

Cityringen, trafikale analyser

Af Anders H. Kaas, Atkins Danmark A/S
Erik Mørck Jacobsen, Atkins Danmark A/S
Klavs Hestbek Lund, Metroselskabet I/S

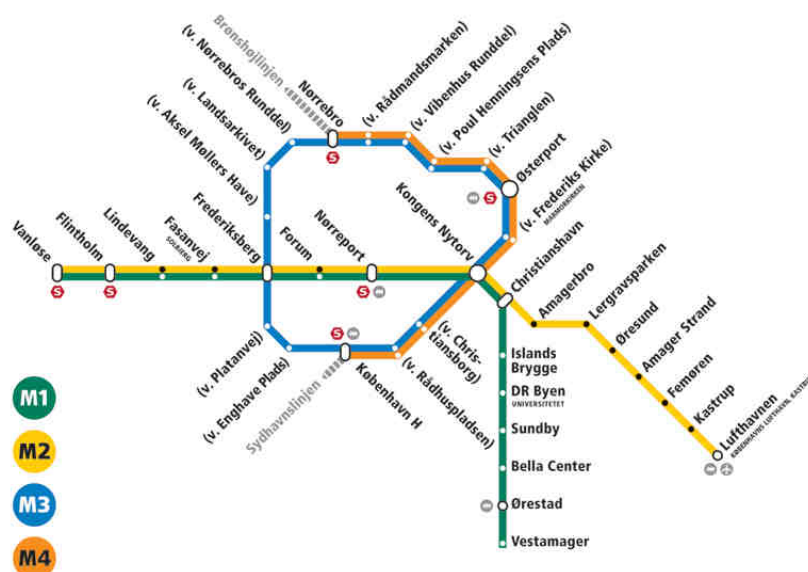
1. Baggrund og formål

I tillæg til de to første metrolinjer i København, der blev åbnet fra 2002-2007, har ejerne Staten og København og Frederiksberg kommuner igangsat Metroselskabet med projekteringen af yderligere en metroring i København kaldet "Cityringen" (se figur 1 nedenfor).

Cityringen er en ca. 16 kilometer lang underjordisk fuldautomatisk metroring med 17 undergrundsstationer. En tur rundt i Cityringen forventes at tage ca. 24 minutter, men den længste rejse mellem to destinationer vil ikke tage mere end 12 minutter under normale driftsforhold. På Cityringen skal køre to linjer: M3, som bliver en ringlinie, der passerer alle ringens standsningssteder og M4, som bliver en pendullinje, der betjener stationerne mellem København H, Østerport og Nørrebro. Cityringen bliver desuden forberedt for udvidelser mod Sydhavn og Brønshøj.

I myldretiderne skal Cityringen på strækningen mellem København H, Østerport og Nørrebro afvikle op til 36 tog i timen. På den øvrige del af Cityringen bliver betjeningsfrekvensen det halve.

I et højfrekvent undergrundssystem som Cityringen, vil det være ekstremt dyrt og nærmest umuligt at ændre infrastrukturen efter åbning. Derfor er det vigtigt på forhånd at kunne dokumentere, at den nye infrastruktur vil være i stand til afvikle den planlagte trafik.



Figur 1 Københavns Metro (M1 og M2) og Cityringen (M3 og M4)

2. Anvendte metoder, analyser og fremgangsmåde

For at verificere infrastrukturen udføres trafikale analyser i simuleringsværktøjet RailSys og omløbsplanlægningsværktøjet DISPO. Verificeringen skal medvirke til afklaring om de skitserede løsninger overholder lovforslagets forudsætninger, blandt andet om:

- Køretider i systemet
- Antal tog på Cityringen for at køre den planlagte trafik
- Driftsformer
- Togkapacitet, betjeningsfrekvens og stabilitet

På grund af de hyppige afgang i Cityringen vil afstanden mellem togene (tid til næste afgang) være mere interessant end afgangstiden for de fleste passagerer. De trafikale analyser for Cityringen adskiller sig derfor fra de traditionelle jernbaner ved primært at tage udgangspunkt i afvigelser i betjeningsfrekvensen og om rejsetiden kan opretholdes på det ønskede niveau ("Headway Regulation") frem for forsinkelser i forhold til køreplanen (såkaldt "Schedule Regulation").

