

# ANALYSE AF TRÆNGSEL OG HASTIGHEDER V.H.A. GPS-DATA

**Otto Anker Nielsen, Professor**

Centrer for Trafik og Transport (CTT), Danmarks Tekniske Universitet (DTU)

Bygning 115, st. tv. 2800 Lyngby, Denmark

Tlf.: +45 45 25 15 14 – Fax: +45 45 93 64 12 – E-mail: oan@ctt.dtu.dk

## 1. INTRODUCTION

Artiklen præsenterer forskning ved CTT i metoder til at analysere trængsel, trafikafvikling og hastighedsdata i vejnet baseret på data fra GPS-enheder installeret i biler. I forhold til traditionelle trafiktællinger og spoledata, giver data fra biler yderligere information, idet man får kontinuerte data over samlede ruter. Man undgår også tekniske problemer med fortolkning af spoledata, når trafikafviklingen er meget tæt og hastigheden lav (kødannelse). De udviklede metoder i artiklen er testet på data fra det Københavnske AKTA roadpricing eksperiment<sup>1</sup>, hvor 500 biler blev fulgt v.h.a. GPS over tre forsøgsrunder fordelt over en 2-årig periode (se Nielsen & Kristensen, 2003a). Forskningen i artiklen er gennemført i forbindelse med Trængselsprojektet for Trafikministeriet (se diverse artikler ved årets trafikdage, 2003), og eksamensprojekter ved CTT. Den tekniske del af artiklen (afsnit 2 og 3) bygger i vidt omfang på Nielsen & Kristensen (2003b)

### 1.1 Anvendte metoder, analyser og fremgangsmåder

Artiklen beskriver først en række tekniske spørgsmål og erfaringer med brug af GPS-teknikken, hvorefter den kort introducerer problemer med map-matching af GPS-data, dvs. fortolkning af hvilken sekvens af strækninger i et digitalt kort, som en given sekvens af GPS-punkter følger. I AKTA logges koordinater og hastighed hvert sekund. Men i en del tilfælde var der udfald (manglende log-data) eller unøjagtigheder i forhold til det digitale kort. Derudover er der en række tilfælde, hvor centerlinien for en vej i digitale kort, hvor bilen ikke har kørt, ligger tættere på log-punktet, end centerlinien for den vej, hvor bilen kørte (f.eks. ved ramper og broer over motorveje, sideveje til brede trafikveje, etc.).

Derefter beskrives bearbejdningen af data til egentlige hastighedsobservationer, og opbygningen af en datamodel til bearbejdning af det meget omfattende datamateriale i AKTA. Herunder beskrivelse af AKTA-data's dækningsgrad i Hovedstadsområdet.

Endelig foretages en række analyser af hastighedsfordelinger i forhold til vejtyper, det digitale korts hastighedsdata, trængsel (kødannelse i myldretiden), m.v.

---

<sup>1</sup> AKTA (<http://www.akta-kbh.dk/>) er den Danske del af EU-projektet PROGRESS ([www.progress-project.org](http://www.progress-project.org/)), som igen er en del af EU's 5. rammeprogram, "The Growth Programme on Sustainable Mobility and Intermodality", der støtter en række projekter vedr. road pricing (<http://www.transport-pricing.net/>). PROGRESS omfatter 8 Europæiske byer, der på forskellig vis tester konsekvenserne af forskellige typer vejafgiftssystemer i byområder. Det drejer sig om Bristol og Edinburgh (UK), Genova og Rom (I), Helsinki (SF), Trondheim (N), Göteborg (S) og København. AKTA forløber over 3½ år med et samlet budget på omkring 14 Mio. kr.

## 1.2 Det empiriske grundlag

Arbejdet er som nævnt testet på AKTA GPS-data. Map-matchningen blev gennemført på et detaljeret digitalt kort (KRAKS geodatabase), som indeholdt 350.000 vejstrækninger. Vejene var klassificeret i 25 typer (fra motorvej til indkørsler og grusveje), og inkluderede variabler om længde, fri køretid, ekstra køretid som følge af trængsel i forskellige tidsintervaller over døgnet, og road pricing (for den del af eksperimentet, hvor deltagerne kørte med roadpricing).

