

Kapacitetsfremmende tiltag for jernbanesystemer

Af:

Anders Hunæus Kaas, Banestyrelsen rådgivning¹ / DTU-IFP

1. Baggrund

I den nærmeste fremtid stilles der stærkt stigende krav til de danske jernbaner. Eftersom langt hovedparten af det danske jernbanenet er anlagt i sidste halvdel af 1800-tallet, er det således påkrævet, at der i de kommende år afsættes betydelige økonomiske midler til udbygning/nybygning af den danske jernbaneinfrastruktur, hvis de krav man normalt vil stille til "fremtidens jernbane", skal kunne efterleves.

Åbningen af de faste forbindelser over/under Storebælt og Øresund samt banen til Københavns Lufthavn vil i de kommende år således give mulighed for øget efterspørgsel af togtrafikken. En efterspørgsel som dog kun kan imødekommes med et tilsvarende togudbud, så fremt dele af den eksisterende infrastruktur forbedres.

En øget trafik samt en eventuel indførsel af højhastighedstog vil nemlig betyde, at højhastighedstog, regionaltog og godstog skal "konkurrere" om kapaciteten på banenettet i tilfælde af, at infrastrukturforholdene ikke forbedres.

På en stor del af det danske banenet er der en betydelig kapacitetsreserve, men da togene som regel ikke kan undgå de hårdt belastede strækninger/stationer, udgør disse en begrænsning for det samlede jernbanenet.

Allerede i dag er strækningen mellem København og Høje Taastrup således hårdt belastet, og udgør dermed en flaskehals. En øget trafik vil endvidere kunne give flaskehalsproblemer især på strækningen mellem Roskilde og Ringsted, men også på strækningen over Vestfyn. Endvidere vil den enkeltsporede strækning mellem Vordingborg og Rødby Færge i tilfælde af en fast forbindelse over Femerbælt udgøre en flaskehals.

I 1995 besluttede Transportrådet således økonomisk at støtte et forskningsprojekt, der havde til formål at fastlægge metoder til beregning af jernbanekapacitet. Dette arbejde har i samarbejde med Banestyrelsen rådgivning og DTU-IFP således resulteret i en Ph.D.-afhandling om dette emne [5].

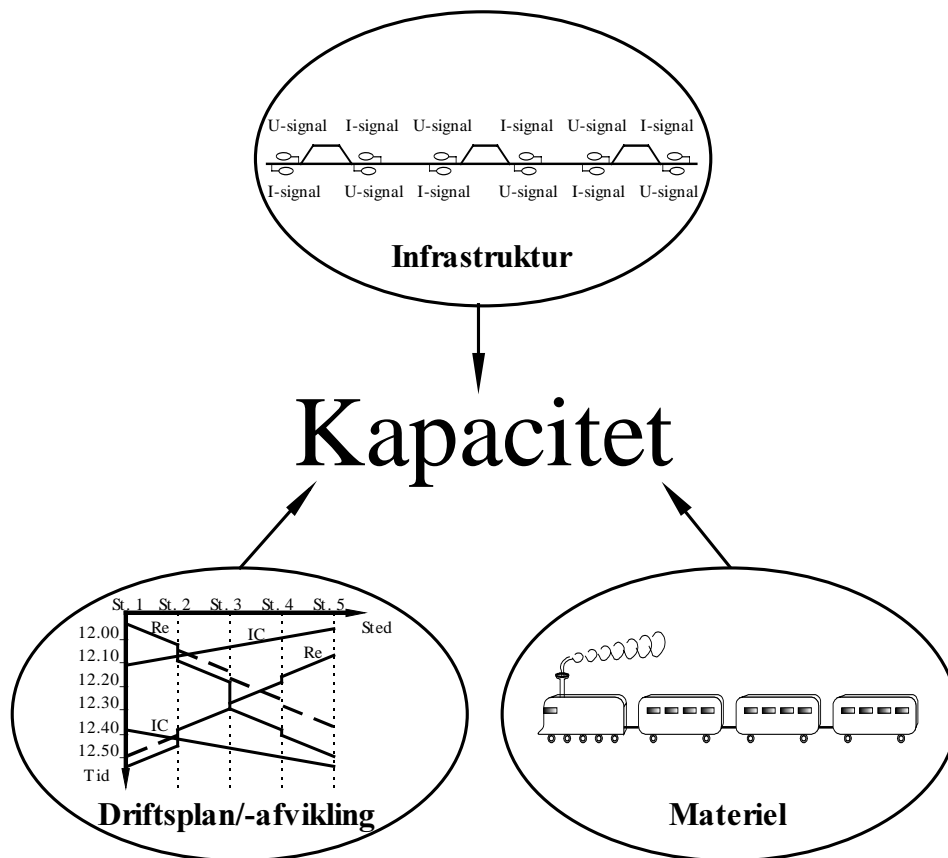
Undervejs i studieforløbet er der blev udviklet en EDB-model, som kan benyttes i den strategiske planlægningsproces i forbindelse med kapacitetsvurderinger. Kapacitetsmodellen SCAN²