Samlet set skal de trafikale analyser (trafiksimuleringer) i de tidlige projektfaser være med til at sikre og dokumentere, at den foreslåede trafik kan afvikles på det færdige anlæg.

3. Resultater

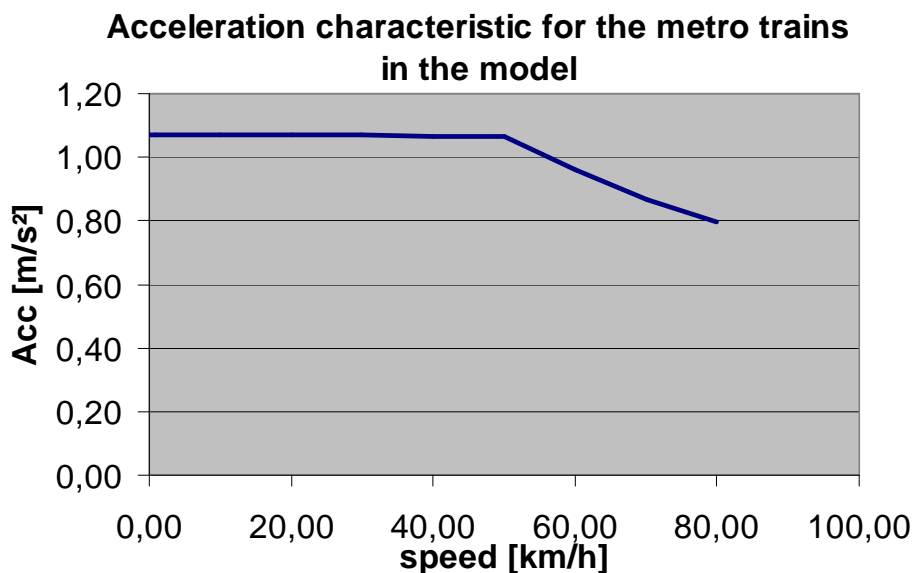
3.1 Køretider

Køretiderne i Cityringen er en central forudsætning som ligger til grund for samfundsøkonomi, anlægsøkonomi, antal tog i de forskellige driftsscenerier etc. Køretiderne i Cityringen har stor betydning for hvor mange togsæt, der skal indkøbes for at køre den planlagte trafik. For eksempel kan højere hastighed på Cityringen betyde, at der skal anvendes færre togsæt til at transportere flere passagerer hurtigere mellem deres bestemmelsesstationer. Mindre køretider kan således i nogle tilfælde retfærdiggøre højere anlægskostninger.

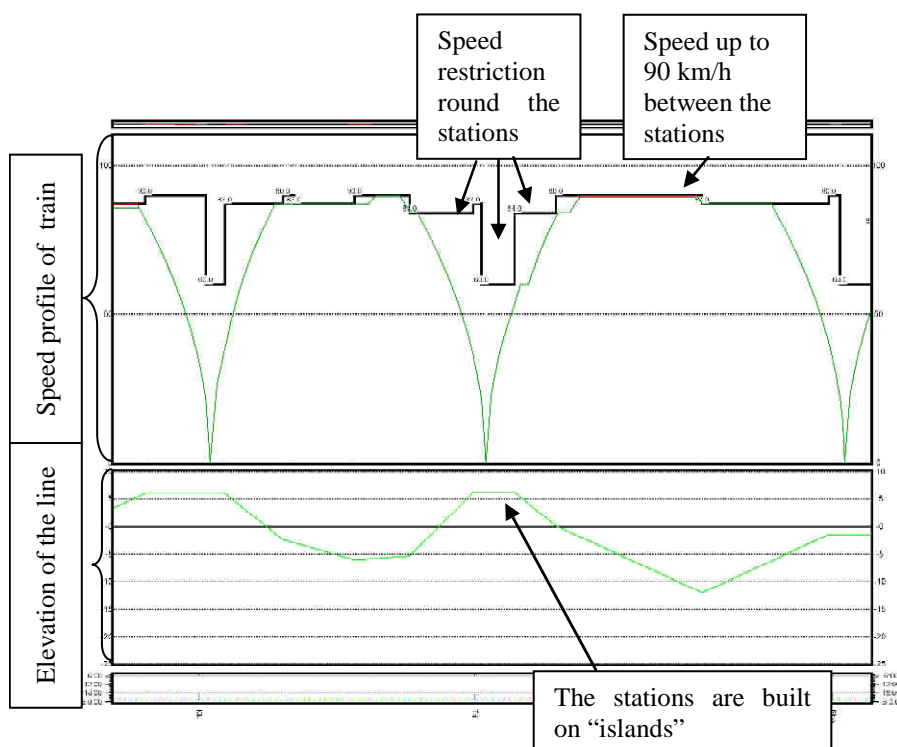
Køretiderne beregnes under forudsætning af projektets linjeføring med de afstande, hastigheder og stigningsforhold som forventes kommer til at gælde i det færdige anlæg. For det rullende materiel er det nødvendigt at begrænse materiellets maksimale acceleration og bremsning af komfortmæssige hensyn til de mange stående passagerer. Figur 2 viser accelerationsegenskaberne for en af de togtyper, som er anvendt i analyserne.