Hver bil kørte mellem 250 og 1.000 ture gennem eksperimentet, og 500 biler gennemførte eksperimentet. Deltagerne blev valgt efter et faktorielt design baseret på indkomst og pendlingsmønster (mellem forskellige dele af Hovedstadsområdet). Med 500 biler, der i gennemsnit kørte 4 måneder, kan det indsamlede data sammenlignes med 1 bil over 2.000 måneder eller ca. 160 år. Positionsdata blev gemt hvert sekund i GPS enheden og senere overført til forskningsdatabasen. Dette meget omfattende datasæt giver en god mulighed for at evaluere pålideligheden af GPS under et realistisk miljø for GPS-baseret road pricing.

Data blev indsamlet af en række forskellige biltyper inden for Hovedstadsområdet (2.654 km<sup>2</sup>), hvoraf betalingssystemet dækkede den indre del (368 km<sup>2</sup>). Det samlede areal med et rimeligt antal observationer inkluderer Sjælland (samlet areal 9.312 km<sup>2</sup>). Men map-matching blev i princippet gennemført i hele Danmark. **Figur 1** viser et eksempel på en deltagers kørselsmønster i betalingsområdet.



**Figur 1** Eksempel på et turmønster for én deltager i kontrolperioden (perioden uden road pricing). Figuren dækker tilnærmelsesvist betalingsområdet. De sorte linier viser kørte ruter og de blå cirkler turformål/aktiviteter. Det resterende trafiknet er vist med farver for forskellige vejtyper, fra grøn (trafikdæmpet trafikvej), gul (trafikvej), rød (regional vej), mørkerød (national vej) og grå (motorvej). Deltageren har næsten benyttet samtlige motorveje (hvilket er meget typisk for deltagerne). Og flere andre veje såvel.

## 1.3 Resultater

Artiklen viser, at det er muligt at benytte GPS-data fra biler til analyser af trafikafvikling, hastigheder i trafiknet og trængsel. Med den givne flåde af 500 biler var det muligt at få et ganske godt overblik over trafikafviklingen på det overordnede trafikvejnet i Hovedstadsområdet (svarende til samme aggregeringsniveau, som f.eks. Ørestadstrafikmodellen). Herunder var det muligt at lokalisere flaskehalse og lokaliteter med kødannelse, som måske overses ud fra et mindre antal snittællinger. For overordnede planmyndigheder i Hovedstadsområdet giver brugen af GPS-data mulighed for at få et overblik over afviklingen af vejtrafik, der måske er en mere økonomisk overkommelig metode, end andre dataindsamlingsteknikker. I trængselsprojektet var det f.eks. kun budgetmæssigt muligt at sammenligne og benytte spoledata fra Kbh.'s Kommune og Vejdirektoratet, og nogle få gennemkørsler med traditionelle målebiler. Mens det var vanskeligt at få adgang til sammenlignelige hastighedsdata fra de øvrige 4 amtskommunale vejforvaltninger og mange Kommuner.

## 2. GENNEMFØRELSE AF EKSPERIMENTET

Da der ikke eksisterede standard udstyr, der opfyldte forsøgets behov, blev der her udviklet specielle enheder (On Board Units, OBU) til registrering af koordinater og takstniveauer baseret på GPS-teknologi. Da det er velkendt, at nyt teknisk udstyr kræver grundig afprøvning, blev det besluttet at minimere kompleksiteten i kravene til udstyret mest muligt (kravspecifikationen). De grundlæggende krav ([www.akta-kbh.dk](http://www.akta-kbh.dk)) var, at enheden:

*er i stand til at gemme bilens position hvert sekund med en præcision på 5 meter. Baseret herpå skulle taximetret kunne vise den korrekte kørselsomkostning (vejafgift) i det pågældende områdes. Samt være i stand til at kompensere for fejl i GPS-modtagelsen uden at chaufføren ville opdage, at der er fejl, og uden at beregningen af betaling blev højere end den burde. Udstyret skulle også være billigt og let at installere.*

Det blev overvejet i hvilket omfang det skulle være muligt for chaufføren at identificere sig selv til udstyret, idet de fleste biler har flere brugere. Men denne facilitet blev droppet, idet det blev vurderet, at deltagerne ofte ville glemme den manuelle proces det er at identificere sig selv. Det blev også overvejet at benytte mobiltelefoneteknik til at overføre data kontinuert til en central server. Men denne idé blev droppet p.g.a. den ekstra kompleksitet og omkostning derved. Sammenlignet med tilsvarende forsøg i AKTA er dette nok en fordel, idet den danske enhed starter langt hurtigere (ca. 10 gange), hvorved der ikke mistes data i starten af turene. Ligesom belastningen af bilens batteri blev mindre (hvorved problemer med flade batterier blev reduceret).

