

Nyt og gammelt i kollektivtrafikken: *rapid rail, light rail* og busser

Hans Brems

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

SUMMARY: Growing concerns about environment, energy, and traffic congestion demand a fresh look at mass transit, especially nonpolluting, low-noise, low-energy, high-speed electric rail transit. The article develops an algebraic framework tailored to U.S. Department of Transportation data and examines cost and productivity of rapid rail, light rail, and buses.

Personbilen kører når det passer dens ejer. Den kører dør til dør – eller i alt fald dør til parkeringsplads. I disse to henseender kan intet kollektivt trafikmiddel konkurrere med den, og derfor faldt i USA passagerantallet pr. år i kollektiv bytrafik til $\frac{1}{5}$ i de 50 år fra 1923 til 1973.

Som vi bliver flere og flere her på jorden synes vi at klumpe os mere og mere sammen i storbyer, medens steder som Vendsyssel, Hveen, Norrland, Østbayern, Bretagne, Hebriderne og Appalachia affolkes. Og det er i storbyerne, at personbilen viser sig fra sin værste side. Økonomernes abstrakte *externalities* antager meget konkrete former i storbytrafikkens tidsspild, stress, ulykker, larm og luftforurening.

Bilisternes beslutninger om at bruge deres biler i storbyen kan påvirkes negativt: Enten mildt ved at internalisere bilismens eksterne omkostninger eller brutalt ved at spærre visse veje for biler. Det negative lader jeg ligge undtagen i

Denne artikel er en økonoms fritidsfunderinger over et problem, der foruden økonomens traditionelle ting som forbrugerpræferencer og teknik rummer moderne ting som externalities, miljø og energi. Forfatteren, der hverken er ingeniør eller har tilknytning til noget trafiksselskab, har kun skrabet overfladen men har ialtfald forsøgt at forme et begrebsapparat omkring de data, som det amerikanske trafikministerium nyligt har indsamlet og fremlagt, USDT (1976). Forfatteren takker dette ministerium, överingenjör Åke Nilsson (ASEA) og Mr. Dennis Mollenkamp (Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority) for beredvillig korrespondance og trykt materiale, Mr. Mollenkamp også for samtale og forevisning af anlægsarbejder i Atlanta i april 1977. Sin ven Erling Olsen takker forfatteren for gennemlæsning af manuskriptet. Sin ven dr.phil. Niels Hofman-Bang, Danmarks Tekniske Højskole, takker forfatteren for vejledning i dansk kemisk terminologi. Endelig takker han diskussionsdeltagere på Handelshøjskolens Institut for trafik-, turist- og beliggenhedsforskning, hvor han forelæste over manuskriptet i september 1977.

Nyt og gammelt i kollektivtrafikken: *rapid rail, light rail* og busser

Hans Brems

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

SUMMARY: Growing concerns about environment, energy, and traffic congestion demand a fresh look at mass transit, especially nonpolluting, low-noise, low-energy, high-speed electric rail transit. The article develops an algebraic framework tailored to U.S. Department of Transportation data and examines cost and productivity of rapid rail, light rail, and buses.

Personbilen kører når det passer dens ejer. Den kører dør til dør – eller i alt fald dør til parkeringsplads. I disse to henseender kan intet kollektivt trafikmiddel konkurrere med den, og derfor faldt i USA passagerantallet pr. år i kollektiv bytrafik til $\frac{1}{5}$ i de 50 år fra 1923 til 1973.

Som vi bliver flere og flere her på jorden synes vi at klumpe os mere og mere sammen i storbyer, medens steder som Vendsyssel, Hveen, Norrland, Østbayern, Bretagne, Hebriderne og Appalachia affolkes. Og det er i storbyerne, at personbilen viser sig fra sin værste side. Økonomernes abstrakte *externalities* antager meget konkrete former i storbytrafikkens tidsspild, stress, ulykker, larm og luftforurening.

Bilisternes beslutninger om at bruge deres biler i storbyen kan påvirkes negativt: Enten mildt ved at internalisere bilismens eksterne omkostninger eller brutalt ved at spærre visse veje for biler. Det negative lader jeg ligge undtagen i

Denne artikel er en økonoms fritidsfunderinger over et problem, der foruden økonomens traditionelle ting som forbrugerpræferencer og teknik rummer moderne ting som externalities, miljø og energi. Forfatteren, der hverken er ingeniør eller har tilknytning til noget trafiksselskab, har kun skrabet overfladen men har ialtfald forsøgt at forme et begrebsapparat omkring de data, som det amerikanske trafikministerium nyligt har indsamlet og fremlagt, USDT (1976). Forfatteren takker dette ministerium, överingenjör Åke Nilsson (ASEA) og Mr. Dennis Mollenkamp (Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority) for beredvillig korrespondance og trykt materiale, Mr. Mollenkamp også for samtale og forevisning af anlægsarbejder i Atlanta i april 1977. Sin ven Erling Olsen takker forfatteren for gennemlæsning af manuskriptet. Sin ven dr.phil. Niels Hofman-Bang, Danmarks Tekniske Højskole, takker forfatteren for vejledning i dansk kemisk terminologi. Endelig takker han diskussionsdeltagere på Handelshøjskolens Institut for trafik-, turist- og beliggenhedsforskning, hvor han forelæste over manuskriptet i september 1977.

afsnit II, 3 om reserverede motorvejskørebaner. Jeg holder mig til det positive: Kunne man påvirke bilisternes beslutninger ved at tilbyde dem noget bedre? Kunne man i vore dages teknik tilbyde dem et alternativ, som bragte dem hurtigere, sikrere og bekvemmere til byen, end deres egen bil kunne gøre? Kunne et sådant alternativ fås til en rimelig pris?

Det var ingen sag, hvis det bare drejede sig om at udforme et system, der gik til hvermands dør eller så godt som. Små hyppige busser på stærkt forgrenede rutenet kunne klare en sådan opgave.

Det var heller ingen sag, hvis det bare drejede sig om at udforme et system med høj kapacitet, høj hastighed og lavt energiforbrug. Lange, hurtige elektriske togstammer ad eget banelegeme og lange stationsintervaller kunne klare en sådan opgave.

Men det giver hovedpine, hvis det ikke drejer sig om et enten-eller men om et både-og. Hvad de små hyppige busser på deres stærkt forgrenede rutenet angår, så kommer de jo ingen vegne på stræk så lange som Brønshøj-Kongens Nytorv. Og når de så omsider allesammen når ind til centrum, mærker man for alvor deres larm og dunst. Hvad de lange hurtige elektriske togstammer angår, så kan de jo ikke føres til hvermands dør.

Eksisterer der i vore dages teknik et kompromis? Og kunne det fås til en rimelig pris? Lad os se lidt nærmere på to nye kompromisforsøg, der i amerikansk terminologi går under betegnelserne *rapid rail* og *light rail*.