Implementering af materielegenskaber og projektets linjeføring i RailSys giver mulighed for en nøjagtig beregning af køretiderne.

Undervejs i processen er en række forskellige hastighedsprofiler på Cityringen blevet testet for at sikre, at køretiderne overholder de forventede køretider. Figur 3 viser en typisk linjeføring ved stationerne og en hastighed op til 90 km/t mellem stationerne. Generelt vil stationerne blive bygget tættere på overfladen, som giver korte gåafstande og hjælper samtidig togene med at accelerere og bremse.



Figur 2 Accelerationsegenskaber for metro tog



Figur 3 Linjeføring for metroen

Køretiderne, betjeningsfrekvenserne, opholdstiderne på stationerne og udformning af vendeanlæggene er kerneinput til beregning af det nødvendige antal togsæt, som skal køre på Cityringen.

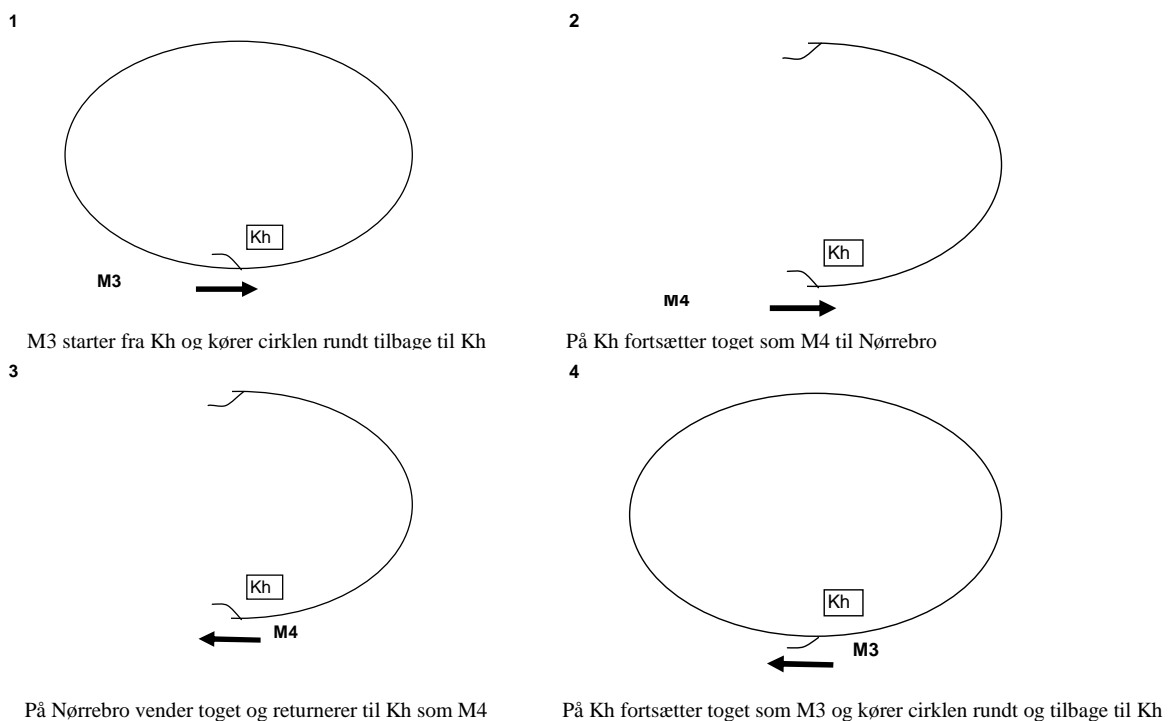
Betjeningsfrekvensen er et krav til systemet, men det er også et krav at køre så hurtigt som muligt. Derfor er betjeningsfrekvensen en funktion af, hvor mange tog der kører i systemet, for eksempel 10, 15 eller 26 togsæt i drift.