### 2.1 Installering

Installeringen af udstyret blev gennemført af en virksom, der var specialiseret i installation af mobiludstyr og GPS baseret navigations udstyr. Taximetrene blev konfigureret via en bærbar PC før installeringen, hvilket sikrede korrekt setup og let mulighed for at ændre forsøgsdesign. En normal installation var baseret på en intern GPS antenne. Undtagelser herfor var for biler med metal solfiltre i vinduer eller meget lodrette vinduer, hvor eksterne antenner måtte installeres. Det viste sig imidlertid, at omkring 10 % af bilerne havde særlige problemer med modtagelsen i de første forsøgsrunder. I den sidste runde blev det løst ved en ekstra test i forbindelse med installeringen af udstyret. Men for mere permanent GPS-installering anbefales en ekstern antenne, uanset at de fleste producenter hævder at interne er tilstrækkelige. Dette synes også at

være erfaringen fra de andre byer i PROGRESS, der baserer eksperimenter på GPS-teknik (Göteborg og Bristol<sup>2</sup>).

## 2.2 Data management

Al data blev gemt på et internt flash kort, så data kunne overføres til en PC simpelt ved at flytte flash kortet fra GPS-enheden (OBU'en) til PC'ens port. Denne simple teknik sparede store omkostninger, og viste sig effektiv sammenlignet med mobiltelefoni. Data blev bearbejdet med et program til et ASCII fil format, der derefter kunne importeres til Access og ArcGIS 8.2, hvor de detaljerede analyser blev gennemført.

## 2.3 Problemer med GPS-teknologien

GPS-modtagelse er kendt for at være følsom overfor det miljø, hvor enheden arbejder. Det var derfor forventet, at der kunne være situationer, hvor der ville være signalproblemer. Men det var også forventet, at sådanne situationer ville være af kort varighed. Nogle udfald af signaler allerede håndteres via design enhedens software<sup>3</sup>, så deltagerne i forsøget ikke opdagede småproblemer. Større problemer viste sig at være fordelt som vist i (**Tabel 1**).

Varighed af signal problem	Hyppeghed af årsag (vægtet med oplevet betydning)
Kort udfald (< 5min)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Satellit signal problemer (1)</li> <li>- Kørsel gennem tunneller (2)</li> <li>- Parkering i underjordiske garager (2)</li> <li>- Parkering i parkeringshuse (3)</li> <li>- Parkering under overdækning (3)</li> <li>- Kørsel ad veje mellem høje bygninger (4)</li> <li>- Kørsel ad veje under træer (4)</li> <li>- Boot tid for enheden (5)</li> <li>- Brug af mobiltelefoner nær GPS modtageren (5)</li> <li>- Modtage og starttid for enheden (6)</li> <li>- Mindre beregnings- og softwarefejl (7)</li> </ul>
Langt udfald og længerevarende problemer (> 5 min)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Installationsproblemer (1)</li> <li>- Enhed ude af drift (2)</li> <li>- Vejrlig (3)</li> <li>- Transport på færges (4)</li> </ul>

**Tabel 1** Vurdering af hyppighed og konsekvens af GPS-signal problemer.

Resultatet af disse problemer var oftest, at der ikke var nok satellitter til at fastlægge en position. Hver GPS-baseret observations nøjagtighed afhænger af antallet af satellitter inden for "sigt", kvaliteten af hvert signal (afhængigt af atmosfæriske forhold), og den retning satellitterne befinder sig i forhold til enheden (samt dens bevægelse). Problemer med modtagelsen var

<sup>2</sup> Det bemærkes, at disse byer havde andre leverandører af GPS-udstyr.