har tidligere været præsenteret ved trafikdage på AUC '96 [3], og har nu efterfølgende været benyttet til en række kapacitetsundersøgelser bl.a af det danske hovedbanenet [6], Femer Bælt [7] og Oslo området [8].

¹ Pilestræde 58, DK-1112 København K, E-mail: AHK@rdg.bane.dk

² Strategic Capacity Analysis of Network

Dette paper giver primært en kort opsummering af nogle af de tiltag, der er belyst i forskningsarbejdet [5], som vil virke kapacitetsfremmende for et jernbanesystem. Som det fremgår af nedenstående figur må jernbanekapaciteten sammenstykkedes af flere elementer, som på et overordnet niveau kan beskrives på følgende vis:



Figur 1 Indgående elementer i bestemmelsen af jernbanekapacitet [5]

Hver af de 3 elementer infrastruktur, Materiel og driftsplan (= køreplan) behandles i det følgende. Desuden beskrives tiltag, som vil virke kapacitetsfremmende, såfremt at driftsafviklingen (= køreplansafviklingen) ikke helt er i overensstemmelse med den fastlagte driftsplan.

2. Infrastruktur

Opbygningen af infrastrukturen er den primære vurderingsfaktor, når kapaciteten af et jernbanesystem skal vurderes. Infrastrukturen kan underopdeles i 2 forskellige grupper, som hver især har betydning for kapaciteten, nemlig:

- Sporanlæg
- Tekniske anlæg (signaler, sikringsanlæg o.lign.)

Ikke overraskende vil flere spor, nye strækninger og nye overhalings-/krydsningsmuligheder give anledning til en bedre kapacitet, naturligvis forudsat at udbedringen af flaskehalsen i det oprindelige system er blandt de tiltag, som er blevet gennemført.

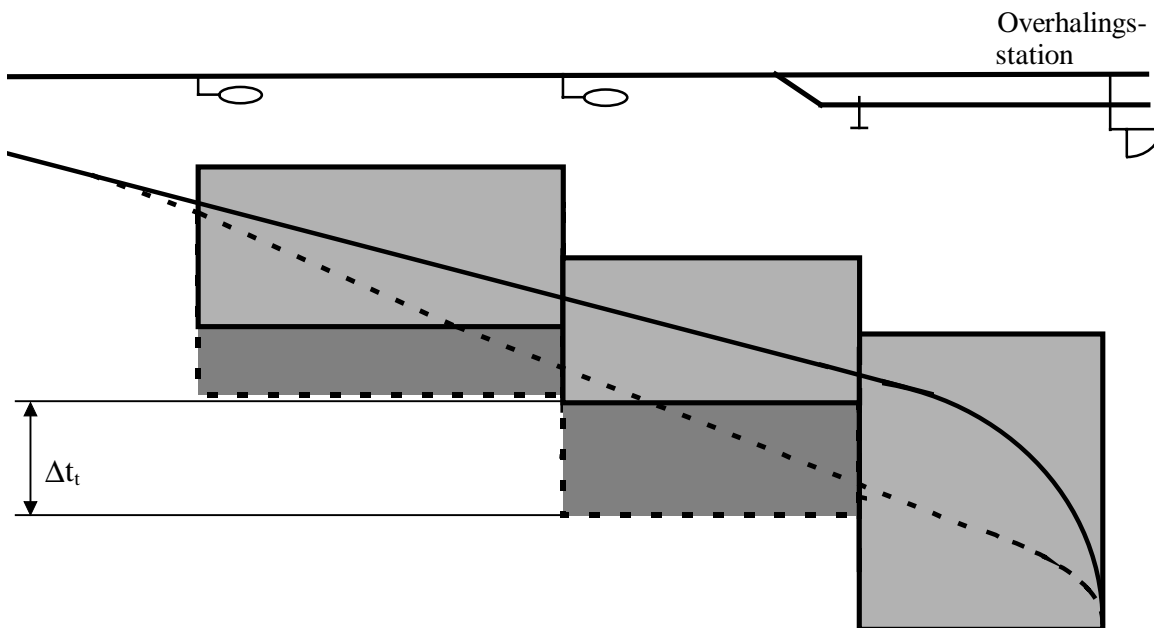
Men som det fremgår af det følgende afsnit, så vil også andre tiltag mht. sporanlægget kunne forbedre kapaciteten.