Ved at anvende DISPO er det muligt at beregne togkilometre og antallet af tog i drift i forskellige scenarier.

3.2 Driftsformer

Vende-anlægget for pendullinjen M4 skal placeres ved Nørrebro station, den endelige udformning og placering er ikke endeligt fastlagt. Det samme gælder vendeanlægget ved København H (Kh), hvor man også arbejder på forskellige løsninger og lokaliseringer. Afhængig af servicefrekvensen og antallet af togsæt i drift kan metroen køre efter to principielt forskellige principper.

- ”Uafhængig”. Linje M3 kører som en ringlinje mens M4 kører som en pendullinje. Begge linjer kører uafhængig af hinanden i begge retninger i denne driftsform.
- ”Butterfly”. Ved ”Butterfly” driftsformen er linjerne blandet. Først kører et tog på linje M3, når toget er nået rundt i cirklen, kører det videre som linje M4 indtil endestationen. Her vender toget og kører, som linje M4 i den modsatte retning og videre som linje M3. På denne måde kører toget i ca. 1½ time indtil det er tilbage ved sit udgangspunkt. Se figur 4.



Figur 4 ”Butterfly” princippet

3.3 Togkapacitet og stabilitet

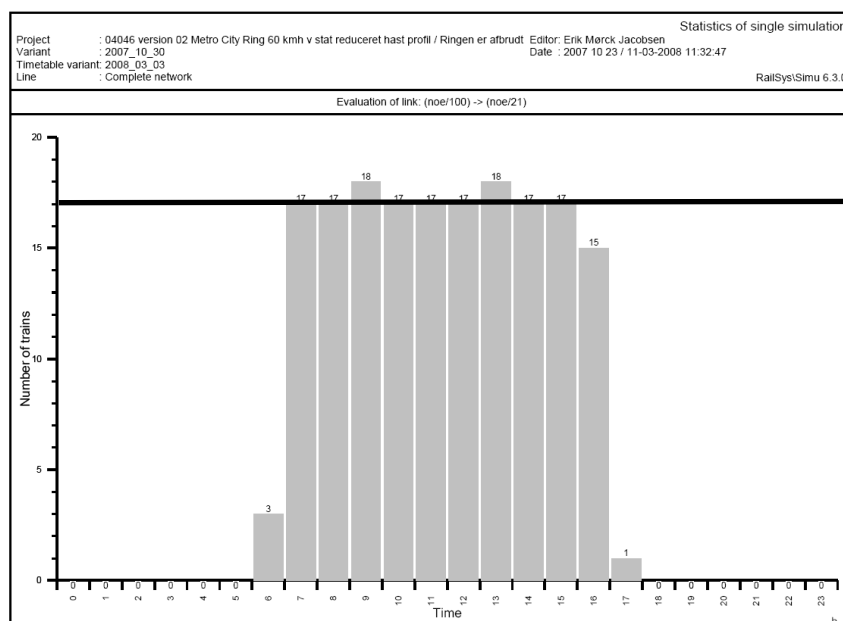
I RailSys kan dels afdækkes, om den ønskede trafik ideelt set kan realiseres, og dels hvordan trafikken bliver afviklet i forskellige scenarier, hvor trafikken bliver påvirket af fejl og forstyrrelser. For at undersøge stabiliteten af Cityringen er en række scenarier analyseret, blandt andet:

- Teoretisk ideel trafikafvikling (uden forstyrrelser)
- Trafikafvikling hvor opholdstiderne på tre standsningssteder er forlænget
- Trafikafvikling hvor køretiderne på den ene ring er forlænget i forhold til køretiden på ringen i den modsatte retning.
- Trafikafvikling hvor køretiderne på begge ringe er forlænget
- Trafikafvikling hvor der mellem de øvrige tog kører et defekt tog med væsentlig ringere køreegenskaber (kun 80 % af normal præstation) end de øvrige tog.
- Trafikafvikling hvor et spor er spærret mellem et eller flere standsningssteder

Kvaliteten af trafikafviklingen måles i afvigelser af betjeningsfrekvensen og opretholdelsen af rejsetiden på det ønskede niveau.

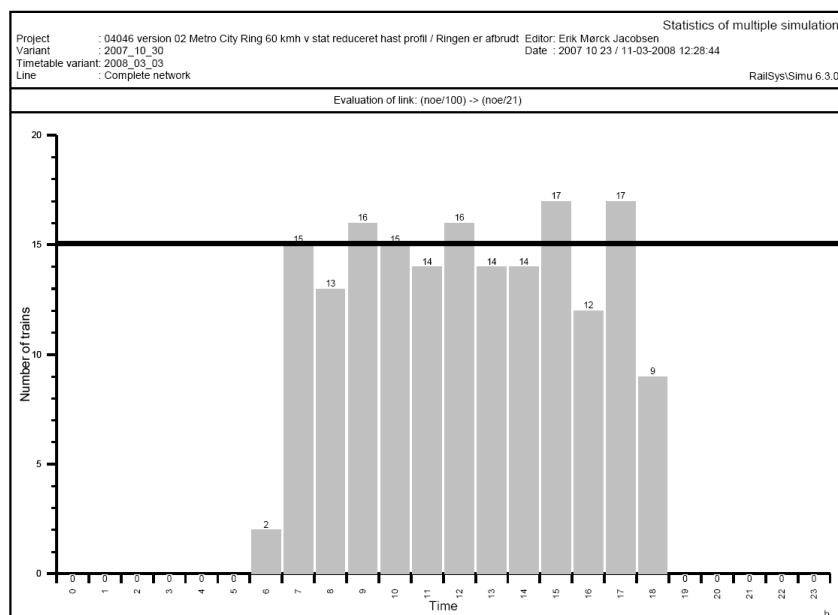
3.3.1 Eksempel

I myldretiden skal Nørrebro betjenes af op til 36 tog i timen. I eksemplet nedenfor er undersøgt stabiliteten, når der i det undersøgte tidsrum fra time 6 til time 16 kører 17 til 18 tog hver time, svarende til en togfølge på 200 – 212 sekunder. Denne betjeningsfrekvens er valgt til analyserne, fordi den bedre illustrerer de uregelmæssigheder, som kan opstå i trafikafviklingen ved driftsforstyrrelser. Betjeningsfrekvensen på 17 til 18 tog pr time er udgangspunktet for de efterfølgende analyser af forstyrrelser og forlængelser af holdetiderne på stationerne. Figur 5 viser betjeningsfrekvensen, når trafikken afvikles uden driftsforstyrrelser.



Figur 5 Teoretisk ideel trafikafvikling (uden forstyrrelser) Nørrebro station betjenes af 17 til 18 tog pr. time

I RailSys er det muligt at undersøge, hvordan forlængede opholdstider influerer på afviklingen af trafikken i myldretiden. I eksemplet er opholdstiderne forlænget fra 25 til 45 sekunder på tre centrale stationer i begge retninger. Køretiden Cityringen rundt er forlænget med 3 x 20 sekunder (= 1 minut) og betjeningsfrekvensen vil forsøge at stabilisere sig på et nyt niveau. På Nørrebro station vil betjeningsfrekvensen stabilisere sig på 12 til 17 tog pr. time pr. retning. Figur 6 viser hvordan betjeningsfrekvensen udvikler sig, hvis man kører denne driftsform i op til 8 timer.

