

KAPACITET AF RUF-SYSTEMET – KAN DET LADE SIG GØRE?

Af

Torben A. Knudsen, Stud. Polyt. & Claus Rehfeld, Forskningsadjunkt
Center for Trafik og Transportforskning (CTT)
Danmarks Tekniske Universitet
Bygning 115, 2800 Lyngby
Email: torben.knudsen@it.dk, crehfeld@ivtb.dtu.dk
Tlf. (+45) 33 21 23 35 / (+45) 45 25 15 00, Fax. (+45) 45 93 64 12

Abstract

Dette paper indeholder en diskussion af RUF-systemets kapacitetsforhold. RUF står for Rapid, Urban, Flexible og er et nyt transportmiddel, der er en slags hybrid imellem en personbil og et kollektivt transportmiddel. De enkelte køretøjer kan kobles sammen til togstammer, som så kan køre på en skinne med et trekantformet profil, som de sammenkoblede køretøjer altså hænger på. En konsekvens af dette design er, at skift fra en skinne til en anden ikke kan lade sig gøre uden af køre af skinnen, medmindre skiftet sker v.h.a. en bevægelig skinne. RUF-systemet har været diskuteret i mange år i Danmark, og formålet med dette paper er at præsentere nogle objektive fakta om, hvorvidt kapaciteten på en RUF-strækning faktisk er sammenlignelig med en vejstrækning af sammenlignelig type.

Med udgangspunkt i teorien for jernbaners kapacitet er de parametre, som er afgørende for kapaciteten af RUF-strækninger, identificeret, nemlig antallet af køretøjer pr. togstamme, hastigheden, sikkerhedsafstanden, decelerationen og længden af hver RUF. Det er påvist, at to parallelle RUF-skiner kapacitetsmæssigt kan afvikle nogenlunde samme trafikmængder som en firesporet motorvej, hvis køretøjerne kobles sammen to og to.

Sikkerheden i systemet er altafgørende, og det er derfor nødvendigt at bremse ned til lav hastighed (ca. 30 km/h) ved ankomst til knudepunkterne. Det er derfor kapaciteten af knudepunkterne, som er dimensionerende for systemet, og disse bør derfor underkastes en nærmere kapacitetsundersøgelse.

Det er påvist, at en knudepunktsudformning med en bevægelig skinne bliver en kapacitetsmæssig flaskehals, medmindre sporskiftetiden for skinnen kan holdes under et par sekunder, hvilket ikke anses for hverken realistisk eller sikkerhedsmæssigt

forsvarligt. En udformning, hvor der kortvarigt skiftes til vejkørsel, er derfor uundgåelig.

Med dette paper haves en analytisk udledning af kapacitetsforholdene for RUF-strækninger, og næste skridt vil være at forsøge at evaluere kapaciteten af knudepunkterne ved anvendelse af simulation.

Introduktion til RUF-systemet

RUF-systemet er et alternativt transportsystem under udvikling. RUF er et såkaldt dual-mode-transportssystem, som kombinerer fordelene fra biltrafikken (stor fleksibilitet og imødekommelse af individuelle behov) og jernbanen (stor kapacitet og høj sikkerhed). I systemet indgår såvel individuelle som kollektive køretøjer, som vist på figur 1:



Figur 1 Individuel og kollektiv RUF

Dual-mode-princippet indebærer, at køretøjerne kan køre såvel på det eksisterende vejnet som på et net af nyanlagte skinner, hvor køretøjerne kan kobles sammen til "togstammer" alt efter kapacitetsbehovet. Dual-mode-princippet er illustreret på figur 2:



Figur 2 Dual-mode-princippet

Skinnen har et trekant-profil, og de sammenkoblede køretøjer hænger altså på skinnen, hvilket indebærer, at skift fra en skinne til en anden ikke kan lade sig gøre uden af køre af skinnen. Skiftet fra skinnekørsel til vejkørsel og tilbage igen foregår automatisk ved lav hastighed af hensyn til sikkerheden i systemet.