2.1 Sporanlæg

Hastigheden ved ind- og udkørsel til/fra stationer vil oftest have afgørende betydning for den samlede kapacitet i et jernbanesystem, da køretiden for et standsende tog i blokken umiddelbart før/efter stationen ofte er større, end det er tilfældet midt mellem 2 stationer, hvor togene kører stærkt.

Det er derfor ønskeligt med en høj hastighed både umiddelbart før og efter en standsning. Infrastrukturen giver dog anledning til nogle hastighedsbegrænsninger, og kan i forbindelse med kørsel gennem den afvigende gren i et sporskifte være meget restriktive.

Figuren nedenfor viser således, at togfølgetiden kan reduceres Δt_t ved at skabe gode indkørselsforhold på en overhalingsstation.



Figur 2 Høj kontra lav hastighed ved indkørsel [5].

Den fuldtotrukne linie viser, hvordan toget som skal overhales kan fortsætte med uændret hastighed gennem sporskiftet ad den afvigende gren.

Bremsningen indledes således først, når det er nødvendigt af hensyn til standsningen. Den stiplede linie viser derimod, at hastigheden oftest må nedsættes forud for et sporskifte, som gennemkøres ad den afvigende gren. Ved at benytte sporskifter, som er meget slanke, kan der opnås store hastigheder i den afvigende gren af sporskiftet. Eksempelvis vil et sporskifte med

krydsningsforholdet 1:26,5 kunne tillade en hastighed på 130 km/h igennem den afvigende gren i sporskiftet.

