at give et detaljeret billede af stationskapaciteten. Derudover viser artiklen hvordan de udviklede metoder kan bruges til at analysere kapacitetsfremmende initiativer på Københavns Lufthavn, Kastrup station.

2 Introduktion

Vurdering af jernbanekapacitet er essentielt for at kunne sikre en effektiv syring og udnyttelse af kapaciteten. Der er udviklet flere metoder, fx UIC 406 (UIC 2004; Landex 2009; Lindner 2009; Landex 2008 Höllmüller 2005; Wahlborg 2004), til bestemmelse af kapacitetsudnyttelsen. De fleste af disse metoder fokuserer på strækningerne mellem stationerne (den fri bane) selvom det oftest er stationerne der er flaskehalsene på banerne (Harris 2006; Yuan 2004).

Stationskapaciteten bestemmes af sporlayoutet, perronerne, signalerne, togene og køreplanen (Hansen 2000). En station bliver en flaskehals når stationen ikke har tilstrækkelig mange perronspor og/eller hvis sporlayoutet resulterer i mange konfliktende togveje så togene holder i vejen for hinanden.

Kapacitetsanalyser af stationer og udfletninger er mere komplekse end for fri bane, da stationer ofte har rangerbevægelser og konfliktende togveje. Nogle af disse konfliktende togveje kan ofte undgås hvis der er tilstrækkeligt med mulige togveje gennem stationen. Kapacitetsanalyserne på stationerne kompliceres yderligere af forlængede holdetider for togene hvis fx der er mange passagerer, togene skifter køreretning, togene skal caters, at der skal sikres gode skiftemuligheder mellem togene og/eller nogle af togene starter/ender på stationen.

Eftersom større stationer ikke kan analyseres ved at benytte de samme metoder som for fri bane er der behov for separate kapacitetsstudier af disse stationer. Dette aktualiseres af at de særlige forhold omkring større stationer kan være bestemmende for hvordan trafikken kan afvikles på hele jernbanen.

Kapacitetsanalyser for stationer kan opdeles i to principielle metoder (Fernandez 2010):

1. Analytiske metoder som bestemmer kapaciteten ved hjælp af formler
2. Simulationsmodeller som bestemmer kapaciteten sammen med andre driftsmål

Denne artikel beskriver analytiske metoder til bestemmelse af stationskapacitet. I afsnit 3 beskrives behovet for perronspor og i afsnit 4 beskrives en skalerbar metode til beregning af risikoen for konflikter i sporskifte zoner. Til sidst – inden konklusionen i afsnit 6 – beskrive afsnit 5 en metode til at analysere hvor effektivt sporene på en station er udnyttet.

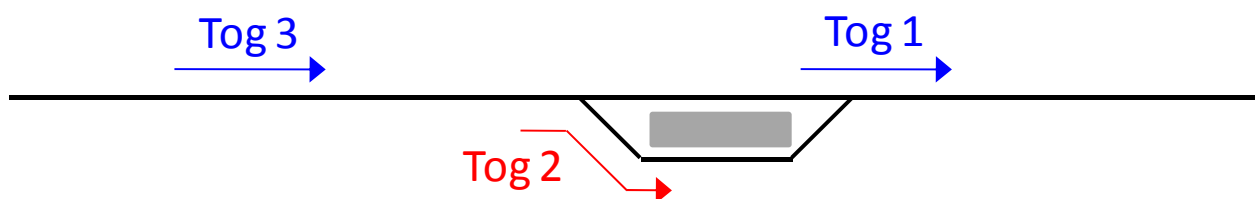
3 Behovet for perronspor

Blokafsnit ved perronspor er besat længere tid fordi tog holder stille eller bremser/accelererer. Denne ekstra tid (Δt_{st}) kan beregnes ud fra togets nedbremsningstid (t_{dec}), holdetiden (t_{dwell}) og tiden toget accelererer (t_{acc}) sammenlignet med den tid det tager for et gennemkørende tog at passere strækningen (t_0).

$$\Delta t_{st} = t_{dec} + t_{dwell} + t_{acc} - t_0$$

1

For at undgå at en station bliver til en flaskehals på en banestrækning kan der ved stationerne etableres flere perronspor end der er strækningsspor. På denne måde kan et tog (tog 2) køre ind på stationen mens et andet tog (tog 1) forlader stationen, og togfølgetiden mellem togene kan reduceres, se figur 1. Udover at reducere togfølgetiden kan de(t) ekstra spor også muliggøre overhalinger, hvilket også kan øge kapaciteten på banestrækningen (Landex 2008).



Figur 1 - Flere perronspor kan muliggøre at et tog kører ind på stationen mens et andet tog forlader stationen.

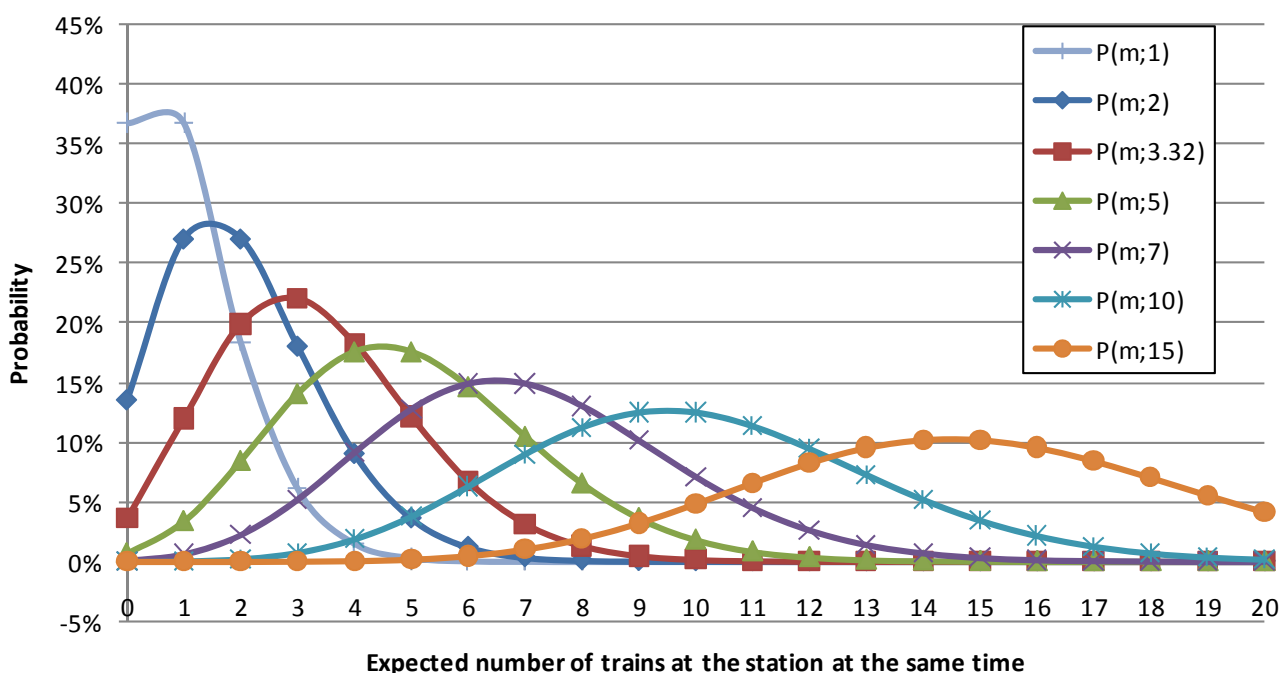
Ved større stationer er der behov for flere (perron)spor end ved mindre stationer da togene holder længere tid pga. flere passagerer, catering, afventning af korrespondancer og/eller at nogle tog udgår fra/ender på stationen. Ved stationer i forbindelse med udfletninger hvor flere banelinier mødes er heterogen trafik ikke et ligeså stort problem som på mindre stationer da alle passagertog normalt standser ved disse stationer. Bundtning af tog på fri bane (for at reducere kapacitetsforbruget her) kan dog føre til forlængede holdetider – specielt i tilfælde af driftsforstyrrelser – ved stationerne da det er nødvendigt med en bestemt togrækkefølge. Den forlængede holdetid kan medføre et større behov for perronspor på stationen.