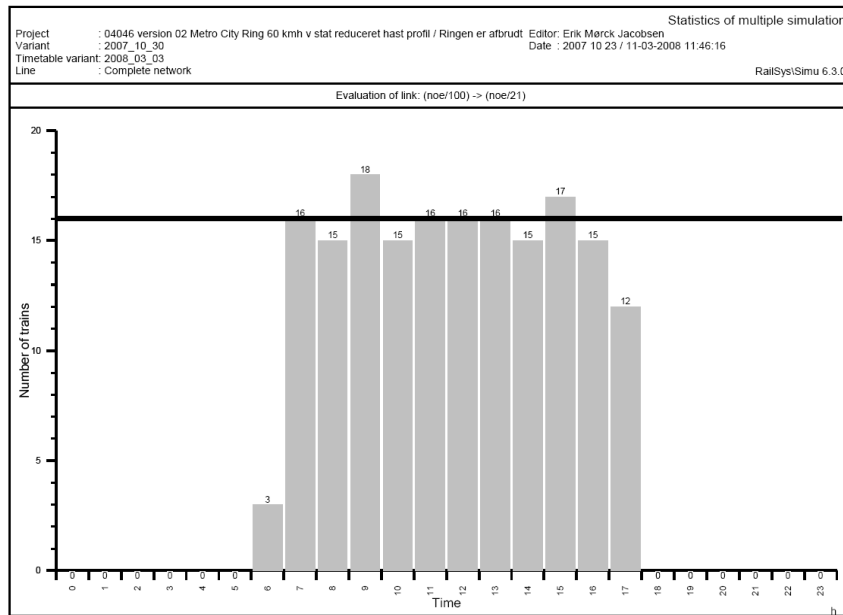


Figur 6 Trafikafvikling ved forlængede opholdstider på tre centrale stationer Nørrebro station betjenes af 12 til 17 tog pr. time

Eksemplet på figur 6 viser, at betjeningsfrekvensen bliver nedsat, men trafikafviklingen er forholdsvis stabil, selv om opholdstiderne bliver forlænget. Dette illustrerer en situation, hvor den samme forstyrrelse optræder i begge retninger.

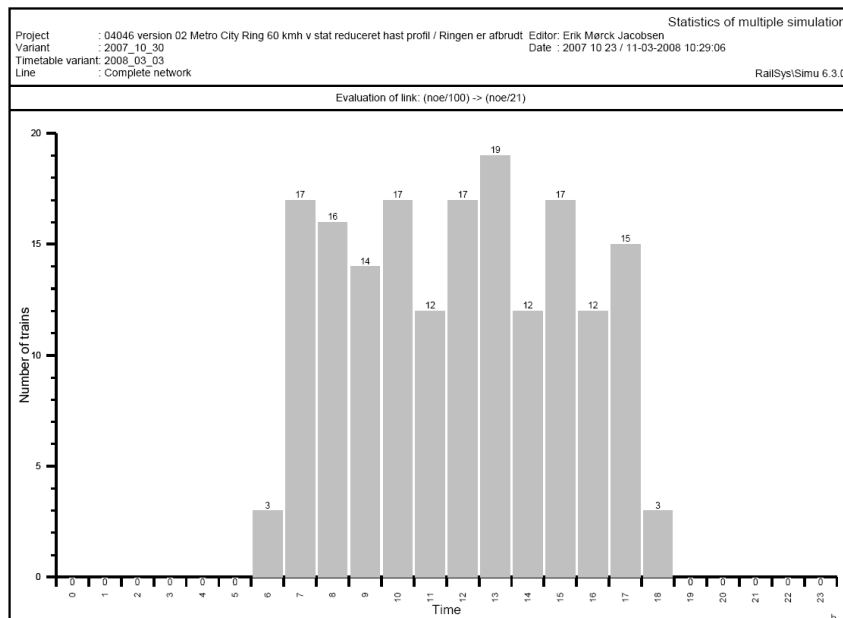
I nogle tilfælde vil forstyrrelserne kun ramme den ene retning, hvilket vil medføre, at de **to ringe vil komme ud af fase**. I sådanne situationer kan der opstå problemer på grund af pendullinjen (M4), som kobler de to ringe sammen. Se figur 1.