I RUF-systemet køres der på længere stræk på en skinne, hvor de enkelte køretøjer kan kobles sammen til togstammer. Skinnedelen af RUF-systemet kan derfor betragtes som en art jernbane. Udgangspunktet for kapacitetsanalyserne er derfor teorier for jernbaners kapacitetsforhold, som dog er tilpasset til RUF-systemet.

Anvendelse af jernbaneteorier på RUF-systemet

Mange af de faktorer, som er afgørende for jernbaners kapacitet, er helt analoge i RUF-systemet. Det gælder f.eks. begreberne sikkerhedsafstand, togfølgeafstand og togfølgetid. Kapaciteten af en RUF-strækning vil afhænge af, hvilken sikkerhedsafstand man vælger at have mellem RUF'erne, der kører på strækningen. Jo kortere sikkerhedsafstanden kan gøres, jo højere vil kapaciteten blive. Kapaciteten af en RUF-strækning kan i en vis udstrækning tilpasses trafikefterspørgslen, idet kapaciteten afhænger af en række parametre, bl.a. antallet af sammenkoblede køretøjer pr. togstamme, som forholdsvis enkelt kan varieres alt efter efterspørgselsituationen.

Sikkerhedsafstanden bør relateres til RUF'ernes bremseafstand, og i denne gennemgang af kapacitetsforholdene er der regnet med en sikkerhedsafstand, som svarer til bremselængden af en RUF ved en deceleration på 1G (9,82m/s²), hvilket svarer til nødbremning. Bremseafstanden afhænger af hastigheden, hvorfor sikkerhedsafstanden (og dermed også kapaciteten) også vil være hastighedsafhængig. Fra jernbaneteorien haves flg. formel for bremselængden af et tog (Kaas, Anders H., 1998):

$$\text{Formel 1} \quad S_b = \frac{v^2}{2 \cdot (c \cdot r_c + r_T)} + (t_R + t_G) \cdot v$$

Hvor:

- S_b er bremseafstanden [m]
- v er hastigheden [m/s]
- c er bremsegraden [-]
- r_c er bremseretardationen [m/s²]
- r_T er tyngderetardationen [m/s²]
- t_R er reaktionstiden [s]
- t_G er gennemslagstiden [s]

Idet det kan antages, at bremserne kan aktiveres øjeblikkeligt i hele RUF-stammens længde, kan formelen simplificeres til (Knudsen, Torben A., 1999):

$$\text{Formel 2} \quad S_b = \frac{v^2}{2 \cdot k_{dec} \cdot G}$$

Hvor:

- k_{dec} er en bremsekonstant [-]
- G er tyngdeaccelerationen (9,82 m/s²)

Den tid, der går mellem at to på hinanden følgende togstammer passerer samme punkt, kaldes togfølgetiden og kan nu bestemmes v.h.a. formel 3.

Formel 3

$$t_t = \frac{S_t}{v} = \frac{S_b + L \cdot n}{v} = \frac{\frac{v^2}{2 \cdot k_{dec} \cdot G} + L \cdot n}{v} = \frac{v}{2 \cdot k_{dec} \cdot G} + \frac{L \cdot n}{v}$$

Hvor:
 t_t er togfølgetiden [s]
 S_t er togfølgeafstanden [m]
 L er længden af hver RUF [m]
 n er antallet af RUF'er koblet sammen i den forreste stamme