Ifølge (Potthoff 1962) kan sandsynligheden (P) for at et givent antal perronspor (m) benyttes på et givent tidspunkt bestemmes ved en Poissonfordeling ud fra et gennemsnitligt behov for perronspor (α),

$$P(m; \alpha) = \frac{\alpha^m \cdot e^{-\alpha}}{m!}$$

2

Poissonfordelingen er afhængig af det gennemsnitlige antal perronspor der er behov for. Hvis der gennemsnitligt kun er behov for få perronspor er det forventede antal tog på stationen på samme tid lav. Omvendt, i tilfælde af at der er behov for et stort gennemsnitligt antal perronspor er sandsynligheden for få tog ved stationen lav og grafen er fladere, se figur 2.



Figur 2 – Poissonfordelinger med forskellige gennemsnitlige perronsporsbenyttelser (Landex 2011).

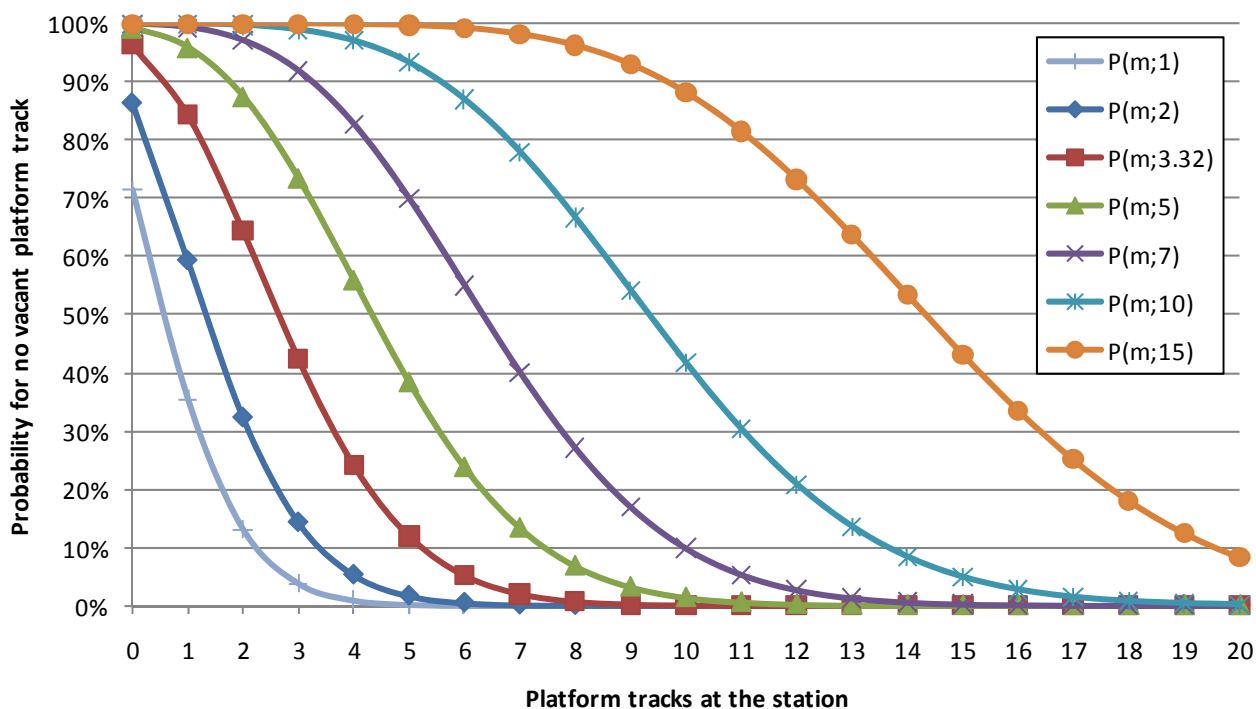
Det gennemsnitlige behov for perronspor (α) i formel 2 kan beregnes som summen af blokbesættelsestiderne for perronsporene ($\sum t_B$) divideret med tidsperioden (T),

$$\alpha = \frac{\sum t_B}{T} \quad 3$$

Poissonfordelingen i formel 2 giver kun sandsynligheden for at et givent antal perronspor (m) ikke er optaget på samme tid – der gives ingen information om hvor behovet for antallet af perronspor. En station med m perronspor har kun plads til m tog. Det n 'te tog (givet at $n = m + 1$) kan ikke få adgang til et perronspor før et andet tog har forladt perronsporet først. Sandsynligheden for at det n 'te tog ankommer og IKKE får adgang til perronsporet uden at vente (Ψ) kan beregnes som 1 minus summen af sandsynligheder for at 0, 1, ..., m perronspor er optaget og det n 'te tog ankommer,

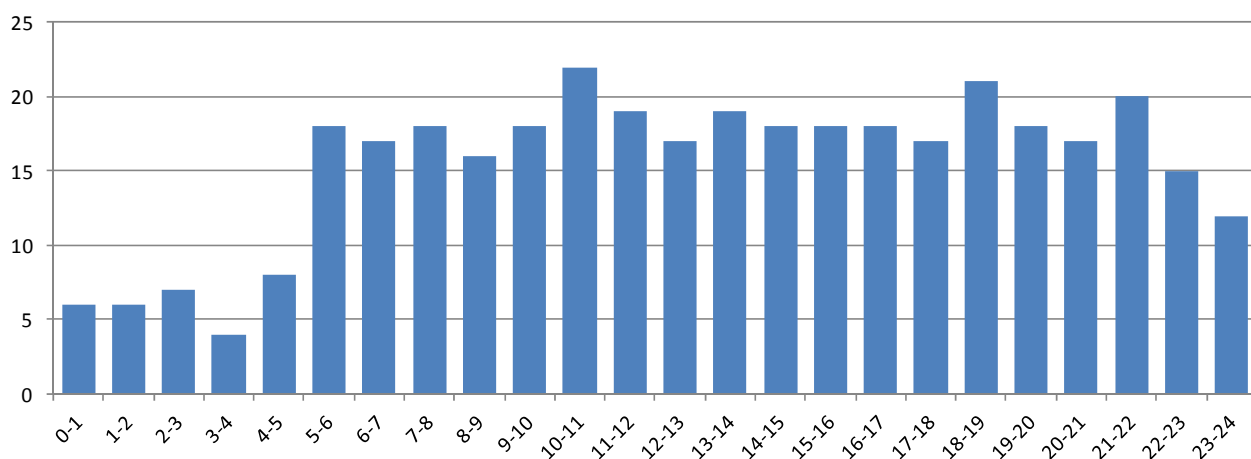
$$\Psi = 1 - \sum_{m=0}^n P(m; \alpha) = 1 - \sum_{m=0}^n \frac{\alpha^m \cdot e^{-\alpha}}{m!} = \int_0^{\alpha} \frac{\alpha^m \cdot e^{-\alpha}}{n!} d\alpha \quad 4$$