I eksemplet er køretiden rundt i cirklen 3 x 20 sekunder (= 1 minut) længere i den ene retning end i den anden retning. Simulationer af den driftsform i RailSys viser at betjeningsfrekvensen stabiliserer sig på 16 tog pr. time. Se figur 7.



Figur 7 Trafikafvikling ved forlængede opholdstider i kun én retning Nørrebro station betjenes af ca. 16 tog pr time

På samme måde er det analyseret, hvordan et tog med 20 % reduceret køreegenskaber påvirker driften. Simulationerne viser, at Kontrolcentret i den situation bliver nødt til at gribe ind og tage toget ud af driften. Ellers bliver driften ustabil og togene danner kø bag ved det langsomme tog. Den ustabile situation illustreres på figur 8. Her varierer betjeningsfrekvensen alt efter, hvornår køen passerer stationen.



Figur 8 Trafikafvikling når der er et tog med 20 % reducerede køreegenskaber: Betjeningen af Nørrebro station er ustabil

3.4 Visualisering

En styrke ved de anvendte værktøjer er, at der er mulighed for at visualisere trafikken på tilsvarende form som trafikafviklingen visualiseres i fjernstyringscentraler, således at dokumentationen til bygherren udover statistiker og analyser kan ledsages af en film, som illustrerer problemstillingerne. I RailSys er det muligt at optage trafikafviklingen i avi-format, som kan afspilles i Windows Media Player.

4. Konklusion

Trafiksimuleringer af Cityringen giver mulighed for på et tidligt tidspunkt i projektet at afprøve og dokumentere konsekvenserne af forskellige løsninger, så det kan tilsikres, at de trafikale krav tilgodeses i det endelige system.

Trafiksimuleringerne giver ikke det endelige resultat, men analysen og dokumentationen af en række forskellige driftsformer giver et værdifuldt grundlag, som projekt og bygherre kan vælge ud fra.

Disse analyser viser, at betjeningsfrekvensen er robust overfor forhold, hvor systemet påvirker alle tog på den samme måde: Længere opholdstider, hastighedsrestriktioner etc. i disse tilfælde vil togfølgen og dermed betjeningsfrekvensen finde et nyt niveau.

Trods den stabile trafikafvikling i en række scenarier kan der opstå andre situationer, hvor trafikafviklingen bliver ustabil. Det gælder det undersøgte scenario, hvor et togsæts køreegenskaber afviger fra de øvrige togs. I sådanne tilfælde skal Kontrolcentret gribe ind og tage det fejlramte tog ud af drift hurtigst muligt, da trafikafviklingen i modsat fald bliver ustabil.

5. Referencer

- [1] Kaas, A.H., Methods to calculate capacity of railways, *PhD. thesis at Department of Planning, Technical University of Denmark*, 1998 (in Danish).
- [2] Kaas, A.H., Punctuality model for railways. *Proc. of the 7th International conference on Computers in Railways*, eds. J. Allan, R.J. Hill, C.A. Brebbia, G. Sciutto & S. Sone, pp. 853-860, 2000
- [3] Kaas, A.H. & Goossmann, R., Implementation of the Timetable Planning System STRAX/TPS in Denmark. *Proc. of the 9th International conference on Computers in railways*, eds. J. Allan, C.A. Brebbia, R.J. Hill, G. Sciutto & S. Sone, pp. 93-102, 2004
- [4] Landex, A. & Kaas, A.H., Planning the most suitable travel speed for high frequency railway lines. *Proc. of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, eds. I.A. Hansen, F.M.Dekking, R.M.P. Goverde, B. Hindergott, L.E. Meester, The Netherlands, 2005
- [5] Kaas, A.H. & Wellendorf, N., Infrastrukturforbedringer på S-banen. *Trafikdage 2006*.