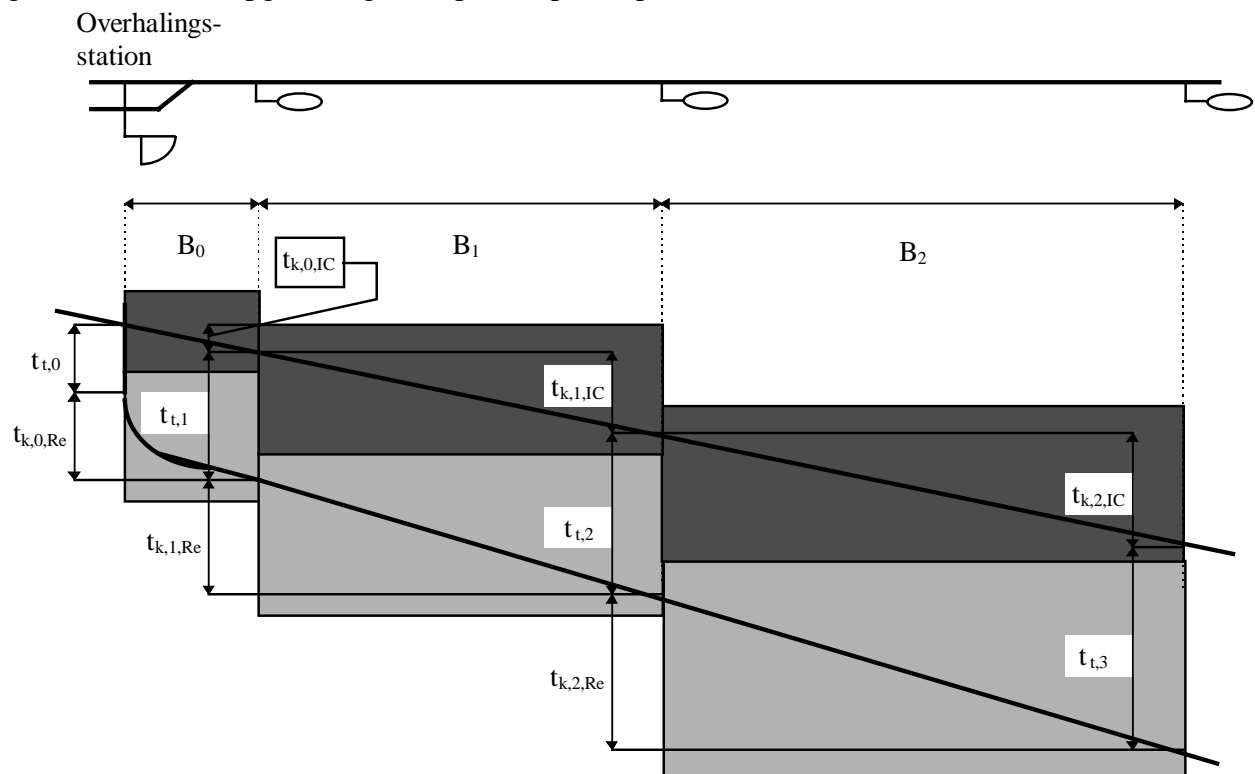
Af andre forbedringer af sporanlægget, som vil kunne øge kapaciteten kan bl.a. nævnes:

- Forlængelse af overhalings-/krydsningsspor
- Kurveudretninger
- Konstruktion af niveaufrie skæringer, hvor 2 hovetrafikstrømme krydser hinanden

2.2 Teknisk anlæg

Udformningen af de tekniske anlæg har også stor betydning for systemet kapacitet. Således vil eksempelvis etablering af linieledere og flydende blok kunne øge kapaciteten væsentligt, såfremt der ikke hurtigt opstår nye flaskehalse (såsom f.eks. manglende perronsporskapalet) andre steder i systemet. Undersøgelser viser således, at strækningskapaciteten under optimale forhold kan øges med ca. 35% ved at etablere linieledere på hele strækningen, mens indføring af flydende blok vil kunne mere end fordoble strækningskapaciteten [5].

På grund af at nye flaskehalse vil opstå, når de oprindelige elimineres, vil forbedringerne dog sjældent være så markante. Undersøgelser [9] viser således, at på fjernbanen mellem København H og Østerport vil kapaciteten kunne forbedres med ca. 4 tog/h i hver retning (svarende til en forbedring på ca. 30%), såfremt der etableres flydende blok i stedet for dagens situation med diskret blokinddeling suppleret med linieledere. Nørreport station vil nemlig hurtigt udgøre en flaskehals pga. manglende perronsporskapalet.



Figur 3 Optimal blokinddeling ved togfølgen hurtigt IC-tog efterfulgt af langsomt Re-tog.

Figuren øverst på forrige side viser, hvorledes det med en diskret blokinddeling er muligt at optimere placeringen af signalerne (og dermed bloklængden) udfra kendskabet til togenes køreegenskaber.

På figuren er vist en situation, hvor et langsomt Re-tog skal afgang fra en station efter netop at være blevet overhalet af et hurtigt IC-tog. Forholdene er optimeret, da der ikke er "luft" mellem spærrekasserne³ for de 2 tog. Gøres blok B_1 længere vil dette blokafsnit alene blive dimensionerende for togfølgen, mens stationsudkørselsblokken B_0 og blok B_2 vil være de dimensionerende såfremt blok B_1 gøres mindre.