Kapacitet og togfølgetid

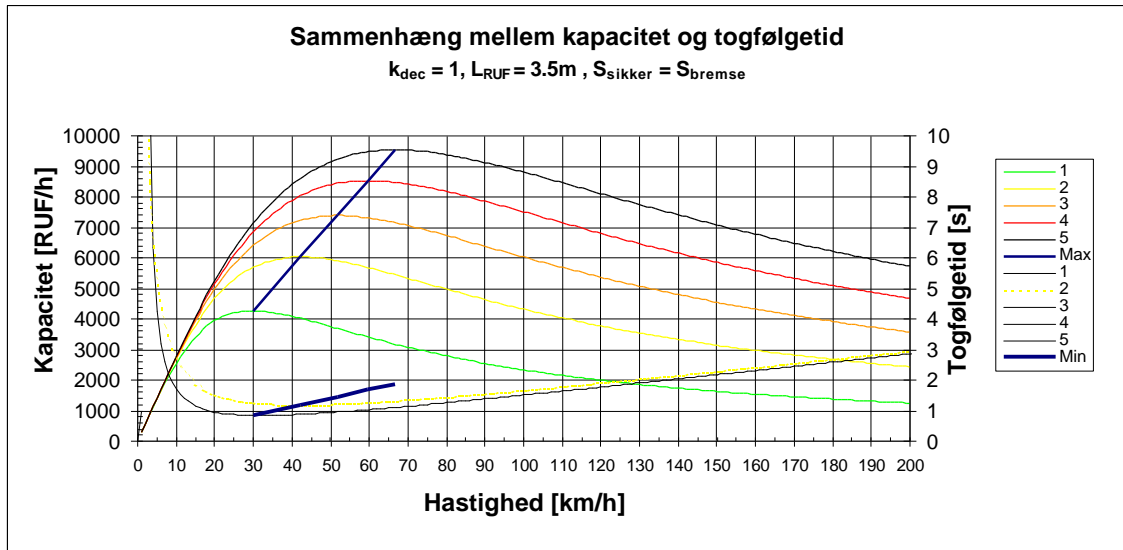
Med kendskab til togfølgetiden er det muligt at bestemme kapaciteten som det maksimale antal RUF'er, der kan passere et tværsnit inden for et givent tidsrum. Timekapaciteten kan således bestemmes v.h.a. formel 4, hvor nævneren i brøken repræsenterer togfølgeafstanden:

Formel 4

$$K_{max} = n \cdot \frac{3600}{\frac{v}{2 \cdot k_{dec} \cdot G} + \frac{L \cdot n}{v}}$$

Hvor: K_{max} er den maksimale kapacitet [RUF'er/h]

Kapaciteten af en RUF-strækning stiger, jo flere RUF'er der kan kobles sammen til en togstamme. I praksis vil der dog være en øvre grænse for antallet af RUF'er pr. togstamme, dels af publikumshensyn (ventetiden pr. køretøj stiger, jo flere køretøjer, der kobles sammen), og dels fordi togstammelængden er af betydning for udformningen af fletteanlæggene, hvor der under fletningen skal skiftes fra "skinne-mode" til "vej-mode". På figur 3 ses sammenhængen imellem togfølgetid og kapacitet optegnet ved anvendelse af formel 3 og 4.



Figur 3 Sammenhæng mellem kapacitet og togfølgetid.

Maksimering af kapaciteten ved minimering af togfølgetiden

Af figur 3 ses det, at der findes en optimal hastighed, som maksimerer kapaciteten, idet togfølgetiden ved denne hastighed minimeres. Den optimale hastighed bestemmes ved at differentiere nævneren i formel 4 m.h.t. tiden, sætte det differentierede udtryk lig med nul og løse ligningen m.h.t. hastigheden v . Herved fås den ud fra et kapacitetsmaksimerende kriterium optimale hastighed, som er givet ved formel 5:

$$\text{Formel 5} \quad v_{\text{opt}} = \sqrt{2 \cdot k_{\text{dec}} \cdot G \cdot L \cdot n}$$

Hvor: v_{opt} er den hastighed, som resulterer i den største kapacitet [m/s]

Nøgletallene fra figur 3 er opsummeret i tabel 1:

Antal RUF / togstamme	Optimal hastighed	Minimal togfølgetid	Maksimal kapacitet	Kapacitet ved 30 km/h	Kapacitet ved 100 km/h
1	30 km/h	0,84 sek	4264 RUF/h	4264 RUF/h	2337 RUF/h
2	42 km/h	1,19 sek	6030 RUF/h	5695 RUF/h	4321 RUF/h
3	52 km/h	1,46 sek	7385 RUF/h	6412 RUF/h	6026 RUF/h
4	60 km/h	1,69 sek	8528 RUF/h	6843 RUF/h	7506 RUF/h
5	67 km/h	1,89 sek	9534 RUF/h	7131 RUF/h	8805 RUF/h

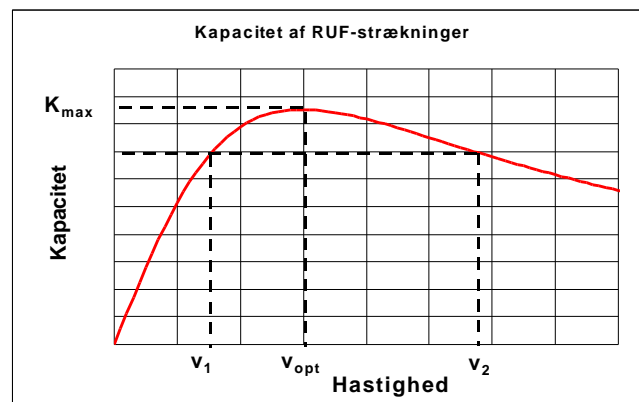
Tabel 1 Nøgletal fra figur 3

Det fremgår af tabellen, at såfremt der anlægges to parallelle RUF-skiner til afvikling af trafikken i hver sin retning, vil disse kunne tilbyde en kapacitet af nogenlunde samme størrelsesorden som en firesporet motorvej. Hvis RUF'erne kører enkeltvis ved 100 km/h, vil kapaciteten svare til et motorvejsspor, men hvis de kobles sammen to og to, vil der kunne opnås en kapacitet, som er sammenlignelig med to motorvejsspor i hver retning

Sikkerhed i RUF-systemet

Når togstammerne ankommer til knudepunkterne i RUF-systemet, nedbremses de til lav hastighed, ca. 30 km/h. Nedbremsningen er nødvendig af hensyn til sikkerheden under skiftet mellem skinnekørsel og vejkørsel og fletningen med de øvrige trafikstrømme i knudepunkterne.

Nedbremsningen medfører, at den forholdsvis høje skinnekapacitet ikke kan udnyttes fuldt ud, hvilket er forklaret herunder. Hvis der køres med hastigheder, som er højere end den optimale hastighed, vil kapaciteten under et nedbremsningsforløb først vokse, indtil den optimale hastighed er nået, hvorefter den igen vil aftage, som illustreret på figur 4:



Figur 4 Kapacitet af RUF-strækninger under nedbremsningsforløb.

Såfremt strækningernes kapacitet udnyttes fuldt ud, vil hastigheden i knudepunkterne således ikke kunne sænkes lavere end v_1 uden et kapacitetstab til følge. Da v_1 fastsættes ud fra sikkerhedshensyn, er det altså knudepunkterne i systemet, der udgør den kapacitetsmæssige flaskehals, og disse bør derfor være genstand for yderligere kapacitetsundersøgelser.

Knudepunktsudformning med bevægelig skinne

Såfremt man forestillede sig knudepunkterne udformet med en bevægelig skinne, vil man altså ved retningskifte have en udfletning af to trafikstrømme ved

sporskiftehastigheden, $v_{\text{sporskifte}}$. Udfletning af togstrømme udgør normalt ikke nogen flaskehals, og det vil heller ikke være tilfældet her, så længe restriktionen i formel 6 er opfyldt:

Formel 6
$$\frac{n \cdot L + L_{\text{sporskifte}}}{v_{\text{sporskifte}}} + t_{\text{sporskifte}} \leq t_{t,\text{min}}$$