Baseret på beregninger baseret på formel 4 viser figur 3 at sandsynligheden for at det n 'te tog ikke kan komme til perron reduceres desto flere perronspor der er til rådighed. Endvidere viser figuren at jo højere behovet er for perronspor desto større sandsynlighed er der for at alle perronspor er optaget. Figur 3 viser at sandsynligheden for at et fjerde tog ankommer – og afvise ($n = 4$) – på en station med 3 perronspor ($m = 3$) er 5,27% når der gennemsnitligt er behov for 2 perronspor ($\alpha = 2$).



Figur 3 – Poissonfordelingen af den akkumulerede sandsynlighed for at det n'te tog ikke kan få direkte adgang til et perronspor (Landex 2011).

For at kunne denne metode er det nødvendigt at definere acceptniveauet for at et ankomende tog ikke kan få direkte adgang til perronspor. Ifølge (Potthoff 1962) er 1% sandsynlighed ($\Psi = 1\%$) over en 24 timers periode det bedste acceptniveau.¹ Der kører flere tog i myldretiderne end om natten, hvorfor der er behov for forskellige acceptniveauer for forskellige tidsperioder. Derudover fordeler togene sig forskelligt over døgnet for forskellige stationer/lande. Nogle lande reducerer antallet af tog udenfor myldretiderne mens andre reducerer kapaciteten i togene ved at køre kortere tog. I Danmark kører der nogenlunde lige mange tog i dagstimerne, og siddepladskapaciteten justeres så kapaciteten matcher efterspørgslen ved at ændre længden af togene, se figur 4. Det er derfor nødvendigt at have forskellige Ψ -værdier til at beskrive forskellige acceptniveauer for ikke at få direkte adgang til et perronspor for forskellige stationer/lande på forskellige tidspunkter henover døgnet.

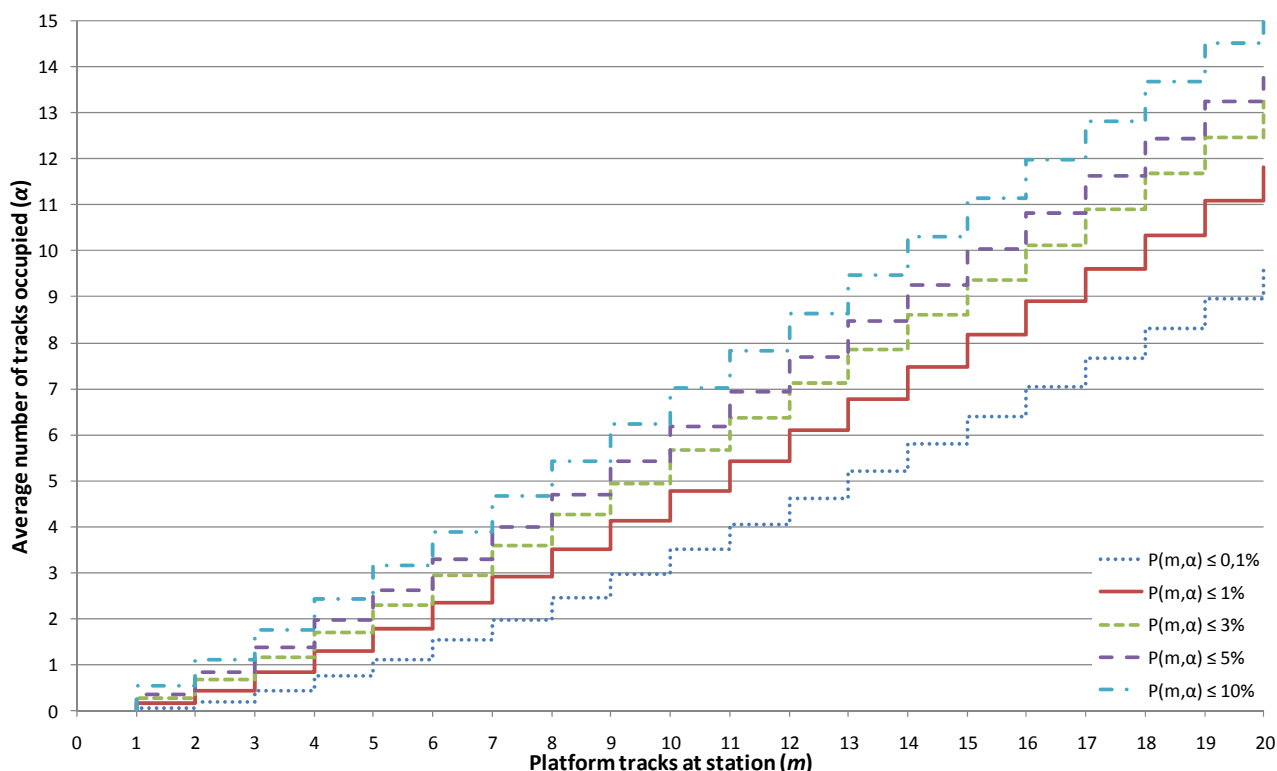


Figur 4 – Antal planlagte tog pr. time på Københavns Lufthavn, Kastrup station i K10.

¹ Et tilsvarende resultat er fundet ved en indledende analyse af Københavns Hovedbanegård (Jensen 2010).

Sandsynligheden for ikke at få direkte adgang til et perronspor er nødt til at være lav når der benyttes en statistisk metode da tog der ikke får direkte adgang til et perronspor antages at blive afvist ved stationen – og ikke kommer til at holde i kø for at få adgang til et perronspor.²

Når det ønskede acceptniveau for ikke at få direkte adgang til et perronspor (Ψ) er blevet besluttet kan beregningsmetoden benyttes til at estimere det antal perronspor der minimum er nødvendigt på en station. Endvidere kan metoden benyttes til at beslutte hvor mange perronspor der i gennemsnit må være besat på samme tid (og derved hvor mange tog der må benytte stationen), se figur 5.



Figur 5 – Behovet for perronspor (Landex 2011).