I. Rapid rail

1. Princip

Rygraden i et *rapid rail*-system er svære elektriske jernbaner, hvis spor overalt er spærret for enhver anden trafik, kørende og gående. Den mest effektive afspærring opnås ved at føre sporet over eller under gadeniveau. Al ind- og udstigning sker på særligt indrettede stationer, hvis perroner ligger i nøjagtigt samme niveau som toggulvet. Stationsintervallerne er korte i centrum men lange i yderdistrikterne. De lange stationsintervaller giver høj rejsehastighed men gør det samtidigt umuligt for de fleste passagerer at komme *helt* hjem med toget. Hver station i yderdistrikterne er derfor centrum for et knippe stærkt forgrenede buslinjer. Med de korte stationsintervaller i centrum skulle man ikke behøve andre buslinjer end sådanne knipper, og centrum skulle derfor helt kunne slippe for bussers larm og dunst. Buslinjeknipperne er ligeså vigtige som rygraden. Det var fordi man glemte buslinjeknipperne, at San Franciscos *BART* kun har tiltrukket halvt så mange daglige passagerer (131.000) som ventet. Det nyeste nordamerikanske forsøg er Atlantas.

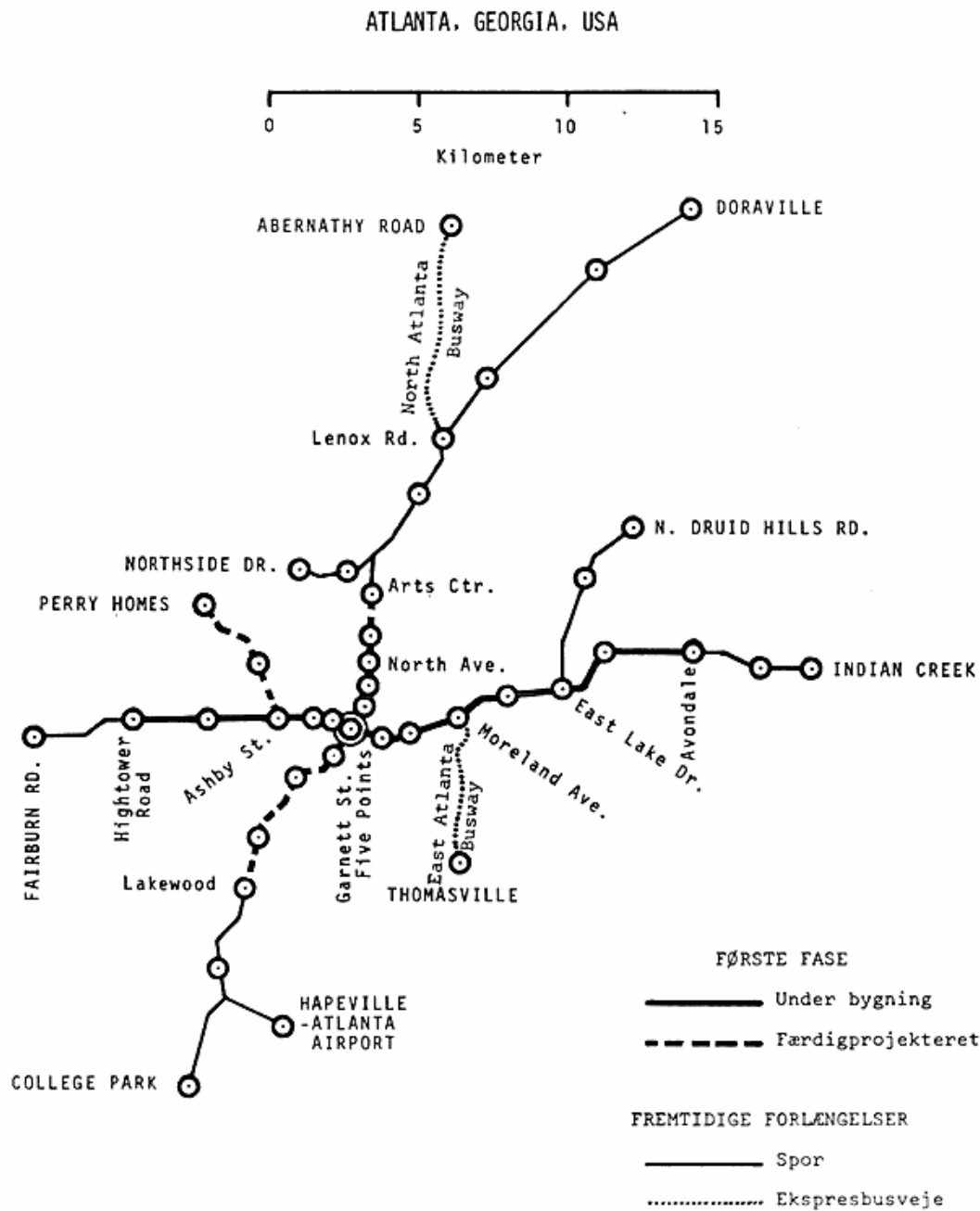
2. Atlanta.

Akkurat som i 1864, da den ødelagdes, er Atlanta i dag (1,4 mill.) sydens industrielle, finansielle og kommercielle centrum. Omkring sig har den den sædvanlige motorvejscirkel med et par diagonaler gennem centrum. Den har ingen sporveje men et stort busnet. I 1971 underskrev daværende guvernør Jimmy Carter en lov, som hjemlede opkrævning af en 1 pct. omsætningskat til finansiering af et splinternyt kollektivtrafiksystem kaldet *MARTA* = Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority. Derpå fulgte høringer og folkeafstemninger i fire amter. To amter stemte nej, men de to centrale amter stemte ja, og i februar 1975 gik man i gang med at grave og bygge 85 km hurtigbanespor, at hvilket 19 pct. skal være under gadeniveau, 31 pct. over gadeniveau og 50 pct. i gadeniveau –men alt sammen som ren bane. Der skal bygges 39 stationer og anlægges parkeringspladser til 30.000 biler omkring dem. 2000 km buslinjer skal gradvist omlægges til knipper omkring stationer. Tavle 1 viser de korte stationsintervaller i centrum og de lange i yderdistrikterne. Sammenlignet med Atlanta har Stockholms tunnelbane længere stationsintervaller i centrum men løber her meget dybt. Derfor kan hver Stockholmsstation være udgangspunkt for et stort antal lange rullende trapper, hver i sin retning. Stockholms trappeudmundinger er derfor mere spredt end Atlantias.

Et Atlantatog skal have en tophastighed af 120 km pr. time mod 90 i Stockholm. Hver vogn vil tage 270 passagerer mod 156 i Stockholm – Atlanta vil have flere ståpladser pr. siddeplads end Stockholm. Et tog får fra 1 til 8 vogne, og der skal bygges 338 vogne. De leveres af Société Franco-Belge og er meget energibesparende: De kan bremse regenerativt, d.v.s. sende deres bremseenergi tilbage i nettet.

I 1978 åbnes østgrenen til Avondale, i 1979 vestgrenen og i 1980 nord-sydlinjen. Senere skal bygges 13 km ekspresbusvej, d.v.s. motorveje med reserverede busbaner i midterrabatten.

Dajani, Egan og McElroy (1975) har forsøgt cost-benefit-analyse af *MARTA*. For et stort publikum vil *MARTA* spare tid i forhold til motorvejskørsel. Og for dem, der bliver på motorvejene, bliver der mindre trængsel. *MARTA* vil tiltrække en anelse flere passagerer fra mindre bemidlede zoner end fra mere bemidlede. Men denne virkning var svag sammenlignet med *MARTA's* tilbøjelighed til at tiltrække mange flere passagerer fra zoner nær stationer end fra zoner fjernt fra stationer. Der er altså en klar omfordeling af indkomst til gunst for familier nær stationer men ingen klar omfordeling af indkomst til gunst for mindre bemidlede.