Hvor:
 $L_{\text{sporskifte}}$ er længden af sporskiftezonen [m]
 $v_{\text{sporskifte}}$ er den hastighed, der køres med gennem sporskiftezonen [m/s]
 $t_{\text{sporskifte}}$ er den tid, sporskiftet er om at skifte mellem de to positioner [s]
 $t_{t,\text{min}}$ er den mindste togfølgetid mellem de ankomende RUF'er [s]

Det første led i formlen kan opfattes som "rømningstiden" af sporskiftezonen, d.v.s. den tid, der går fra forenden af en togstamme med længden $n \cdot L$ kører ind i sporskiftezonen, til bagenden af samme togstamme igen er fri af sporskiftezonen. Så længe restriktionen er opfyldt, vil kapaciteten af udfletningspunktet være den samme som kapaciteten af den opstrøms liggende strækning, da den bevægelige skinne vil kunne nå at skifte position inden ankomsten af den næste RUF, uanset retningsfordelingen af de ankomende RUF'er.

Såfremt relationen ikke kan opfyldes, vil sporskiftetiden, $t_{\text{sporskifte}}$, være dimensionerende for kapaciteten af udfletningspunktet, som så kan findes v.h.a. formel 7:

Formel 7
$$K_{\text{max}} = n \cdot \frac{\Delta T}{t_{\text{sporskifte}} + \frac{n \cdot L + L_{\text{sporskifte}}}{v_{\text{sporskifte}}}}$$

Hvor:
 K_{max} er den maksimalt opnåelige kapacitet [RUF/h]
 n er antallet af RUF'er i de(n) ankomende togstamme(r)
 ΔT er betragtningstidsrummet (f.eks. 3600s/h)
 $t_{\text{sporskifte}}$ er den tid, sporskiftet er om at skifte mellem de to positioner [s]

Som det ses af formlen, stiger kapaciteten, jo kortere sporskiftetiden, $t_{\text{sporskifte}}$, og længden af sporskiftezonen, $L_{\text{sporskifte}}$, kan gøres, ligesom en øget hastighed, $v_{\text{sporskifte}}$, gennem sporskiftezonen vil højne kapaciteten. Bemærk i øvrigt analogien til formel 4.

Den maksimale sporskiftetid

Som vist ovenfor er sporskiftetiden en af de vigtigste faktorer for kapaciteten af et knudepunkt udformet med en bevægelig skinne. Ved at indsætte udtrykket for togfølgetiden fra formel 3 i formel 6 kan der opstilles flg. restriktion for sporskiftetiden, for at denne ikke skal udgøre en kapacitetsmæssig flaskehals:

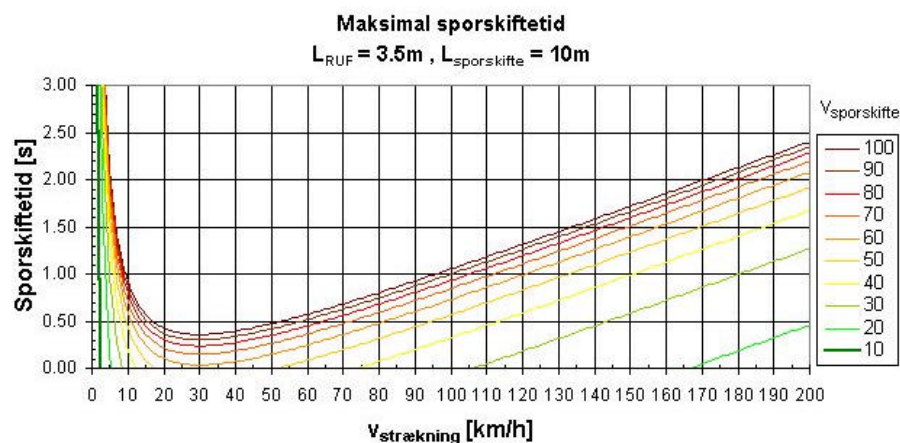
Formel 8

$$t_{\text{sporskifte}} \leq \frac{v_{\text{strækning}}}{2 \cdot k_{\text{dec}} \cdot G} + \frac{L \cdot n}{v_{\text{strækning}}} - \frac{n \cdot L + L_{\text{sporskifte}}}{v_{\text{sporskifte}}}$$