<sup>3</sup> Dette opfyldte dog først kravspecifikationen nogenlunde i 2. runde og fuldt ud i 3. runde af forsøget.

generelt værre end forventet<sup>4</sup>. Problemer med modtagelse af signaler resulterede i følgende:

- *Signaler kunne ikke modtages* (ingen registreret koordinat) p.g.a. for få satellitter inden for sigt. Omkring 90 % af alle ture mistede signaler i et vist omfang. Men de fleste ture kunne estimeres utvetydigt ved at analysere logfilerne. Hvis der f.eks. var et udfald langs en vejstrækning uden frakørselsmuligheder, kan turen genskabes ved simpel interpolation. Men omkring 3 % af turene havde udfald i et omfang, hvor turen – eller endog turkæder – ikke kunne genskabes utvetydigt.
- *Nøjagtigheden af koordinater* blev reduceret p.g.a. for få satellitter eller atmosfæriske forstyrrelser. Dette hændte langt mindre hyppigt end totalt udfald af signaler; Hvis der er tilstrækkeligt med satellitter til at estimere en position ser det ud til at GPS-enheden kan estimere punktet rimeligt præcist. Positionerne blev imidlertid en gang imellem en smule forkert estimeret, når bilerne kørte hurtigt gennem kurver - typisk ramper til motorveje og i rundkørsler. Men ruterne kunne her i de fleste tilfælde genskabes utvetydigt ved brug af en effektiv map-matching algoritme (se afsnit 3.1).
- *Segmentering i ture* blev nogle gange registreret forkert af enheden: Nogle ture blev segmenteret i del-ture p.g.a. signal udfald eller kraftige flaskehalse i vejnettet (dette skete nu yderst sjældent). Mens nogle ture med korte ærinder fejlagtigt blev samlet til én tur. Dette kunne skyldes kort tid for ærindet (f.eks. aflevering af børn i børnehave), eller p.g.a. en uheldig kombineret af et kort ærinde og udfald af signal. Segmenteringen af ture er problematisk for den efterfølgende analyse af turmønstre, samt for map-matching algoritmen, der benytter forskellige principper i starten/slutningen af en tur og resten af turen.
- *Specifikke biler* havde som nævnt flere udfald end andre. Dette kunne være p.g.a. positionen af GPS-enheden i bilen, bilens konstruktion, og andet elektrisk udstyr i bilen (jf. afsnit 2.1). For at undgå dette problem, kunne man have analyseret log filer efter f.eks. 2 ugers kørsel. Omkostningen hertil blev imidlertid vurderet højere end den tilsvarende højere nøjagtighed ved midler hertil til en større stikprøve.

## 2.4 GPS problemer oplevet af deltagerne

Efteranalyserne i AKTA viste at 46 % af deltagerne havde oplevet nogle mere alvorlige tekniske problemer, end dem, der kan ses af logfiler:

- 14 % oplevede at enheden stoppede med at virke.
- 5 % oplevede at enheden tappede bilens batteri. Dette skyldtes primært fejlagtige installationer på værkstederne (f.eks. at strømmen var taget via tilslutningen til kørelyset).
- 5 % oplevede at enheden ikke viste det korrekte betalingsniveau – men i øvrigt fungerede korrekt<sup>5</sup>.
- 5 % oplevede en ikke-funktionel enhed på et gennemsnitligt tværsnit i tid, hvor alle deltagerne blev kontaktet telefonisk.

Disse problemer tog sjældent lang tid til at løse, og deltagerne var *klar* over problemerne. Via logfilerne kunne der på forskellig vis kompenseres for disse problemer i de efterfølgende analyser i AKTA.

---

<sup>4</sup> Set i forhold til de nylige artikler om det Tyske MAUT system, må der imidlertid siges at være tale om få problemer!

<sup>5</sup> Denne fejl kunne korrigeres i efter analysen baseret på koordinaterne, således at deltagerne ikke blev snydt.