TAVLE 1. Atlanta's rapid rail.

Såvidt benefit. Hvad cost angår, så er og bliver *rapid rail* en dyr spøg. Anlægsomkostningen er 24 millioner 1975-dollars pr. km. 80 pct. af anlægsomkostningen betales af forbundsregeringen i medfør af National Mass

Transportation Assistance Act af 1974, og det samme er tilfældet i Washington, D.C. (2,9 mill.) og Baltimore (2,1 mill.), der bygger *rapid rail*-systemer som Atlantias.

Rapid rail er det fine og helt dyre. Men tidens stemning har vendt sig mod offentlig ekstravagance og spørger, om mindre ikke kan gøre det. Resten, hovedparten, af denne artikel vil derfor koncentrere sig om *light rail* og ekspresbusser.

II. Light rail

1. Princip

Gadesporvognen hedder på britisk engelsk »tram« men på amerikansk engelsk »streetcar«. Da man nu ønsker at flytte den væk fra gaden, har det nye ord »light rail« vundet indpas i praktisk amerikansk litteratur som County of San Diego (1975), Port Authority of Allegheny County (1976), Greg Thompson (1975) og US Department of Transportation (USDOT) (1976).

Light rail er lette elektriske jernbaner (sporveje), hvis spor i varierende grad er spærret for anden trafik. USDOT (1976, 18) sonderer mellem tre afspærringsgrader:

- A. Eget banelegeme, spærret for enhver anden trafik.
- B. Eget sporareal med lejlighedsvist krydsende gadetrafik.
- C. Den gammeldags gadesporvej.

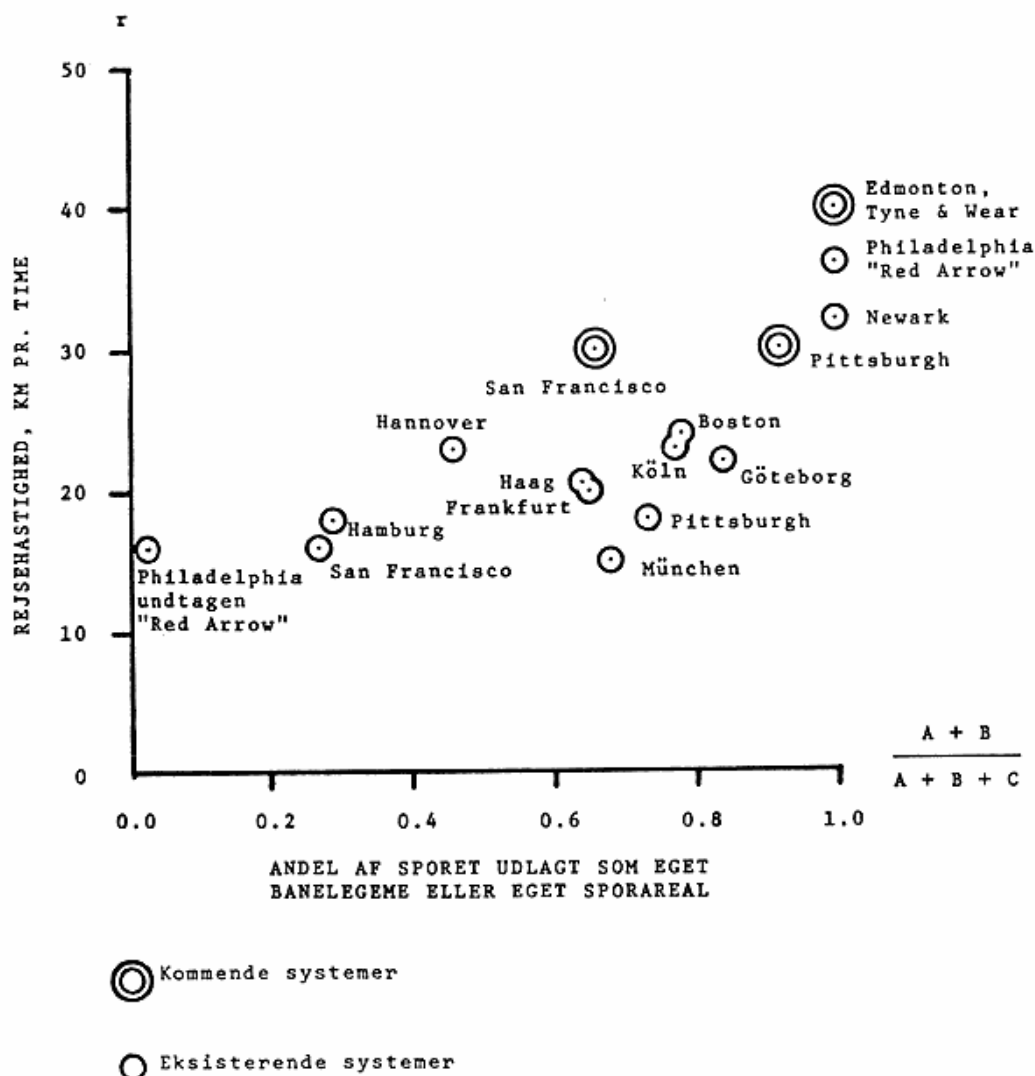
Tavle 2 viser, at blandingsforholdet mellem *A*, *B* og *C* vil afgøre, hvor høj rejsehastighed, der kan præsteres.

Blandt de eksisterende systemer i Tavle 2 møder Philadelphia (4,8 mill.) med gammeldags gadesporveje – som de københavnske – og med den laveste rejsehastighed 16 km i timen. San Francisco (3,1 mill.) er ikke bedre: Hvad der vindes i den lange tunnel under Twin Peaks går åbenbart tabt i Market Streets mylder. De moderne systemer i Boston (2,8 mill.), Göteborg (0,6 mill.) og Köln (0,9 mill.) repræsenterer den modsatte yderlighed. Blandt nybyggede systemer får hverken Edmonton (0,4 mill.), Philadelphia (4,8 mill.) eller Newcastle's Tyne and Wear (0,8 mill.) gadesporvej og opnår derved rejsehastigheder på 40 km pr. time.

2. Boston og Göteborg

Boston (2,8 mill.) og Göteborg (0,6 mill.) illustrerer *light rail*-princippet for henholdsvis store og mellemstore byer.

Under Tremont Street i Boston åbnedes i 1897 verdens første sporvejtunnel, og det er fristende at se den på københavnsk baggrund. En københav-



Data: USDT (1976, 19).

TAVLE 2. Rejsehastighed som funktion af den andel af sporet, der er udlagt som eget banelegeme eller eget sporareal.

ner vil lægge mærke til, at afstanden mellem tunnelens oprindelige yderstationer, Haymarket og Boylston, er nøjagtigt den samme som afstanden mellem Kongens Nytorv og Rådhuspladsen, $1\frac{1}{4}$ km. Tavle 3 viser Bostons tunnel-system, og tavle 4 projicerer det ind på et Københavnskort i samme målestok, således at Haymarket er lagt i Kongens Nytorv og Boylston i Rådhuspladsen.