Hvor:

- $t_{\text{sporskifte}}$ er sporskiftetiden [s]
- $v_{\text{strækning}}$ er den opstrøms strækningshastighed [m/s]
- k_{dec} er decelerationskoefficienten [-]
- $L_{\text{sporskifte}}$ er længden af sporskiftezone
- $v_{\text{sporskifte}}$ er hastigheden gennem sporskiftezone [m/s²]

Den maksimale sporskiftetid haves, hvis lighedstegnet i restriktionen i formel 8 er gældende. Hermed kan den maksimale sporskiftetid afbildes som funktion af hastigheden på den opstrøms liggende strækning for forskellige værdier af hastigheden gennem sporskiftezone. Dette er gjort på figur 5, hvor det forudsættes, at RUF'erne ankommer enkeltvis ($n=1$), og længden af sporskiftezone, $L_{\text{sporskifte}}$, er sat til 10m:



Figur 5 Maksimal sporskiftetid som funktion af den opstrøms strækningshastighed

Som det ses af figuren, skal sporskiftetiden under alle omstændigheder være meget kort (0-2 sek.), hvis ikke knudepunktet skal udgøre en kapacitetsmæssig flaskehals, hvis det udformes med en bevægelig skinne. Sporskiftetider af den størrelsesorden regnes dels for teknisk umulige og dels for sikkerhedsmæssigt uforsvarlige, hvilket leder til den konklusion, at det er nødvendigt kortvarigt at skifte til vejkørsel ved passage af knudepunkterne.

Konklusion

I dette paper er der foretaget en analytisk vurdering af den maksimale kapacitet af skinnedelen af RUF-systemet. Udgangspunktet har været teori om jernbaners kapacitetsforhold, tilpasset til RUF-systemet. Analyserne har vist, at kapaciteten af to parallelle RUF-skinne er sammenlignelig med en firesporet motorvejs kapacitet, såfremt RUF'erne kobles sammen to og to. De parametre, som er afgørende for

kapaciteten er antallet af køretøjer pr. togstamme, hastigheden, sikkerhedsafstanden, decelerationen og længden af hver RUF.

Af hensyn til sikkerheden af systemet er det nødvendigt at bremse ned til lav hastighed i knudepunkterne, inden skift fra skinne- til vejkørsel og fletning med øvrige trafikstrømme kan foregå. Herved bliver det kapaciteten af knudepunkterne, som er dimensionerende for systemet, og disse bør derfor underkastes en nærmere kapacitetsundersøgelse.

Det er påvist, at en knudepunktsudformning med en bevægelig skinne bliver en kapacitetsmæssig flaskehals, medmindre sporskiftetiden for skinnen kan holdes under et par sekunder, hvilket ikke anses for hverken realistisk eller sikkerhedsmæssigt forsvarligt. En udformning, hvor der kortvarigt skiftes til vejkørsel, er derfor uundgåelig.

For at kunne be- eller afkræfte de opstillede konklusioner præsenteret i dette paper og for at kunne undersøge kapaciteten af knudepunkter i RUF-systemet yderligere fortsættes den beskrevne forskning ved DTU ved at inddrage simulationsværktøjer i analyserne. Resultaterne af denne forskning forventes klar primo år 2000.

Litteratur

Kaas, Anders H., 1998 *Metoder til beregning af jernbanekapacitet*, Institut for Planlægning, Rapport 6

Knudsen, Torben A., 1999, *RUF-systemets kapacitetsforhold*, Institut for Planlægning