Figur 5 viser at en station med to perronspor ikke bør have en perronsporsbenyttelse på mere end 0,44 ($\alpha \leq 0,44$) hvis sandsynligheden for at et tog ikke får direkte adgang til et perronspor ikke må overstige 1% ($\Psi = 1\%$). Lignende resultater udledt fra figur 5 er opsummeret i tabel 1. Denne tabel viser at jo flere perronspor der er til rådighed på stationen desto mere kan det enkelte spor udnyttes uden at sandsynligheden for at tog ikke får direkte adgang til et perronspor stiger.

Tabel 1 – Anbefalet maksimal udnyttelse af perronspor (α) afhængig af antallet af spor (m) og den ønskede sandsynlighed for at et tog ikke får direkte adgang til et perronspor (Ψ) (Landex 2011).

Antal spor (m)	$\Psi = 0,1$	$\Psi = 1$	$\Psi = 3$	$\Psi = 5$	$\Psi = 10$
1	0,05	0,15	0,27	0,36	0,53
2	0,19	0,44	0,66	0,82	1,10
3	0,43	0,82	1,16	1,37	1,74
4	0,74	1,28	1,71	1,97	2,43
...	...	...	...	...	...

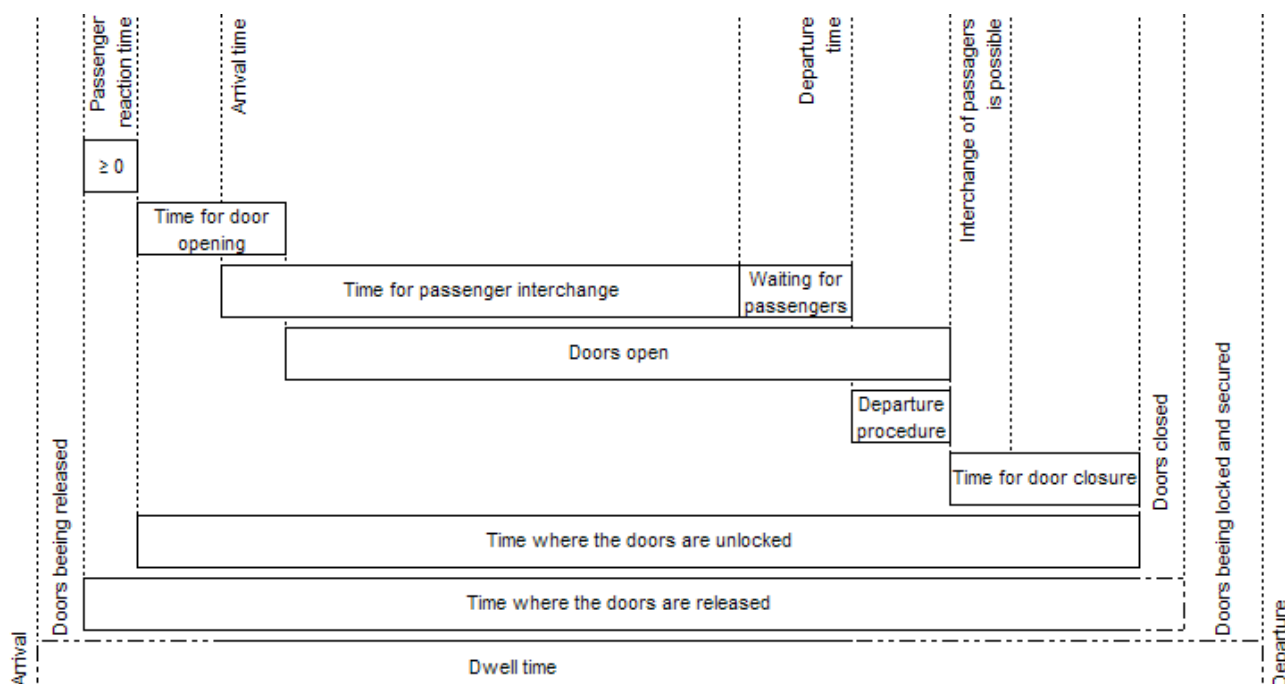
For mindre stationer på fri bane er der ingen tilfældig ankomst til stationen da ankomsterne er planlagt og tiden mellem ankommende tog afhængig af minimumstogfølgetiden på banen. For større stationer og

² For at undgå problemet med at tog bliver afvist ved stationen er det nødvendigt at benytte andre metoder – fx en køteoretisk metode som beskrevet i (Wendler 2008).

udfletninger er der imidlertid en vis grad af tilfældighed i ankomsterne da togene kan ankomme fra forskellige baner og der kan være forsinkelser. Endvidere vil holdetiden på stationen variere, hvilket resulterer i et varierende antal tog ved perronen. Den i dette afsnit præsenterede statistiske metode er derfor ikke velegnet for simple mindre simple stationer, men kun for større og mere komplekse stationer hvor en vis grad af stokastisk kan forventes.

3.1 Mere stationskapacitet ved kortere holdetid

Der kan opnås mere stationskapacitet ved at reducere den tid en togvej besætter et perronspor. Dette kan gøres ved at reducere risikoen for afgangsforsinkelser og/eller ved (især ved udfletninger) at undgå at sætte togvejen tidligere end højst nødvendigt. Derudover kan holdetiden ved perronen også reduceres ved at sikre hurtigere passagerudveksling, hurtigere døråbning/-lukning, bedre accelerationsegenskaber osv. For at reducere holdetiden ved perronen er det nødvendigt at analysere hvor der kan spares tid. Dette kræver at holdetiden opdeles i tidselementer (se figur 6) som kan måles og sammenlignes for forskellige situationer.



Figur 6 – Tidselementer ved et stationsophold med passagerudveksling. Baseret på (Kirchoff 2003a; Buchmüller 2008).

Passagerudvekslingstiden afhænger af antallet af passagerer og antallet af døre såvel som dørenes brede og placering i toget (Buchmüller 2008, Kirchoff 2003a). Derudover har mængden af bagage, stationsudformningen og højdeforskellen mellem tog og perron også en indflydelse på holdetiden (Kirchoff 2003b).

Proceduren for dørlukning og afgangsproceduren varierer afhængig af togtypen. På lokale baner (fx S-tog) er afgangsproceduren ofte hurtig (kun nogle få sekunder), da holdetiden på stationerne normalt er bestemmende for minimumstogfølgetiden. For danske IC3 og IR4 tog (litra MF og ER) vil togføreren oftest lukke dørene (på nær hans/hendes egen dør), kontrollere at alle døre er korrekt lukket før han/hun lukker sin egen dør og giver signal til lokoføreren om at toget er klar til afgang. Nyere danske tog (fx Øresundstog og IC4 – litra ET og MG) er udstyret med trin der kan skydes ud og lukke gabet mellem tog og perron.³ Disse trin skal skydes ud før dørene kan åbne og trækkes ind igen efter dørene er lukket før toget kan køre. Dette forlænger holdetiden for togene. Kan dørlukningen og afgangsproceduren gøres hurtigere ligesom trinnene

³ Ældre danske tog har trin der klapper ud og er væsentlig hurtigere end skydetrinnene der bruges på de nyere tog.