Hastigheden v_{IC} for det hurtige IC-tog kan udtrykkes på følgende vis:

$$(1) \quad v_{IC} = \frac{B_i}{t_{k,i,IC}}$$

Hvor: B_i er længden af det i 'te blokafsnit
 $t_{k,i,IC}$ er IC-togets køretid gennem det i 'te blokafsnit

På tilsvarende vis kan det langsomme Re-togs hastighed $v_{Re,k}$ bestemmes, når dette kører med konstant hastighed.

$$(2) \quad v_{Re,k} = \frac{B_i}{t_{k,i,Re}} \quad \text{for } 1 < i \leq n$$

(her forudsættes at Re-toget har opnået $v_{Re,k}$ efter at have gennemkørt det første blokafsnit og holder denne gennem alle n blokafsnit)

Hvor: $t_{k,i,Re}$ er Re-togets køretid gennem det i 'te blokafsnit

Emnet "optimal blokinddeling" er grundigere behandlet i et tidligere paper til trafikdage på AUC '95 [2].

3. Materiel

Køreegenskaberne for det anvendte materiel har ligeledes nogen betydning for, hvilken kapacitet der kan opnås. Således vil følgende forhold kunne påvirke kapaciteten:

- Max. hastighed
- Accelerationsegenskaber
- Bremseegenskaber
- Toglængde

Max. hastigheden har både indvirkning på togets dimensionerende bremselængde (og dermed den dimensionerende togfølgeafstand), men såfremt togene på en strækning har meget varie-

³ "Spærrekasserne" (Den tyske betegnelse er "Sperrtreppen", der benyttes som officiel betegnelse på flere forskellige sprog - bl.a dansk) symboliserer den fysiske belægning af blokken.

rende hastigheder, vil max. hastigheden for de “afvigende” tog ligeledes være til ugunst for kapaciteten, som det fremgår af figur 4.

Bremse- og accelerationsegenskaber ønskes naturligvis optimeret, således at togene hurtigt forlader de besatte blokke.

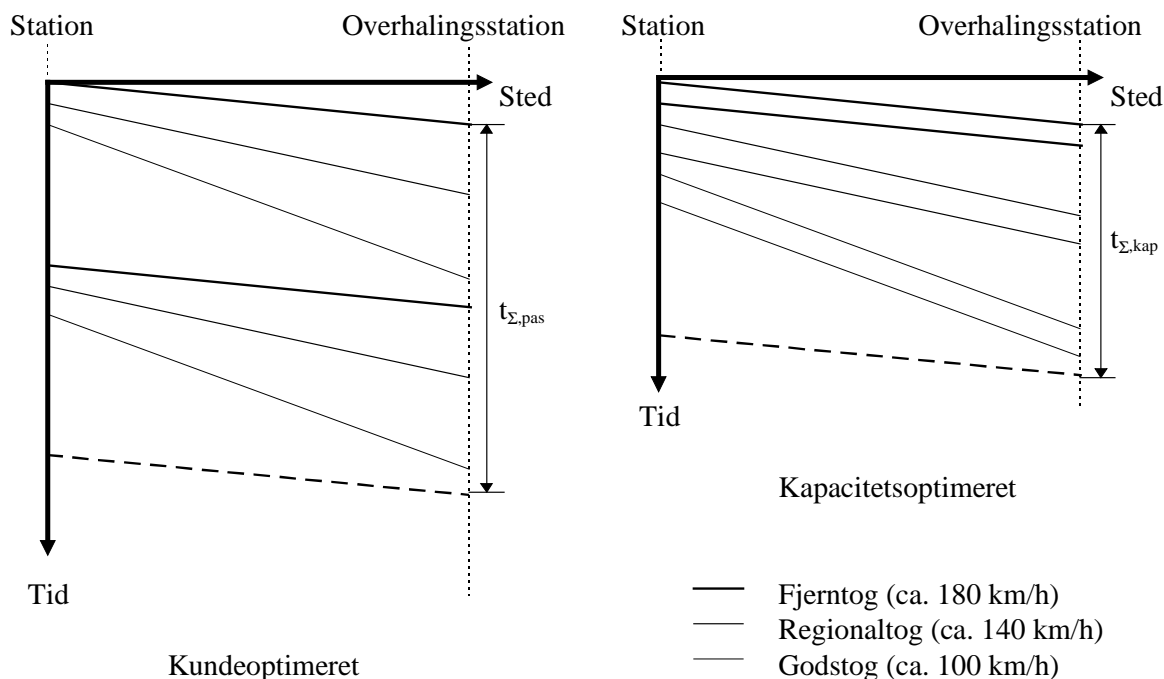
En lille toglængde bevirker, at toget forholdsvis hurtigt kan opløse den besatte togvej, hvilket umiddelbart bør tale for korte tog af hensyn til kapaciteten. Men ses problematikken i en større sammenhæng, bør togene på hårdt kapacitetsbelastede strækninger (f.eks. København - Ringsted) gøres længst mulige, da passagerkapaciteten herved optimeres fremfor togkapaciteten.