I 1914 og 1932 forlængedes tunnelen 3 km mod vest til Kenmore (Nitivej), og lidt længere ude fører tre ramper tunnelsporene op på overfladen, hvor de forgrener sig til yderdistrikterne på eget banelegeme eller sporareal. Fristende ville det være at forbinde den nordvestligste rampe med København L. Faktisk bød der sig i 1950'erne en gunstig lejlighed til at købe en Farumbane, nemlig den 15 km lange nedlagte jernbanestrækning Kenmore-Riverside. Den købtes og åbnedes i 1959 for sporvejsdrift.

I 1941 forlængedes tunnelen $1\frac{1}{3}$ km til Symphony (Falkoner Alle). Rampen lidt længere ude kommer til at ligge nøjagtigt i S-banesporet Vanløse-Frederiksberg. Fristende ville det være at forvandle denne blindtarm til en skinnekorridor Vanløse-Rådhusplads.

Før tiden fornyer Boston tunneler, spor og sporvogne.

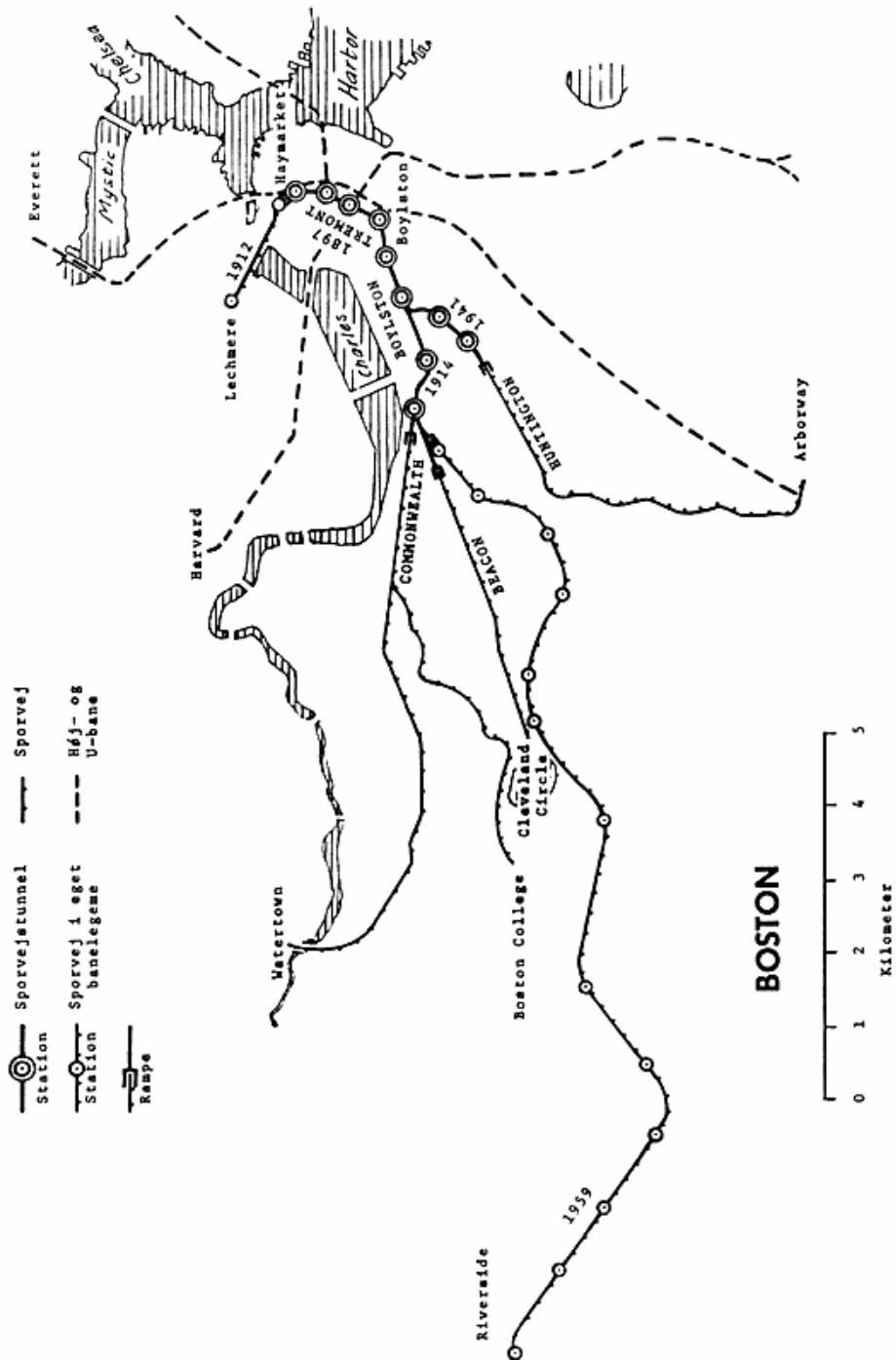
Göteborg har ingen tunnel men lukkede omkring 1970 byen indenfor voldene for gennemkørsel med biler og reserverede herved de to brede hovedfærdselsårer Västra og Östra Hamngatan for sporvogne. Fred, ro og frisk luft sænkede sig over bycentret. Nedlagte banestrækninger blev til linjerne til Tynnered og Storås. Ligesom Bostons Riversidelinje er Storåslinjen en ren jernbanestrækning befaret af PCC-sporvogne, der ikke er bygget specielt til dette brug. Alligevel opnår de på Storåslinjen en rejsehastighed af 48 km pr. time. Tavle 5 (tegnet efter Elmberg, 1976) viser sporvejsnettets fordeling på eget banelegeme (72 pct.) og reserveret og ikke-reserveret gadekørebane (28 pct.)