### 3. EFTERBEHANDLING AF GPS-DATA

GPS-data blev forbehandlet af selve GPS-enheden i bilen (OBU'en), som var specificeret til at kunne fjerne (filtrere) observationer, der:

- Indikerede en urealistisk høj ændring i hastighed eller position ( $> |10\text{m/sek./sek.}|$ )
- Indikerede en urimelig høj hastighed ( $>200\text{ km/h}$ ).
- Fluktuerede p.g.a. meget lille hastighed ( $< 5\text{km/h}$ )

Det viste sig imidlertid, at filtersoftwaren ikke havde virket for de første 200 deltagere i eksperimentet, hvilket resulterede i at for meget data af lav kvalitet blev gemt til de senere analyser på forskningsdatabasen (hvor det dog kunne efterbehandles på samme vis). Softwaren virkede for de næste 200 forsøgsdeltagere. Men baseret på analysen af disse data blev det besluttet at reducere kriteriet for at fjerne fluktuationer til  $2\text{km/h}$  for de sidste 100 deltagere. Softwaren brugte GPS-enhedens hastighedsestimat. GPS giver både positioner (koordinater), tid og hastighed). Det vurderes imidlertid, at filtersoftwaren ville have arbejdet bedre med hastighedsestimater baseret på forskellen mellem det pågældende og forliggende GPS-punkt kombineret med GPS-hastigheden. Det skyldes, at map-matchingen benytter koordinaterne, der kan bære ulogiske (inkonsistente) med hastighedsberegningen i GPS-enheden.

En ny tur blev defineret som startende efter en bils stilstand i mere end 3 minutter. Selv hvis motoren blev standset inden for et 3 minutters interval, var det ikke nok til at definere en ny tur. Det viste sig at være svært at definere en brugbar tærskel for hvornår en ny tur starter. Hvis tærsklen er for høj, hvil mange små ærinder forsvinde fra datasættet. Og hvis tærsklen er for lav, vil selv holden i kø op til et lyskryds risikere at resultere i en ny tur. Kriteriet på 3 minutter virker rimeligt, idet én tur sjældent fejlagtigt splittes i to. Men omvendt viste efteranalysen, at stort set i alle tilfælde, hvor motoren slukkes inden for et 3-minutters interval, var der sandsynligvis tale om et ærinde. Man kunne også forestille sig intervaller afhængigt af trafikbelastningen; eksempelvis således at der benyttes større intervaller på strækninger, hvor der er registreret kødannelse, end på lokale veje.

Den næste version af map-matchingalgoritmen forbedres for bedre at kunne detektere om et mindre ærinde finder sted inden for 3-minutters intervallet. Forskellige tests gennemføres, om ruten f.eks. vender på en strækning (kører tilbage samme retning, som den kom fra), har detours, eller tilsyneladende ikke-forklarlig rutevalg på den pågældende tur, herunder om ruten ikke kan reproducere ud fra nyttemaksimering svarende til den pågældende bilist sædvanlige nyttefunktion. Sådanne ture kan da markeres med et flag i databasen for senere analyser, såfremt det ikke er muligt at udtænke ekspert system regler til klassificering af ærinder.

Den tredje runde af eksperimentet benyttede i modsætning til de to første runder også slukket motor som et separat kriterium for at splitte turen.

#### 3.1 Map-matchingalgoritmen

Det blev hurtigt indset, at der måtte implementeres en mere kompleks mapmatching-algoritme end blot at forbinde GPS-punkterne til de nærmest kanter og knuder i vejnettet (det digitale kort). Programmet skulle kunne forbinde sekvensen af x-y GPS-punkter logisk til knuderne i det digitale kort. Knuderne skulle derefter forbindes med kanter i nettet. De primære grunde til at en sådan efterbehandling, var nødvendig, var:

- At kunne fastlægge de eksakte ruter, som deltagerne/bilerne havde fulgt
- At blive i stand til at summere informationen på hver kant i vejnettet, f.eks. antal af målinger, antal biler, hastighed på forskellige tidspunkter, samt trængselstid. Disse informationer er bl.a. benyttet til analyserne i afsnit 4 og 5.
- At kunne lokalisere potentielt fejlagtige GPS-målinger (ved sammenligning med trafiknettets attributdata), og derefter at kunne frasortere disse i de videre analyser
- At reducere størrelsen af datasættet, og derved lette analyser af rutevalg. Hvis der er f.eks. 300 GPS punkter for en bils gennemløb ad en kant, er det til analyser af rutevalg tilstrækkeligt at aggregere disse til en gennemsnitshastighed.