Holdetiden i stationsblokken kan ligeledes være en kapacitetsbegrænsende faktor, hvorfor korte holdetider vil være ønskeligt. Dette kræver dog, at bl.a afgangsp proceduren (f.eks. dør-lukning) og ind-/udstigningsforhold optimeres. Set i dette lys er placeringen af dørene i ER4-togsæt meget uheldig [1].

I togene er det ønskeligt, at sædekapaaciteten pr. togmeter gøres størst muligt, som det f.eks. er sket i de nye S-tog.

4. Køreplan

En stiv køreplan, hvor alle tog tildeles en fast afgangsfrekvens, vil ofte give anledning til en dårlig kapacitetsudnyttelse, da det ikke er muligt at bundte tog med samme køreegenskaber. Denne situation er gengivet til venstre i figuren nedenfor.



Figur 4 Forskellige køreplansoptimeringer [4].

Situationen til højre i figuren på forrige side viser derimod, at ved at lade tog med omtrent samme hastighed køre umiddelbart efter hinanden opnås en hurtigere trafikafvikling (da $t_{\Sigma, pas} > t_{\Sigma, kap}$).

Denne type køreplan giver imidlertid ikke optimale forhold for kunderne, da ønsket om fast afgangsrhythme ikke kan imødekommes fuldt ud. Der vil nemlig oftest være en sammenhæng mellem togkategorien og den gennemsnitlige fremføringshastighed, således at tog, der efterspørges af den samme kunde-gruppe, vil afgå umiddelbart efter hinanden.

I en konkret køreplan bør man derfor på en hårdt kapacitetsbelastet strækning også skelne til kundebehov, hvorfor den kapacitetsoptimerede køreplan i praksis sjældent ville kunne gennemføres, såfremt trafik på strækningen ikke er homogen. Løsningen vil derfor ofte være et kompromis mellem de 2 viste løsninger i figur 4, hvilket f.eks. opnås ved at lade 2 regionaltog med forskellige destinationer køre umiddelbart efter hinanden, mens tidsintervallet mellem fjerntogene holdes konstant.

På enkelsporede strækninger kan der opnås en stor kapacitetsgevinst, hvis tog med samme kørselsretning køres i konvoy. Dette er dog ikke særligt passagervenligt, og benyttes derfor oftest kun i forbindelse med drift på dobbeltsporede strækninger, hvor det ene spor er midlertidigt spærret for drift.

5. Køreplansafvigelser

I erkendelse af, at det ofte vil være umuligt at fremføre togene efter de fysisk minimale køretider t_{min} (incl. de nødvendige passagermæssige standsninger) må man i køreplanen tage højde for en række forudsete og uforudsete hændelser, som vil umuliggøre at gennemkøre ruten på den minimale køretid t_{min} .

I køreplanen tages der derfor højde for disse fænomener i form af køreplanstillæg t_{kt} , da det kapacitetsmæssigt (men primært set ud fra et kundesynspunkt) er at foretrække, at der på forhånd "planlægges" småforstyrrelser, så ikke forsinkelsen af et tog straks vil forplante sig til flere tog.