3. Kollektivtrafik på reserveret bane

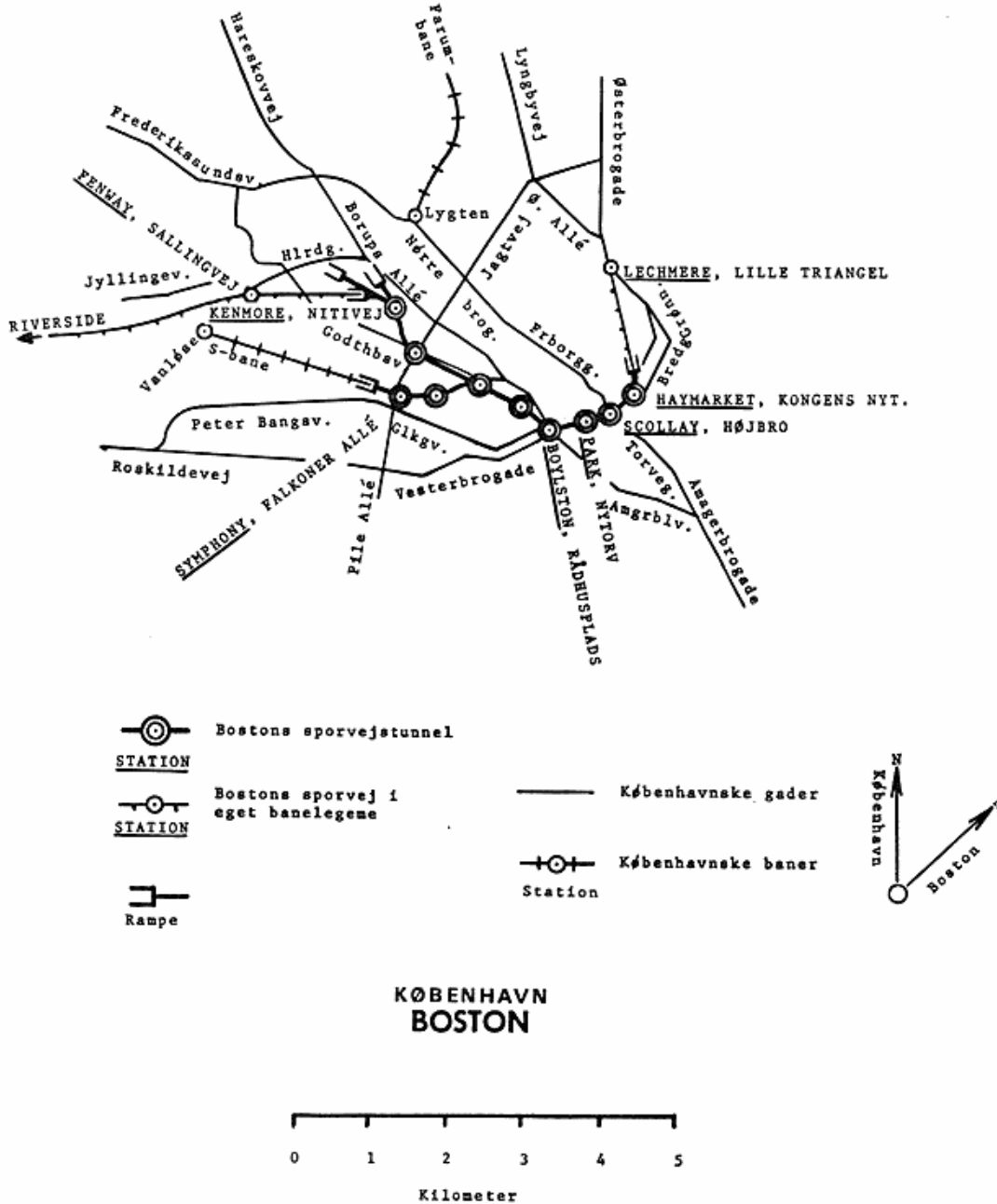
Ideen i *light rail* er altså så vidt muligt at adskille kollektivtrafik og anden trafik. Men skal kollektivtrafikken absolut køre på skinner?

Kunne busser ikke også køre i tunneler under de centrale bydele? Det kunne de, men ikke uden større tunneldiameter end nødvendig for et skinnebundet køretøj – sporvognens bundethed til sine skinner, der var dens svaghed i gadetrafikken, er dens styrke i tunneler. Dernæst kunne busser ikke køre i tunneler uden den larm og dunst i tunnelstationerne, sporvognene er fri for.

Derimod kunne busser nok akcepteres på ekspresbusveje i fri luft bygget specielt til dem og spærret for anden trafik, jvf. de to ekspresbusveje vist på tavle 1. Og hvis ekspresbusveje synes for ekstravagant, kunne man så ikke lade busser beføre de mangesporede motorveje, som allerede eksisterer og skærer sig tværs gennem de fleste amerikanske storbyer? Det kunne man, og det har man gjort. Boston, Denver, Honolulu, New Orleans, Los Angeles og San Francisco er gået et skridt videre og har reserveret en motorvejskørebane for busser.



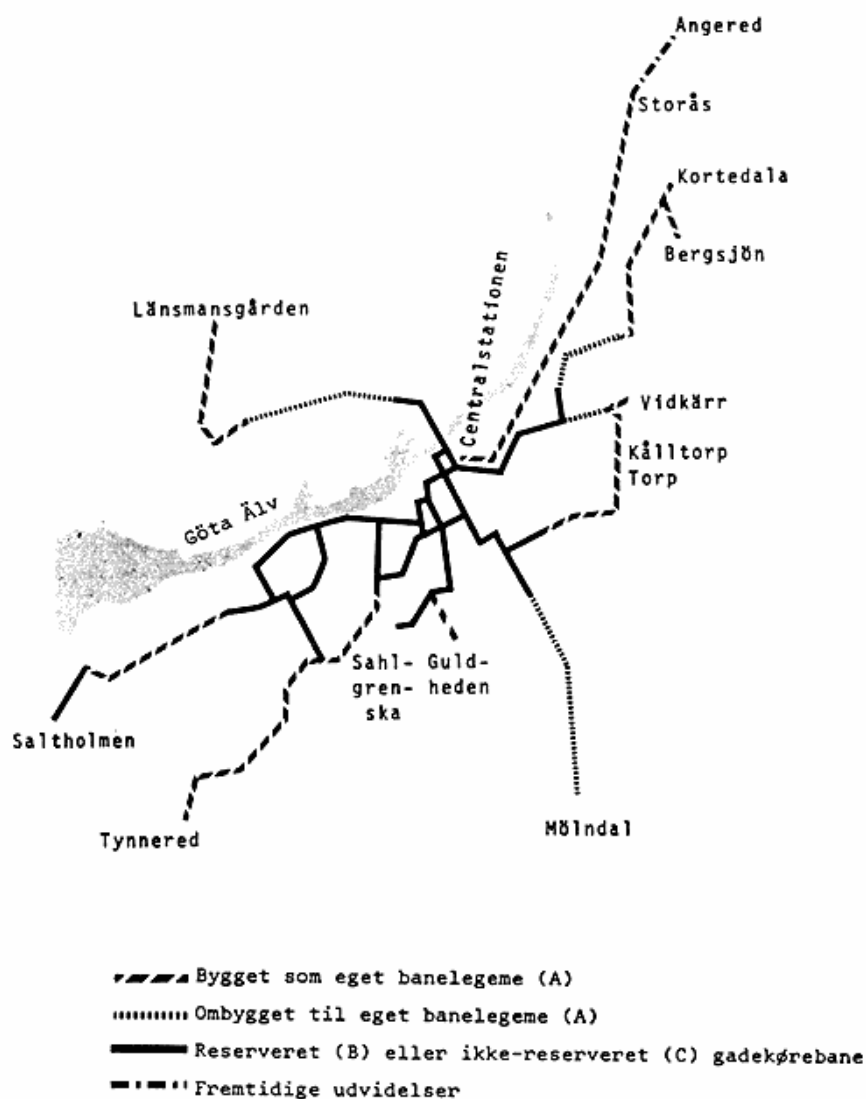
TAVLE 3. Boston's light rail.



TAVLE 4. Boston's light rail projiceret på København.

Hvilken del af en motorvej kan reserveres for busser? Åbenbart ikke den yderste højre kørebane, for den bruges jo også af til- og afgangstrafikken. Det må blive den yderste venstre kørebane, som reserveres for busser. Men så må

GÖTEBORGS SPORVEJE 1977



TAVLE 5. Göteborgs light rail

ind- og udstigning ske i midterrabbatten, og så må der bygges gangbroer eller trapper op eller ned til skærende gader. Når man er kommet så vidt, er det egentlig hip som hap om yderste venstre kørebane – eller midterrabbatten selv, hvis den er bred nok – reserveres for ekspresbusser eller for skinner. Chicagos Kennedy Expressway og Dan Ryan Expressway er eksempler på det sidste.