Det ultimative mål var at udvikle et program, der kunne mapmatche turene perfekt, samtidigt med at det skulle være tilstrækkeligt hurtigt til at processe store datamængder inden for en rimelig tid. Disse to mål modsiger hinanden, idet en god map-matching kræver komplekse algoritmer, med mange regler for særtilfælde. På grund af det særdeles omfattende datamateriale (observationer per sekund for 500 biler over flere måneders forsøgsperiode, der skulle mapmatches til et digitalt kort med omkring ½ mio. kanter) blev det i første fase af projektet besluttet at implementere en simpel mapmatching algoritme. En tur bygges i denne ved at forbinde en sekvens af knuder i vejnettet, der udvælges efter følgende fremgangsmåde.

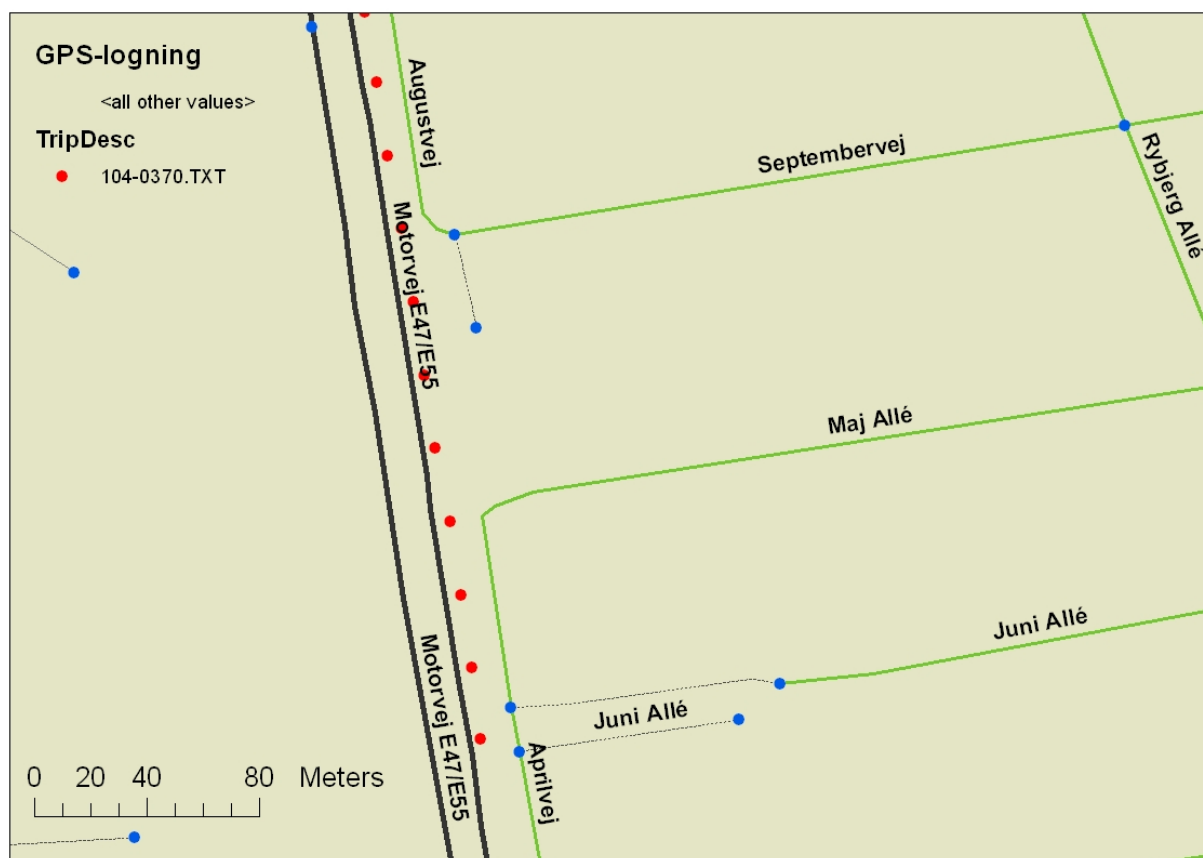
1. For hvert GPS punkt i en tur undersøges det, om det er tæt på en knude i vejnettet (inden for en 20 meters buffer), og om det er tættere på knuden end nogen andre GPS-punkter. Hvis dette er tilfældet vælges knuden, og der sættes et tidspunkt på knuden svarende til GPS-punktet.
2. På denne måde findes en serie af knuder, der derefter repræsenterer en tur med et tidspunkt per knude. Processen er noget mere kompleks, idet den også benytter information om ensretninger og om direkte forbundne knuder er valgt.
3. Hvis map-matchingen ikke finder knuder, der kan forbindes med kanter, estimerer programmet de manglende kanter ved at benytte vægte for "køretid" kombineret med ArcGIS funktionen 'Pathfinder'. Referencer til sådanne estimerede kanter og knuder i sekvens gemmes med et flag *calculated* (estimeret), modsat trin 2, der er *measured* (målt).
4. Til sidst checkes det om den fundne sekvens er logisk forbundet, f.eks. om der er et loop (sløjfe) i ruten). Disse skæres fra og ruten genestimeres.