Da personførende tog ikke må afgå tidligere end det anførte tidspunkt i køreplanen, vil den optimale køretid t_{opt} for et tog på en given rute være:

$$(3) \quad t_{opt} = t_{min} + t_{kt}$$

Køreplanstillægget kan f.eks. bestemmes som et driftstillæg, der er afhængig af rutens længde, samt beskaffenheden af infrastruktur (enkelt- eller dobbeltspor) og materiel (Intercity- eller regionaltog). Størrelsen af driftstillægget er i Danmark iflg. gældende regler som følger:

| Togtype | Dobbeltspor | Enkeltspor |
|---------|-------------|-------------|
| IC-tog | 0,03 min/km | 0,05 min/km |
| Re-tog | 0,05 min/km | 0,08 min/km |

Tabel 5 Køreplanstillæg (driftstillæg) [5].

På en rute kan der defineres flere regularitetspunkter, som normalt vil være de større stationer (f.eks. standsningssteder for IC- og EC-tog eller forgreningsstationer). Det er netop mellem disse regularitetspunkter, at der fastlægges en passende strategi for hvert togs fremføringshastighed i driftsoplægget, som kan korrigere for det nødvendige driftstillæg.

Fremføres f.eks. et regionaltog⁴ på en 50 km (mellem 2 regularitetspunkter) dobbeltsporet strækning, hvor den gennemsnitlige strækningshastighed er 120 km/h (togets v_{\max} større), kan togets maksimale fremføringshastighed v mellem regularitetspunkterne bestemmes på følgende vis:

$$t_{\text{opt}} = \frac{50 \text{ km}}{120 \text{ km/h}} \cdot 60 \text{ min/h} + 0,05 \text{ min/km} \cdot 50 \text{ km} = 27\frac{1}{2} \text{ min}$$

⇕

$$v = \frac{1}{t_{\text{opt}}} = \frac{50 \text{ km}}{27\frac{1}{2} \text{ min}} \cdot 60 \text{ min/h} = 109 \text{ km/h}$$

Ovenstående generelle hastighedsnedsættelse kan karakteriseres som konsekvensen af et driftstillæg, da det vedrører et tillæg, som skal sikre at køreplanen kan overholdes, selvom der skulle være mindre driftsforstyrrelser.

På tilsvarende vis opererer man med et LA-tillæg⁵, som skal sikre, at der i forbindelse med sporarbejder er afsat tid til at nedsætte hastigheden over en kortere strækning.

Størrelsen af dette LA-tillæg beregnes ved at påføre toget en hastighedsnedsættelse til 30 km/h over en strækning på 100 m, hvorefter det kan accelerere til den oprindelige hastighed. For et regionaltog⁶ der i gennemsnit kører 120 km/h, kan man vha. bilag 4.2 bestemme størrelsen af LA-tillægget t_{LA} til:

$$(4) \quad t_{\text{LA}} = t_{\text{dec}} + t_{30} + t_{\text{acc}} - t_0$$

⇓

$$t_{\text{LA}} = (52 - 13) \text{ s} + \frac{100 \text{ m}}{30 \text{ km/h}} \cdot 3,6 \frac{\text{km/h}}{\text{m/s}} + (155 - 13) \text{ s} - \frac{(874 - 55) \text{ m} + 100 \text{ m} + (3.555 - 55) \text{ m}}{120 \text{ km/h}} \cdot 3,6 \frac{\text{km/h}}{\text{m/s}}$$

⇕

$$t_{\text{LA}} = 60 \text{ s} = 1 \text{ min}$$

Hvor: t_{dec} er tiden hvor toget nedbremser

t_{30} er tiden, hvor toget kører med konstant hastighed $v = 30 \text{ km/h}$

t_{acc} er tiden, hvor toget accelererer

t_0 er køretiden, såfremt toget fortsætter gennem "LA-området" med max. hastighed

Normalt tildeles LA-tillæggene pr. 50 km, men eksempelvis på stærkt trafikerede enkeltsporede strækninger kan LA-tillægget gives hyppigere for at opretholde en tilfredsstillende regularitet.