4. *Hvad er billigst: Ekspresbusser eller light rail?*

Med kollektivtrafik på reserveret bane letter et røgslør, som har hvilet over mange byers debat om, hvad der var billigst, busser eller sporvogne. Røgsløret var den regnskabskonvention, at da gadeomnibussen kørte på gader, der betjente hele trafikken, skulle bussen ikke belastes med gadernes anlægsomkostning. Da gadesporvejen alene betjente sporvognen, skulle denne belastes med sporets anlægsomkostning.

Hvad enten konventionen havde sin rimelighed eller ej for gadeomnibusens og gadesporvognens vedkommende, så er den uanvendelig på kollektivtrafik på reserveret bane.

Røgsløret er blæst bort: Ekspresbusser og *light rail* må belastes med deres reserverede baners anlægsomkostning og arbejder i denne forstand på lige fod. Hvilken af dem er så billigst? Lad os se på de enkelte omkostningselementer og regne alting i 1975-dollars.

5. *Anlægsomkostning*

I afsnit II, 1 definerede vi tre afspærringsgrader *A*, *B* og *C* og fandt at deres blandingsforhold ville bestemme rejsehastigheden. Det vil også bestemme anlægsomkostningerne. Målt i millioner 1975-dollars pr. km anslår USDT (1976, 53) anlægsomkostninger til banelegeme, stationer, spor, ledninger og signaler således:

A. Eget banelegeme	
1. i tunnel	25-44
2. delvist i gadeniveau	12-19
3. bestående af eksisterende jernbanespor	2-6
B. Eget sporareal i gadeniveau	9-19
C. Gadesporvej	2-6

Som ydertilfælde kan nævnes, at Buffalo (1,3 mill.) vil have en lang tunnel og regner med 20 millioner dollars pr. km, hvorimod Dayton (0,9 mill.) vil bruge allerede eksisterende jernbanespor og kun regner med 1 million dollars pr. km.

Såvidt *light rail*. Hvad ekspresbusser angår, så koster en kilometer storbymotorvej ca. 4 millioner dollars. Der kan ikke være tvivl om, at på egen bane er *light rail* normalt dyrere i anlæg end ekspresbusser.

6. *Anskaffelse af rullende materiel*

Der er i verdensmarkedet fire leverandører af rullende materiel til *light rail*-systemer: Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA), som for

tiden afleverer 100 vogne til Melbourne; Boeing-Vertol, der leverer 275 vogne til Boston og San Francisco; DüWag, som har leveret vogne til Frankfurt, Köln m.fl. og for tiden leverer til Edmonton og Newcastle; og endelig Ontario Transportation Development Corporation, der leverer 200 vogne til Toronto. Leveringspriserne ligger på omkring 3-400.000 1975-dollars pr. vogn.

Dette er fire gange dyrere end busser. Men for det første har busser kun den halve pladskapacitet og for det andet kun den halve levetid. County of San Diego (1975, 127 og 139) regner med følgende levetider:

Busser	15 år
Light rail	30 år

og kalder endda de 15 år for »a desirable bus age« men de 30 år »minimum 30 year lives«. For det tredje har busser lavere rejsehastighed, som vi skal se i afsnit 10. Endelig er busser mindre miljøvenlige. County of San Diego (1975, 81-84) anslår, at ASEA-, Boeing- og Ontariovogne har samme ydre støjniveau som det i Californien maksimalt tilladelige for personbiler, hvilket er langt lavere end det maksimalt tilladelige for busser. For Ontariovognens vedkommende skulle den ydre støj være $\frac{1}{4}$ af støjen fra 30'ernes PCC-model – der var støjsvag sammenlignet med københavnske vogne bygget på samme tid.

7. Kørsels- og vedligeholdelsesomkostning

Kørselsomkostningens hovedelementer er energi og arbejds løn. Hvad energi angår, så har oliekrisen efter 1973 ført en principiel forskel mellem bus- og sporvejsdrift frem i rampelyset: Medens en bus må slæbe sin egen energikilde med sig, mades en sporgogn fra en central energikilde, der nyder tre økonomiske fordele. For det første er den centrale energikilde naturligvis større og nyder derfor skalafordele. For det andet er den mindre kræsen: Busser kan kun brænde olie, men den centrale energikilde kan fremstille elektricitet af olie, kul, vandkraft og atomenergi. Atomelektricitet har hidtil kun kostet det halve af olieelektricitet, og en formeringsreaktor skulle kunne levere elektricitet til tredjedelen. For det tredje kommer noget af den energi, hvormed sporgogne mades, tilbage: Den centrale energikilde tillader vognene at sende bremseenergi tilbage i nettet. En bremsende bus omsætter bevægelsesenergi til varme, der går til spilde.

Vedligeholdelsesomkostningen for det rullende materiel er vask, smøring og værkstedsarbejde. For 6 eksisterende amerikanske sporvejssystemer og for sine egne busser fandt County of San Diego (1975, 142) følgende kørsels- og vedligeholdelsesomkostninger for rullende materiel i 1974 dollars pr. vognkm:

	Kørsel	Vedligeholdelse
Busser	0,52	0,11
Light rail	0,47	0,30

Når kørselsomkostningen pr. vognkm hidtil har været omtrent den samme for bus og *light rail*, så må den pr. pladskm have været lavest for det køretøj, der har flest pladser pr. vogn. Hvis arbejds løn i dollars pr. time er den samme, bliver arbejds løn i dollars pr. vognkm lavest for det køretøj, der har højest rejsehastighed. Pr. vognkm har kørselsomkostningen forøvrigt også været nogenlunde den samme i USA og Vesteuropa. Vesteuropa har lidt dyrere energi men lidt lavere arbejds løn, USDT (1976, 53).

I tre henseender er en vognkm for ekspresbusser forskellig fra en vognkm for *light rail*. Lidt elementær trafik algebra vil vise dette.

8. Lidt elementær trafik algebra

Lad os definere følgende begreber for en trafiklinje:

a = linjelængde, km

f = kørselsfrekvens = antal tog, der påbegynder en heltur pr. time

K = linjekapacitet = pladskm pr. time

k = vognkapacitet = pladser pr. vogn

n = antal tog i drift

p = terminalpause, timer

r = rejsehastighed, km pr. time

T = et togs tidsforbrug fra en påbegyndt heltur til den næste, timer

t = rejsetid fra terminal til terminal, timer

τ = terminalpausen udtrykt som en brøk af rejsetiden, rent tal

v = toglængde = antal vogne pr. tog

Lad os begynde med at skrive linjens trafikudbud som

$$K = 2afkv \quad (1)$$

eller på almindeligt dansk: Pladskm pr. time er lig halvture pr. heltur *gange* km *gange* antal tog pr. time *gange* pladser pr. vogn *gange* vogne pr. tog. Dimensionen er altså den samme på begge sider af identitetstegnet. Men linjelængde må være lig rejsehastighed *gange* rejsetid:

$$a = rt \quad (2)$$

Og når T er et togs tidsforbrug pr. heltur, så må $1/T$ være det antal halvture, toget kan påbegynde pr. time. Og så må n/T være det antal helture, n tog

kan påbegynde pr. time. Men dette er jo definitionen på kørselsfrekvens. Altså er

$$f = n/T \quad (3)$$

Fremdeles må et togs tidsforbrug fra påbegyndt heltur til næste være lig det dobbelte af rejsetid *plus* terminalpause:

$$T = 2(t+p) \quad (4)$$

Endelig vil det være naturligt at gøre terminalpausen proportional med rejsetiden:

$$p = \tau t \quad (5)$$

Indsætter vi nu (5) i (4), (4) i (3), og (2) og (3) i (1), får vi trafikudbudet udtrykt i en form, som viser os de finere nuancer:

$$K = knrv/(1 + \tau) \quad (6)$$

Ligning (6) måler linjens trafikudbud K i det for en økonom naturlige mål: pladskm pr. time. Men hvis man vil sammenligne linjer af forskellig længde, vil man eliminere linjelængden a ved at dividere med den på begge sider af (6) og derved få pladskm pr. time pr. km eller simpelthen pladsafgange i begge retninger pr. time.

$$K/a = knrv/[(1 + \tau)a] \quad (7)$$

Ligning (7) er skræddersyet til USDT (1976) data. Nu kan vi vise, at i tre henseender er en vognkm for ekspresbusser forskellig fra en vognkm for *light rail*.