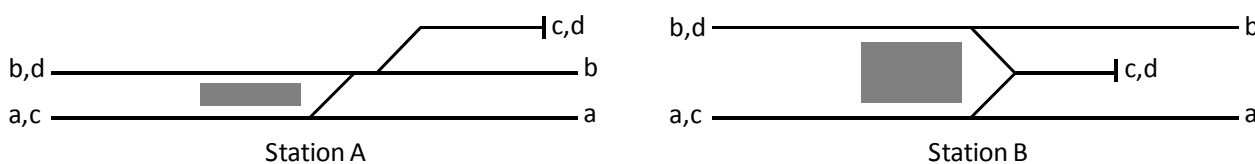
kan køre hurtigere og/eller køre ind/ud samtidig med at dørene åbnes/lukkes vil der kunne spares kapacitet på stationerne således at der vil kunne køre endnu flere tog.

For store stationer som fx Københavns Hovedbanegård og Københavns Lufthavn, Kastrup med en stor passagerudveksling kan betyde at togene ofte venter på passagerer der ankommer i sidste øjeblik (selv efter toget skulle have afgang). Dette kan betyde at togvejen ikke udnyttes optimalt – og evt. blokerer for at det efterfølgende tog kan komme til perron, hvilket resulterer i et højere kapacitetsforbrug.

Københavns Hovedbanegård (fjernbanedelen, dvs. spor 1-8 og 26) – som bliver anset for at være tæt på kapacitetsgrænsen – betjente i 2009 641 tog på hverdage, hvilket resulterede i at perronsporene blev benyttet 4.774 minutter (inkl. til- og frakørselstid) (Jensen 2010). Ved at benytte metoden med Poissonfordelingen kan det beregnes at hvis det er muligt at reducere holdetiden på stationen blot 15 sekunder pr. tog, vil tiden perronsporene være besat reduceres med 160 minutter.⁴ Med en gennemsnitlig holdetid på 7,4 minutter pr. tog vil stationen kunne håndtere 21 ekstra tog pr. dag med samme driftskvalitet.⁵ Dette viser at Poissonmetoden kan bruges til at kvantificere ændringen i kapaciteten ved selv små ændringer fx i holdetiden. Metoden kan derved benyttes til at evaluere større og mindre initiativer (fra udbygning af infrastrukturen til ændringer i holdetiden) til at skabe mere stationskapacitet.

4 Konfliktindeks

Stationskapacitet afhænger ikke kun af om der er nok perronspor, men også om togene kan komme til og fra perronsporene. Muligheden for at køre til/fra stationen afhænger af sporlayoutet og togvejenes kompleksitet (Malavasi 2000). Dette afsnit præsenterer 2 metoder til hvordan potentielle konflikter kan kvantificeres ved konfliktindeks. Den første, og simpleste metode beskriver kompleksiteten af sporlayoutet. Begge metoder tager udgangspunkt i de to stationslayout der ses på figur 7.



Figur 7 – Stationslayout og togveje (Landex 2008).

4.1 Konfliktindeks for sporlayout

Den simpleste måde at beregne konfliktindeks på er ved at undersøge de mulige konflikter mellem (hoved)togveje. Figur 7 viser forskellige togveje gennem station A og B. Hovedtogvejene kan resultere i konflikter med andre hovedtogveje, se tabel 2.

Tabel 2 – Konflikter mellem togveje ved station A og B.

1. togvej \ 2. togvej	Station A				1. togvej \ 2. togvej	Station B			
	a	b	c	d		a	b	c	d
a	O	–	D	–	a	O	–	D	–
b	–	O	X	C	b	–	O	–	C
c	D	X	O	X	c	D	–	O	X
d	–	C	X	O	d	–	C	X	O

- Ingen konflikter mellem togveje – de to togveje kan blive sat på same tid
- O Overlappende togveje

⁴ 15 sekunder svarer til den ekstra tid der planlægges for tog med togfører i stedet for at være enmandsbetjent (af lokoføreren).

⁵ Under forudsætning af at de tilstødende banestrækninger kan håndtere de ekstra tog.

- D Togvejene deles (normalt ikke et kapacitetsproblem)
- C Togvejene mødes
- X Togvejene krydser hinanden
- Togvejene kan ikke sættes umiddelbart efter hinanden

To togveje kan ikke blive sat på samme tid hvis de overlapper, deles, mødes eller krydser hinanden. Station A har 10 mulige togvejskombinationer hvor 2 togveje (der kan sættes efter hinanden) ikke kan sættes på samme tid ($n_k = 10$) mens Station B kun har 8 tilsvarende togvejskombinationer ($n_k = 8$). Forskellen på antallet af togveje der ikke kan sættes efter hinanden skyldes det forskellige sporlayout på de to endestationer, hvor der er færre mulige konflikter på station B.

Både Station A og B har 16 forskellige togvejskombinationer, hvoraf kun 14 togvejskombinationer er mulige at sættes umiddelbart efter hinanden (c-c og d-d kan ikke sættes umiddelbart efter hinanden) – $n_z = 14$. Komplexiteten for stationerne kan derfor ifølge (Kaas 1998; Pachl 2002; Landex 2006) beregnes som forholdet mellem kombinationsmulighederne hvor to togveje kan blive sat på samme tid og antallet af togveje der kan sættes umiddelbart efter hinanden:

$$\varphi_n = \frac{n_k}{n_\Sigma} \quad 5$$

Kompleksiteten for Station A kan nu beregnes til $\varphi_{n,A}$ er 0,71 mens kompleksiteten for Station B $\varphi_{n,B}$ (kun) er 0,57. Dette viser at Station A er mere kompleks en Station B. Hvis kun få tog benytter vendesporet ved stationerne vil kompleksiteten intuitivt være mindre end hvis der er mange tog der benytter vendesporet. Derfor er det relevant også at inkludere sandsynligheden for konflikt mellem togvejene.

4.2 Konfliktindeks med sandsynligheder

Sandsynligheden mellem togveje ($p_{k,ij}$) kan ifølge (Kaas 1998; Pachl 2002; Landex 2006) findes ved at multiplicere antallet af tog der benytter hhv. første togvej (n_i) og anden togvej (n_j) og dividere med kvadratet det totale antal tog (N^2),

$$p_{k,ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{N^2} \quad 6$$

For både Station A og Station B er der 6 tog i timen der benytter hhv. togvej a og b, mens der er yderligere 3 tog i timen der benytter hhv. togvej c og d. Dette driftsoplæg medfører de sandsynligheder som angivet i tabel 3.

Tabel 3 – Konflikter mellem togveje og deres sandsynligheder ved station A og B.