Resultatet af dette blev et program, der er tilstrækkeligt hurtigt. Efter at data er forberedt er det muligt at bearbejde én deltageres data på omkring 10 minutter (på en Pentium 2.400 MHz), hvilket gennemsnitligt er omkring 1 tur per sekund. Alle 500 deltagere tager således omkring 4 dage at mapmatche til det givne digitale kort (omkring 250 millioner GPS-punkter behandles).

Selve map-matchingen er på den anden side ikke så god som man kunne have håbet på. Specielt i situationer, hvor GPS-modtagelsen er dårlig, har algoritmen den svaghed, at kun en brøkdel af GPS-punkterne benyttes til rutefastlæggelsen, i.e. kun dem, der er maksimalt 20 meter fra en knude i vejnettet. Mens såvel punkter i større afstand som punkter langs vejkanter ikke indgår. Denne fremgangsmåde blev valgt, fordi ArcGIS' geoprocessing (funktion, der finder kanter inden for en buffer for et punkt) var alt for langsom til at være brugbar. Imidlertid er der pt. ved at blive implementeret en ny mapmatching algoritme ved CTT/DTU i C++, i hvilken alle GPS-punkter langs en kant bliver benyttet som en vægtet sum som funktion af de enkelte punkters afstand til linien.

Under 'normale' forhold (ikke udfald eller koordinatunøjagtighed) fungerer programmet derimod godt (som nævnt er det ofte tilfældet, at forholdene ikke er 'normale'). Men selv da er der situationer, hvor den simple metode ikke er tilstrækkelig. **Figur 2** viser et eksempel herpå. Problemet optræder f.eks. hvis to knuder på det sekundære vejnet er lokaliseret i sekvens parallelt til en større vej (eksemplet "aprilvej" på **Figur 2**). Problemet kan undgås ved at benytte en vægtet score langs kanter som nævnt ovenfor. Loop cut-off delen af den eksisterende algoritme vil i dette tilfælde muligvis fjerne en detour til "Aprilvej". Dette er imidlertid ikke altid tilfældet – specielt i tilfældet af ramper og parallelveje langs motorveje (i særdeleshed de to parallelveje langs Lyngbyvej).

Et andet problem forekommer, når hastighederne stiger.: Jo hurtigere en bil kører, jo længere mellem GPS punkterne, der registreres hvert sekund. Dette reducerer sandsynligheden for at der matches knuder korrekt, hvilket primært er et problem langs motorveje. Dette problem undgås også ved at benytte en kantbaseret score.



**Figur 2** Eksempel på map-matching problem. Bilisten kører nord ad motorvejen (de røde GPS punkter). En motorvej har meget få frakørsler (i forhold til antallet af knuder på lokalvejnettet), og derfor få knuder. Villavejen, som ligger inden for 20 meter fra GPS punkterne har i dette tilfælde to knuder, der begge vælges og forbindes fejlagtigt.