9. Vognkapaciteten k

For det første er en vognkm ikke det samme som en pladskm. Vælger vi at tildele hver passager 0,46 m² (5 kvadratfod) gulvplads, får vi følgende vognkapaciteter:

	<i>k</i>
<i>Ekspresbusser</i>	
Normal amerikansk G. M. bybus	67
M. A. N. ledbus	87
<i>Light rail</i>	
Boeing-Vertol	115

Vognkapaciteten *k* er altså for den normale bybus 58 pct. og for ledbussen 76 pct. af Boeing-Vertol-vognens.

10. *Rejsehastigheden r*

For det andet er en vognkm ikke det samme som vognkm pr. time: Rejsehastigheden *r* er mindre for ekspresbusser. Forskellen ligger ikke i tophastighed men i bussernes ringere akcelera-tions- og bremseevne. Projekterede rejsehastigheder er, USDT (1976, 58-59):

	<i>r</i>
<i>Ekspresbusser</i>	
Pittsburgh, South Hills	10-35
<i>Light rail</i>	
Pittsburgh, South Hills	26-35
Buffalo	43
Denver	34-56
Los Angeles	50-62

11. *Toglængden v*

For det tredje er en vognkm ikke det samme som en togkm: Toglængden *v* er mindre for ekspresbusser, nemlig 1. Sammenkoblingen af flere vogne til et tog har en vigtig konsekvens for kørselsomkostningen. Kørselsomkostningens hovedelementer er energi og arbejds-løn, og sammenkoblingen sparer naturligvis ikke energi: Et trevognstog bruger tre gange så megen energi som et énvognstog. Men trevognstoget og énvognstoget har begge kun én fører, og trevognstogets førerløn pr. vognkm er derfor kun en tredjedel af énvognstogets.

12. *Sammenfatning: Teori*

Lad os sammenfatte. Hvad trafikudbud angår, så bør det ikke måles i vognkm. Vi foreslår at måle det i pladsafgange i begge retninger pr. time *K/a*. Med samme terminalpausebrøk τ viser vor ligning (7), at med samme antal vogne i drift *nv* vil ekspresbusserne have færre pladsafgange i begge retninger pr. time *K/a* end *light rail*, både fordi de har lavere vognkapacitet *k* og lavere rejsehastighed *r* end *light rail*.

Hvad omkostninger angår, så har kørselsomkostning pr. vognkm hidtil været omtrent den samme for bus og *light rail*. Pr. pladskm er den derfor lavest for *light rail*, der har flest pladser pr. vogn. Med samme arbejds løn i dollars pr. time bliver arbejds løn i dollars pr. vognkm lavest for *light rail*, der har højest rejsehastighed. Busser kan ikke ved sammenkobling af vogne sænke deres arbejds løn pr. vognkm eller ved overgang til atomenergi sænke deres energi omkostning pr. vognkm.

13. Sammenfatning: Praksis

For at eliminere alle andre indflydelser end trafikarten lod Port Authority of Allegheny County (1976) samme korridor, South Hills korridoren i Pittsburgh, projektere for fire forskellige trafikarter, deriblandt ekspresbusser og *light rail*. Begge projekter omfattede et komplet system bestående af den $12\frac{1}{2}$ km lange korridor med 26 stationer plus de nødvendige fødelinjer. Fødelinjerne betjentes i begge projekter af normale amerikanske General Motors bybusser. Selve korridoren betjentes af ekspresbusser eller tog. Ekspresbusserne var enten normale amerikanske G. M. bybusser eller ledbusser bygget af Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg (M. A. N.). I begge tilfælde bestod en bus af én vogn ($v = 1$) med afgang hvert 30. sekund ($f = 120$). Togene bestod af 3 Boeing-Vertol-vogne ($v = 3$) med afgang hvert 90. sekund ($f = 40$). De to projekter specificerede altså ikke samme antal vogne i drift nv men derimod samme antal vognafgange i én retning pr. time $fv = 120$.

Resultatet heraf måtte blive, at der på ekspresbuslinjen med den lavere rejsehastighed r skulle bruges flere vogne nv og at der med den lavere vognkapacitet k måtte blive færre pladsafgange i begge retninger pr. time K/a . Det blev der også. Dog målte Pittsburghprojektet ikke trafikudbudet som antal pladsafgange i begge retninger pr. time K/a men som det halve deraf: Antal pladsafgange i én retning pr. time $K/(2a)$, som ifølge vor ligning (1) er lig fkv . Grunden har måske været, at på radiallinjer som South Hills-korridoren vil antallet af fyldte pladser nå maksimum i én retning samtidigt med minimum i den modsatte. Kun pladsafgange i den ene retning har altså interesse.

Man fandt:

	f	k	v	Pladsafgange i én retning pr. time $K/(2a) = fkv$
<i>Ekspresbusser</i>				
Normal amerikansk G. M. bybus	120	67	1	8.040
M. A. N. ledbus	120	87	1	10.440
<i>Light rail</i>				
Boeing-Vertol	40	115	3	13.800

Såvidt trafikudbudet. Hvad omkostninger angår, målte man kapitaludgift og årsomkostning. Kapitaludgiften var anlægs- og anskaffelsesomkostning. Den målte i millioner 1975-dollars pr. linjekm og var:

	Anlæg	Rullende materiel	Kapitaludgift
<i>Ekspresbusser</i>	6,43	4,46	10,89
<i>Light rail</i>	7,92	5,92	13,84

Årsomkostningen var et typisk driftsårs omkostninger til energi, arbejds-løn til kørende personale, vedligeholdelse af anlæg, vedligeholdelse af rullende materiel, administration og generalomkostninger. Årsomkostningen måltes både i 1985-dollars pr. vognkm og i 1985-dollars pr. personkm og var:

	Pr. vognkm	Pr. personkm
<i>Ekspresbusser</i>	1,029	0,063
<i>Light rail</i>	1,030	0,058

Årsomkostningen pr. personkm var altså en anelse højere for ekspresbusserne, men der var store forskelle i summens komponenter. Pr. personkm var ekspresbussernes vedligeholdelsesomkostning til anlæg kun en tredjedel af *light rail*, deres energiomkostning omtrent den samme, deres administration og generalomkostninger knapt den dobbelte, deres vedligeholdelsesomkostning til rullende materiel knapt den dobbelte, og deres arbejds-løn til kørende personale godt den dobbelte.