⁴ MZ lokomotiv med toglængde $L = 192,3 \text{ m}$ (svarende til 7 vogne)

⁵ Køreplanstillæg som dækker over LAngsom kørsel

⁶ MZ lokomotiv med toglængde $L = 192,3 \text{ m}$ (svarende til 7 vogne)

Såfremt LA-tillægget t_{LA} er større end driftstillægget, vil det være dette tillæg, man benytter som køreplanstillæg t_{kt} i ligning (3), ellers benyttes driftstillægget som køreplanstillæg. I det gennemregnede eksempel, vil det således være driftstillægget ($2\frac{1}{2}$ min), der skal benyttes som køreplanstillæg, da dette er større end LA-tillægget (1 min).

Køreplantillæggenes formål er at skabe en høj kvalitet Q (rettidighed) i trafikafviklingen. For store køreplanstillæg vil dog virke generende, da rejsetiden herved forøges unødigt for rettidige tog. Det er derfor lidt af en balance at finde den rette størrelse på disse tillæg. De nugældende tillæg har dog været gældende siden 1977, så noget kunne tyde på, at de under de hidtidige omstændigheder har en fornuftig størrelse⁷. Størrelsen af køreplanstillæggen bør dog afhænge af trafikbelastningen A og trafiksammenhængens homogenitet, såfremt der ønskes en bestemt kvalitet Q . Store køreplanstillæg kan således delvist modvirke det fænomen, at en øget trafikbelastning A vil medføre en dårligere trafik kvalitet Q .

En anden måde at skabe kvalitet i trafikafviklingen er at operere med nogle buffertider t_b , som sikrer, at der i køreplanen vil være "luft" mellem de enkelte tog, således forstået at en lille forsinkelse for et tog ikke vil sprede sig til efterfølgende tog.

Ligesom det er tilfældet med køreplanstillæggen skal buffertiderne t_b afpasses nøje, da de vil være kapacitetshæmmende.

Litteratur

- [1] Kastrup Station - Undersøgelse af trafikale forhold
 Anders Hunæus Kaas
 Eksamensprojekt DTU - Institut for veje, trafik og byplan - Forår 1994
- [2] Optimering af jernbaneblokaftande ved ATC anlæg
 Anders Hunæus Kaas
 Trafikdage på AUC '95
- [3] Udvikling og praktisk anvendelse af kapacitetsmodel for jernbaner
 Anders Hunæus Kaas, Dorte Filges og Mogens Nielsen
 Trafikdage på AUC '96
- [4] EDB-simuleringsmodeller til brug ved jernbaneplanlægning
 Anders Hunæus Kaas og Volker Klahn
 Trafikdage på AUC '97
- [5] Metoder til beregning af jernbanekapacitet

⁷ I løbet af det seneste år er trafikken på nogle af de danske hovedstrækninger blevet mere inhomogen, hvilket primært skyldes, at strækningshastigheden flere steder er forøget fra 140 km/h til 180 km/h. Godstogene og de fleste regionaltoget vil dog fortsat køre henholdsvis ca. 100 km/h og 140 km/h, hvilket betyder, at togenes indbyrdes hastighedsforskel bliver større. Dette bør afstedkomme større køreplanstillæg, såfremt der ønskes den samme kvalitet Q på trafikafviklingen. De forholdsvis dårlige accelerationsegenskaber for IC3-tog ved 180 km/h betyder dog, at LA-tillæggen bliver forholdsvis store, hvilket i princippet kan medvirke til at kompensere for den mere inhomogene trafik. Denne kompensering opnås dog ikke, hvis togene er hurtigt accelererende ved 180 km/h, og derfor bør der på anden vis kompenseres for de store hastighedsforskelle på den samme infrastruktur.

Anders Hunæus Kaas

Ph.D-afhandling DTU - Institut for Planlægning rapport nr. 6 - Maj 1998

- [6] Modernisering af jernbanens hovednet
Baneplanudvalget, Trafikministeriet
April 1997

- [7] Kapacitetsanalyse af jernbanestrækningen Næstved-Lübeck via Femer Bælt forbindelse
se
Banestyrelsen rådgivning
Januar 1998

- [8] Kapacitetsundersøgelser af Gamlebyen (Oslo)
ScanRail Consult⁸
Marts 1998

- [9] Flydende blok København H - Østerport
Banestyrelsen rådgivning (notat af AHK)
24.07.98

⁸ Banestyrelsen rådgivnings navn ved opgaver udenfor Danmark