1. togvej \ 2. togvej	Station A				1. togvej \ 2. togvej	Station B			
	a	b	c	D		a	B	c	d
a	O 1/9	– 1/9	D 1/18	– 1/18	a	O 1/9	– 1/9	D 1/18	– 1/18
b	– 1/9	O 1/9	X 1/18	C 1/18	b	– 1/9	O 1/9	– 1/18	C 1/18
c	D 1/18	X 1/18	O 1/36	X 1/36	c	D 1/18	– 1/18	O 1/36	X 1/36
d	– 1/18	C 1/18	X 1/36	O 1/36	d	– 1/18	C 1/18	X 1/36	O 1/36

Kompleksiteten af stationen kan blive beregnet på samme måde som tidligere, den eneste forskel er at det er sandsynlighederne der bliver summeret i stedet for at tælle kombinationsmulighederne. Station A har derved en sandsynlighed på $p_{k,A} = 11/18$ for at to togveje (der er mulige at sætte efter hinanden) ikke kan

blive sat på samme tid. Som følge af layoutet er den tilsvarende sandsynlighed for Station B $p_{k,B} = \frac{1}{2}$ for at to togveje (der er mulige at sætte efter hinanden) ikke kan blive sat på samme tid.

For ingen af de analyserede er det muligt at stille togvejene c og d umiddelbart efter hinanden pga. blindsporet (en togvej c er nødt til at blive fulgt af en togvej d før en ny togvej c kan blive sat og vice versa). Den totale sandsynlighed for togveje der kan sættes lige efter hinanden (p_{Σ}) er derfor 17/18. Ifølge (Kaas 1998; Landex 2006) kan kompleksiteten derved beregnes som,

$$\varphi_p = \frac{p_k}{p_{\Sigma}}$$

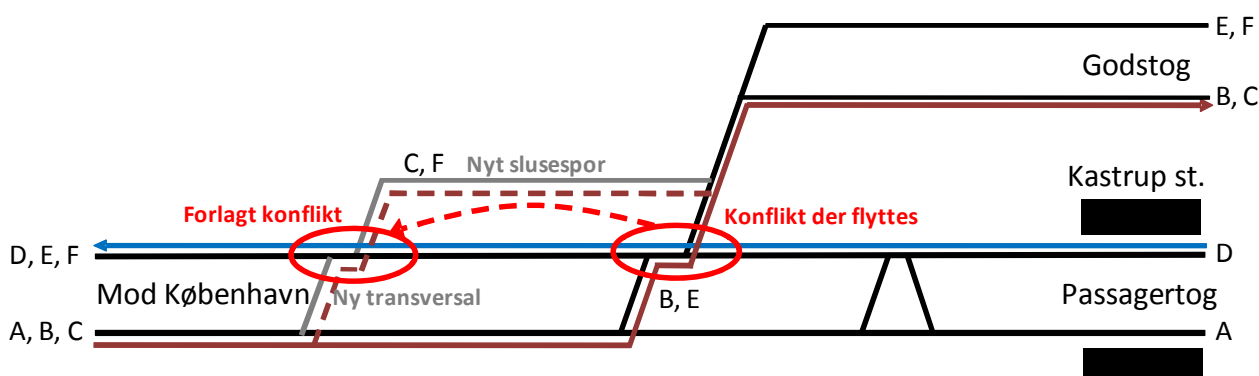
7

Kompleksiteten for Station A kan derved beregnes til $\varphi_{p,A}$ er 0,65 mens kompleksiteten for Station B $\varphi_{n,B}$ (kun) er 0,53.

I dette tilfælde er kompleksiteten for stationerne A og B lavere ved at benytte sandsynligheden for konflikt i stedet for kun at benytte togvejene. Forskellen skyldes at kun en tredjedel af togene benytter vendesporene. Hvis to tredjedele af togene havde benyttet vendesporene ville kompleksiteten have været højere end ved at beregne kompleksitetsindekset baseret på sporlayoutet.

4.3 Sporsluse ved Københavns Lufthavn, Kastrup station

På Københavns Lufthavn, Kastrup station er der kapacitetsproblemer. I den forbindelse har der været udarbejdet forskellige løsningsforslag til forbedring af sporlayoutet – fx ved en sporsluse som skitseret på figur 8. Ideen bag sporslusen er at den konflikt der opstår når godstogene mod Sverige krydser hovedsporet mod København i niveau kan forlægges nogle hundrede meter så konflikten kan forlægges således at krydsningen kan foretages der hvor den ikke skaber konflikt med modkørende tog.



Figur 8 – Tidlig ide om sporsluse i Københavns Lufthavn, Kastrup med angivelse af togveje (A-F).

I tabel 4 er de konfliktende togveje for infrastrukturen opstillet (som beskrevet i afsnit 4.1). De konflikter der kan forlægges er markeret med (X). Disse konflikter kan enten være til stede, hvis ikke konflikten er forlagt eller være "forsvundet" ved at konflikten er forlagt.

Tabel 4 – Konfliktende togveje ved Københavns Lufthavn, Kastrup station i tilfælde af en sporsluse.

	A	B	C	D	E	F
A	O	D	D	–	–	–
B	D	O	C/D	(X)	X	X
C	D	C/D	O	(X)	X	X
D	–	(X)	(X)	O	C	C
E	–	X	X	C	O	C/D
F	–	X	X	C	C/D	O

Beregnes konfliktindekset for sporlayoutet som beskrevet i afsnit 4.1 fås der to forskellige værdier alt afhængig af om det forudsættes at der er konflikter eller ikke, der hvor konflikten kan flyttes,

$$\varphi_{n,med\ konflikter} = \frac{n_k}{n_\Sigma} = \frac{30}{36} = 0,83 \quad 8$$

$$\varphi_{n,uden\ konflikter} = \frac{n_k}{n_\Sigma} = \frac{26}{36} = 0,72 \quad 9$$

I dagens situation, uden en sporsluse, er konfliktindekset 0,75. Det mest korrekte resultat ved beregning af konfliktindeks ved etablering af den i figur 8 skitserede sporsluse er derfor at forudsætte at konflikterne "forsvinder". Det skyldes at de flere køremuligheder vil resultere i et bedre sporlayout end basis – og at en del af de mulige konflikter vil kunne undgås.

Antages det at der hver time kører 8 passagertog i hver retning og 2 godstog i hver retning kan konfliktindekset for sandsynligheder også beregnes, se tabel 5. Tabel 5 viser at konfliktindekset for sandsynligheder er væsentlig lavere end for sporlayoutet, hvilket skyldes at kun 2 tog pr. time skal krydse det hovedsporet i modsat retning. Tabel 5 viser endvidere at risikoen for konflikter kan nedbringes yderligere ved at etablere en niveaufri krydsning i stedet for en sporsluse.⁶