Vi kan sammenfatte Pittsburghprojektets produktivitets- og omkostningsmålinger således: *Med 27 pct. højere kapitaludgift, med samme årsomkostning pr. vognkm, med en anelse lavere årsomkostning pr. personkm, med højere rejsehastighed r og derfor færre vogne i drift nu men med samme antal vognafgange i én retning pr. time fv , præsterede light rail 32 pct. flere pladsafgange i én retning pr. time $K/(2a) = fkv$ end ledbusser og 72 pct. flere end normale amerikanske bybusser.*

14. Jantzens tekniklov

Jantzen (1924) ville have udtrykt sagen på den måde, at ekspresbusser er en lidt »lavere« teknik end *light rail*. Jantzen ville have tegnet summen af faste og variable stykomkostninger som funktion af trafikudbudet K/a og fundet den værdi af K/a , for hvilken summen var den samme for ekspresbusser og *light rail*. Denne værdi ville han have kaldt et indifferenspunkt. Til venstre for punktet ville *light rail* have et handicap i sine højere faste omkostninger, og ekspresbusser ville arbejde billigst. Til højre for punktet ville ekspresbusser

have et handicap i sine højere variable omkostninger – den høje arbejds løn – og *light rail* ville arbejde billigst. County of San Diego (1975, 89) antyder et indifferenspunkt ved 1500-2000 passagerer pr. time.

Vi kan lege lidt med vort indifferenspunkt. Overgang til atomenergi ville flytte det mod venstre. Højere relativ arbejds løn og højere relativ oliepris ville gøre det samme. *Light rail* kunne nu blive billigst ved et lavere trafikudbud K/a .

Øget miljøbevidsthed ville sænke tolerancen af bussers larm og carbonmonoxid, carbonhydrider og nitrogenoxider. Dette ville ikke kunne flytte indifferenspunktet men ville kunne gøre *light rail* akseptabel et stykke til venstre for det.

I et kommende nummer af *Journal of Urban Economics* finder jeg et sådant indifferenspunkt.

15. Udbud og efterspørgsel

Indtil nu har vi kun interesseret os for trafikudbudet K/a og fablet om trevognstog afgående hvert 90. sekund. Men kan dets pladser fyldes? Kan udbudet finde sin efterspørgsel? Mere præcist: Hvor i storbyen kan udbudet finde sin efterspørgsel? Det må vel være i korridorer af typen Brønshøj-centrum, og sådanne korridorer er almindelige i europæiske og østamerikanske storbyer men mindre almindelige i vore sydvestlige byer, som er vokset op med personbilen og udviser en vældig spredning af ganske tynd bebyggelse men ikke udviser noget klart bycentrum. Los Angeles er et eksempel.

Der kan næppe være tvivl om, at storbytrafikken i den nærmere fremtid stadig vil bestå i en arbejdsdeling mellem individuel og kollektiv trafik. Og den kollektive trafik vil stadig bestå i en arbejdsdeling mellem *rapid rail*, *light rail* og busser. Men arbejdsdelingen vil forskyde sig bort fra personbiler og busser, jo mere miljø- og energihensyn spiller ind.

Litteratur

- County of San Diego, Public Works Agency, Department of Transportation. 1975. *Investigation of a Light Rail System for the San Diego Region*. San Diego, Calif.
- DAJANI, J., M. EGAN, og M. B. MC ELROY. 1975. The Redistributive Impact of the Atlanta Mass Transit System. *Southern Economic Journal*: 49-60.
- DUE, JOHN F. 1976. Urban Mass Transit Policy: A Review Article. *The Quarterly Review of Economics and Business* 16: 93-105.
- ELMBERG, CURT M. 1976. *Gothenburg Transport Developments* (mimeograferet). Göteborg.
- JANTZEN, IVAR. 1924. Voxende udbytte i industrien. *Nationaløkonomisk Tidsskrift* 62: 1-62.

have et handicap i sine højere variable omkostninger – den høje arbejds løn – og *light rail* ville arbejde billigst. County of San Diego (1975, 89) antyder et indifferenspunkt ved 1500-2000 passagerer pr. time.

Vi kan lege lidt med vort indifferenspunkt. Overgang til atomenergi ville flytte det mod venstre. Højere relativ arbejds løn og højere relativ oliepris ville gøre det samme. *Light rail* kunne nu blive billigst ved et lavere trafikudbud K/a .

Øget miljøbevidsthed ville sænke tolerancen af bussers larm og carbonmonoxid, carbonhydrider og nitrogenoxider. Dette ville ikke kunne flytte indifferenspunktet men ville kunne gøre *light rail* akseptabel et stykke til venstre for det.

I et kommende nummer af *Journal of Urban Economics* finder jeg et sådant indifferenspunkt.

15. Udbud og efterspørgsel

Indtil nu har vi kun interesseret os for trafikudbudet K/a og fablet om trevognstog afgående hvert 90. sekund. Men kan dets pladser fyldes? Kan udbudet finde sin efterspørgsel? Mere præcist: Hvor i storbyen kan udbudet finde sin efterspørgsel? Det må vel være i korridorer af typen Brønshøj-centrum, og sådanne korridorer er almindelige i europæiske og østamerikanske storbyer men mindre almindelige i vore sydvestlige byer, som er vokset op med personbilen og udviser en vældig spredning af ganske tynd bebyggelse men ikke udviser noget klart bycentrum. Los Angeles er et eksempel.

Der kan næppe være tvivl om, at storbytrafikken i den nærmere fremtid stadig vil bestå i en arbejdsdeling mellem individuel og kollektiv trafik. Og den kollektive trafik vil stadig bestå i en arbejdsdeling mellem *rapid rail*, *light rail* og busser. Men arbejdsdelingen vil forskyde sig bort fra personbiler og busser, jo mere miljø- og energihensyn spiller ind.

Litteratur

- County of San Diego, Public Works Agency, Department of Transportation. 1975. *Investigation of a Light Rail System for the San Diego Region*. San Diego, Calif.
- DAJANI, J., M. EGAN, og M. B. MC ELROY. 1975. The Redistributive Impact of the Atlanta Mass Transit System. *Southern Economic Journal*: 49-60.
- DUE, JOHN F. 1976. Urban Mass Transit Policy: A Review Article. *The Quarterly Review of Economics and Business* 16: 93-105.
- ELMBERG, CURT M. 1976. *Gothenburg Transport Developments* (mimeograferet). Göteborg.
- JANTZEN, IVAR. 1924. Voxende udbytte i industrien. *Nationaløkonomisk Tidsskrift* 62: 1-62.

- Port Authority of Allegheny County. 1976. *Comparative Analysis Study of Alternative Transit Systems: South Hills Corridor*. Allegheny County, Penn.
- SCIARRONE, GIUSEPPE. 1974. La realizzazione delle ferrovie metropolitane in fasi successive: l'esempio della Germania Federale. *Revue de la fédération internationale de l'automobile*, november-december: 65-86.
- THOMPSON, GREG. 1975. *Light Rapid Transit: A Description and Definition*. Vancouver, BC. US Department of Transportation (USDOT), Urban Mass Transportation Administration, hjulpet af DeLeuw, Cather & Co., Chicago, Ill. 1976. *Light Rail Transit, A State of the Art Review, Executive Summary*. Distribueres af National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22151, USA.