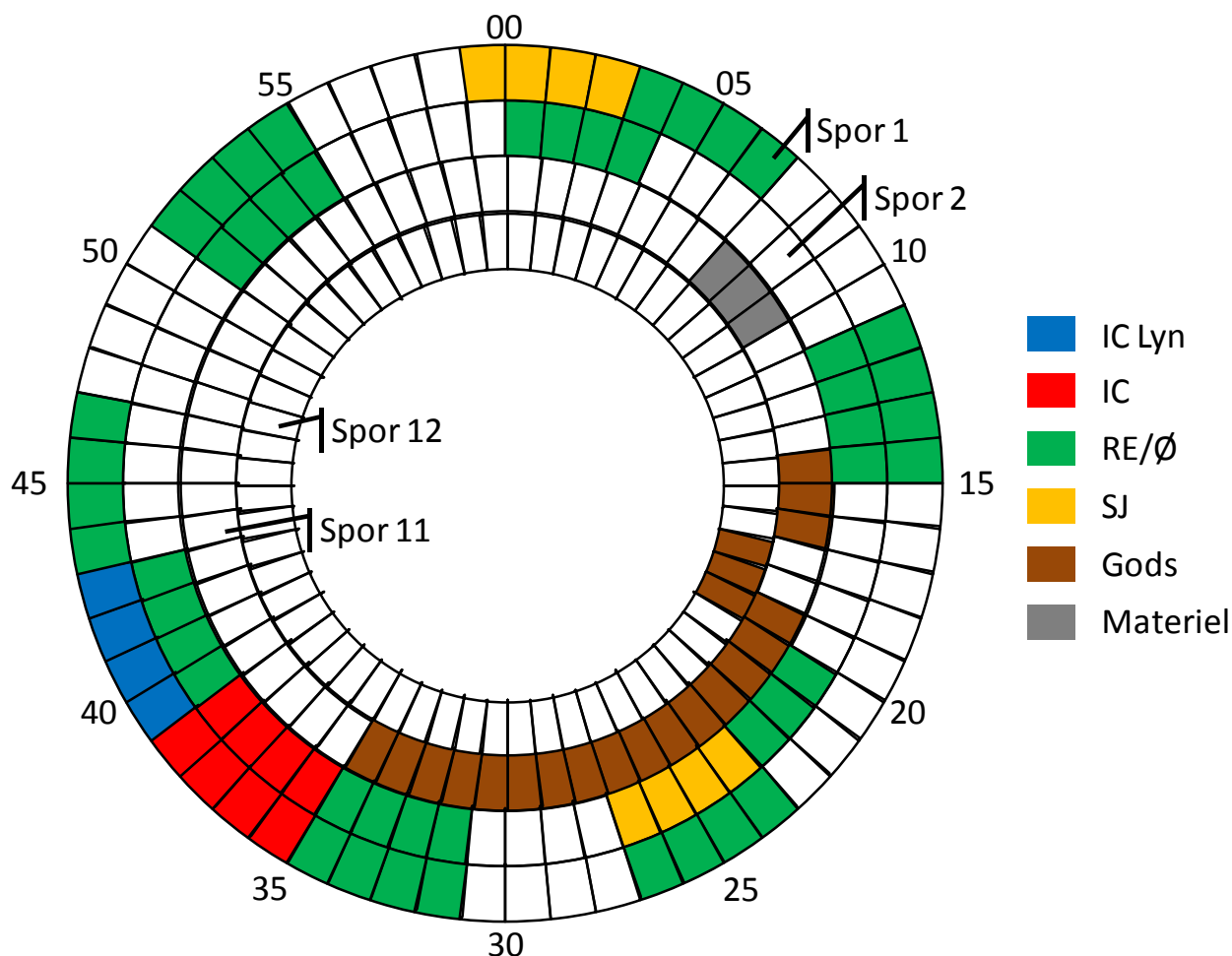
Tabel 5 – Konfliktindekser for sporlayout og med sandsynligheder i forskellige situationer.

Scenarie	Sporlayout		Sandsynlighed	
	Uden konflikt	Med konflikt	Uden konflikt	Med konflikt
Dagens situation – uden sporsluse	0,75		0,84	
Fremtidig situation – med sporsluse	0,72	0,83	0,52	0,60
Fremtidig situation – niveaufri	0,50		0,50	

5 Fordelingen af tog ved stationer

De tidligere beskrevne metoder tager kun hensyn til kapaciteten på stationen. Det kan have været nødvendigt at bundte togene på de tilstødende banestrækninger, hvilket resulterer i at togene ankommer i grupper. Det betyder at stationen skal håndtere mange tog i nogle tidsperioder mens der i andre tidsperioder kun er få eller ingen tog på stationen, hvilket resulterer i en ineffektiv udnyttelse af stationens kapacitet. Figur 9 viser (på en urskive) ankomsterne og afgangene på Københavns Lufthavn, Kastrup station.

⁶ Løsningen med niveaufri krydsning har i dette tilfælde fortsat en konflikt mellem godstog der er på vej hhv. ind og ud af godstogssporene. Etableres en niveaufri krydsning uden konflikt mellem godstogene vil konfliktindekset kunne nedbringes yderligere.



Figur 9 – Ankomster og afgang på Københavns Lufthavn, Kastrup markeret på en urskive for en hverdag kl. 10-11 i 2010.

Figur 9 viser at trafikken på Kastrup station i perioder er fuldt udnyttet (fx spor 1 der er besat af 4 forskellige tog fra kl. 10:31 til 10:47) mens der på andre tidspunkter er ledig sporkapacitet. Dette skyldes at det er valgt at have en stiv køreplan (se (Liebchen 2006; Schittenhelm 2008) for beskrivelse af køreplanstyper) på Øresundsbanen, og at ikke alle tog (fx IC Bornholm) kører alle timer. Ved at lade timeslots på 4 minutter være frie i køreplanen vil det være muligt at køre et ekstra (person)tog i nogle timer eller udnytte disse intervaller som buffertid så en forsinkelse ikke spreder sig til for mange efterfølgende tog.

Godstoget der besætter spor 11 fra kl. 10:19 til 10:35⁷ udnytter dels et timeslot, der ellers ville have kunne udnyttes til at køre et ekstra passagertog i spor 1⁸, men pga. krydsningen af hovedsporet mod København er det heller ikke muligt at køre et passagertog i fra spor 2 i tidsrummet 10:15 til 10:19 – det samme gør sig gældende for materieltoget (mod klargøringscenteret i Kastrup) i spor 11 kl. 10:07. IC-toget i spor 1 kl. 10:35-10:39 ender i Københavns Lufthavn, Kastrup, hvorfor godstoget fra spor 11 kl. 10:39 kan køre videre fra Sverige uden at komme i konflikt med passagertogene.

Urskiven i figur 9 giver et godt og detaljeret overblik over hvornår sporene på stationen er udnyttet, og hvor det er muligt at køre flere tog, men for at det er muligt at analysere og sammenligne flowet af tog til/fra stationen ved forskellige køreplaner er det nødvendigt at kunne beskrive homogeniteten af driften på stationen analytisk.

⁷ Den lange sporbesættelsestid skyldes at toget overhales.

⁸ Eftersom togene deler spor fra Kalvebod til Københavns Lufthavn, Kastrup er det ikke muligt at køre et andet passagertog i stedet.

Homogeniteten af ankomster til en station kan beskrives analytisk ved hjælp af et homogenitets- (eller heterogenitets)indeks. (Vromans 2005) præsenterede heterogenitetsmål der giver forskellige resultater alt afhængig af antallet af tog der analyseres. (Landex 2008) udviklede et homogenitetsindeks for fri bane, der var uafhængigt af antallet af tog. Med udgangspunkt i homogenitetsindekset fra (Landex 2008) kan homogeniteten for stationsankomster beregnes ved at summen af forholdet mellem togfølgetiden ($h_{t,i}^A$) og den efterfølgende togfølgetid ($h_{t,i+1}^A$) og dividere denne sum med antallet af togfølger minus 1 (h_{N-1}),

$$Hom_A = \frac{\sum \min\left(\frac{h_{t,i}^A}{h_{t,i+1}^A}, \frac{h_{t,i+1}^A}{h_{t,i}^A}\right)}{h_{N-1}} \quad 10$$

Tilsvarende kan homogeniteten for afgange (Hom_D) beregnes ud fra forholdet mellem togfølgetiderne ($h_{t,i}^D$) og togfølgetiden for den efterfølgende togfølge ($h_{t,i+1}^D$) for afgangene i stedet,

$$Hom_D = \frac{\sum \min\left(\frac{h_{t,i}^D}{h_{t,i+1}^D}, \frac{h_{t,i+1}^D}{h_{t,i}^D}\right)}{h_{N-1}} \quad 11$$

I tilfælde af mere end én ankomst/afgang på samme tid vil togfølgetiden mellem togene være lig 0, hvilket resulterer i at der skal divideres med 0. I sådanne tilfælde antages minimumsværdien at være 0.

Homogenitetsindekset vil altid være mellem 0 og 1, hvor 0 er helt inhomogen (eller heterogen) og 1 er et helt homogent ankomst-/afgangsmønster. For at evaluere heterogeniteten (i stedet for homogeniteten) er det derfor muligt at beregne heterogeniteten (Het) som,

$$Het_A = 1 - Hom_A \quad \text{og} \quad Het_D = 1 - Hom_D \quad 12$$

Homogeniteterne og heterogeniteterne kan beregnes for hele stationen for at give et overblik over hvordan togene ankommer og afgår, men for at undgå konflikter i sporskiftezonerne kan det være en fordel at dedikere nogle perronspor til at betjene tog til/fra en bestemt retning – ligesom ikke alle spor nødvendigvis ville kunne nås fra alle retninger. Derfor kan det være interessant at analysere togene retningsvis eller efter togtype. Tabel 6 viser homogeniteten og heterogeniteten for Københavns Lufthavn, Kastrup station

Tabel 6 – Homogenitet og heterogenitet af driften på Københavns Lufthavn, Kastrup station en tidlig morgentime.

	Homogenitet	Heterogenitet
Ankomst – alle tog fra Kalvebod	0,71	0,29
Afgang – alle tog mod Kalvebod	0,60	0,40
Ankomst – alle passagertog fra Kalvebod	0,63	0,37
Afgang – alle passagertog mod Kalvebod	0,61	0,39

På trods af at der er indlagt 4-minutters intervaller i køreplanen, hvor der ikke kører tog på Københavns Lufthavn, Kastrup station viser tabel 6 at der alligevel er en høj grad af homogen drift på stationen. Havde der også kørt tog i de sidste "huller" ville homogeniteten have været endnu højere. Den høje homogenitet (eller lave heterogenitet) viser at der kun er et begrænset optimeringspotentiale for driftsafviklingen på stationen.

6 Konklusion

Jernbanekapacitet vurderes normalt kun på den fri bane mellem stationerne, og der findes kun få metoder til at vurdere kapaciteten på stationer. Denne artikel har præsenteret 3 nye metoder til vurdering af stationskapacitet:

- En statistisk metode til vurdering af behovet for perronspor

- En kvantitativ metode til vurdering af de potentielle konflikter i sporskiftezoner
- En kvantitativ metode til vurdering af hvor godt kapaciteten på en station udnyttes

De i denne artikel præsenterede metoder kan bruges enten separat til vurdering af de enkelte delelementer af stationskapaciteten eller metoderne kan bruges i kombination til at give et detaljeret billede af kapaciteten på en station. For hver af de præsenterede metoder er det demonstreret hvordan metoden kan benyttes på et eksempel fra den virkelige verden.

7 Referencer

S. Buchmüller, U. Weidmann & A. Nash. Development of a dwell time calculation model for timetable planning. *Computers in Railways XI*, pp 525–534, 2008.

R. Fernández. Modelling public transport stops by microscopic simulation. *Transportation Research Part C*, 18:856–868, 2010.

I.A. Hansen. Station capacity and stability of train operations. *Computers in Railways VII*, pp 809–816, 2000.

N.G. Harris. Train boarding and alighting rates at high passenger loads. *Journal of Advanced Transportation*, 40(3):249–263, 2006.

J. Höllmüller & V. Klahn. Implementation of the UIC 406 capacity calculation at Austrian railways (ÖBB). *1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, 2005.

L.W. Jensen. Fjern- og regionaltogskapacitet på Københavns Hovedbanegård, 2009.

A.H. Kaas. *Metoder til beregning af jernbanekapacitet*. PhD-afhandling, Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Planlægning, 1998.

C.K. Pedersen. Holdetid på togstationer. Trafikdage på Aalborg Universitet, 2003.

C.K. Pedersen. Holdetid på danske togstationer. Kandidatafhandling, Center for Trafik og Transport, Danmarks Tekniske Universitet, 2003.

A. Landex. Station Capacity. *4th International Seminar on Railway Operations Research*, 2011.

A. Landex. Evaluation of railway networks with single track operation. *Networks and Spatial Economics*, 9:7–23, 2009.

A. Landex. *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*. Ph.D.-afhandling, Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Transport, 2008.

A. Landex, A.H. Kaas & S. Hansen. Railway operation. Teknisk rapport, Center for Trafik og Transport, Danmarks Tekniske Universitet, 2006

C. Liebchen. Periodic Timetable Optimization in Public Transport. Ph.D.-afhandling, Technical University of Berlin, 2006.

T. Lindner & J. Pacht. Recommendations for enhancing UIC Code 406 method to evaluate railroad infrastructure capacity. *The 89th Transport Research Board Annual Meeting*, 2009.

G. Malavasi and S. Ricci. Carrying capacity of railway networks: interaction of line and node models. *Computers in Railways VII*, pp 977–986, 2000.

Joern Pacht. *Railway Operation and Control*. VTD Rail Publishing, USA, 2002.

G. Potthoff. *Verkehrsströmungslehre I - Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen*. Transpress, Berlin, Tyskland, 1962.

Schittenhelm, B., Identification of timetable attractiveness parameters by an international literature review. Trafikdage på Aalborg Universitet, 2008

UIC. Capacity (UIC Code 406). Teknisk rapport, International Union of Railways (UIC), 2004.

- M. J. C. M. Vromans. *Reliability of Railway Systems*. Ph.D.-afhandling, Erasmus University Rotterdam, 2005.
- M. Wahlborg. Banverket experience of capacity calculations according to the UIC capacity leaflet. *The 9th International Conference on Computers in Railways*, pp 665–673, 2004.
- E. Wendler. *Railway Timetable & Traffic*, Kapitel Queueing, pp 106–117. *Railway Timetable & Traffic*. EuRail Press, Hamburg, Tyskland, 1. udgave, 2008.
- J. Yuan and I.A. Hansen. Analysis of scheduled and real capacity utilisation at a major Dutch railway station. *Computers in Railways IX*, pp 593–602, 2004.