Efter at map-matchingen er afsluttet gemmes data som vist i **Figur 3**. Hvert element i *route-group* forbinder alle ruter (ture) for den enkelte bil i eksperimentet, såvel som information om den pågældende deltager/bil. Ruten (*route*) indeholder information om alle ture for en dag. Rutesegmentet (*route segment*) beskriver da hver tur den pågældende dag. Mens *route segment detail* indeholder alle de kanter, der benyttes til en bestemt tur/rute, samt forskellig information om prisniveauer, m.v. langs ruten. Endelig indeholder databasen alle de kanter (*links*) der benyttes af turen. Dette refererer til det digitale kort, hvortil GPS-data blev mapmatchet. Som

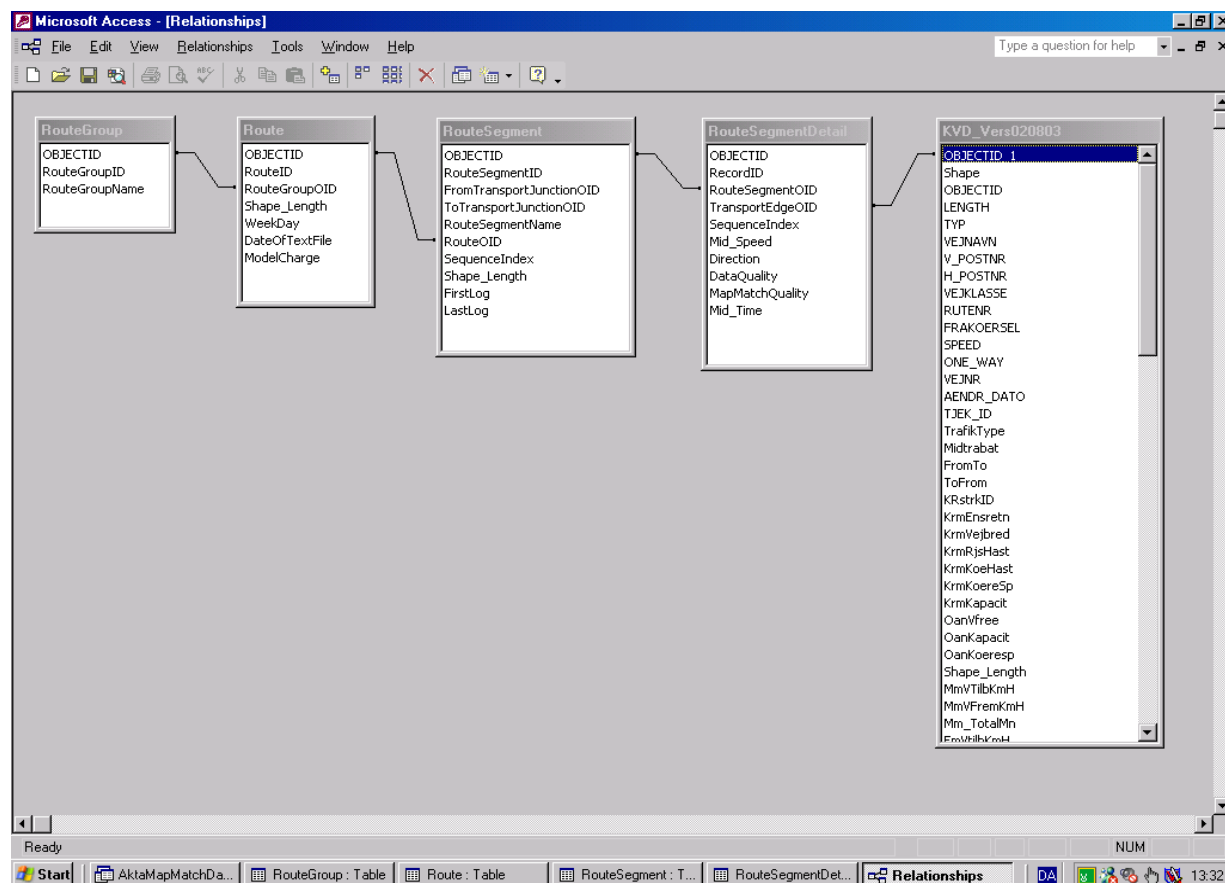


indikeret på figuren gemmes data i en relationel database (Access) under GIS'et (ArcGIS 8.2). Database og GIS er således direkte forbundne.

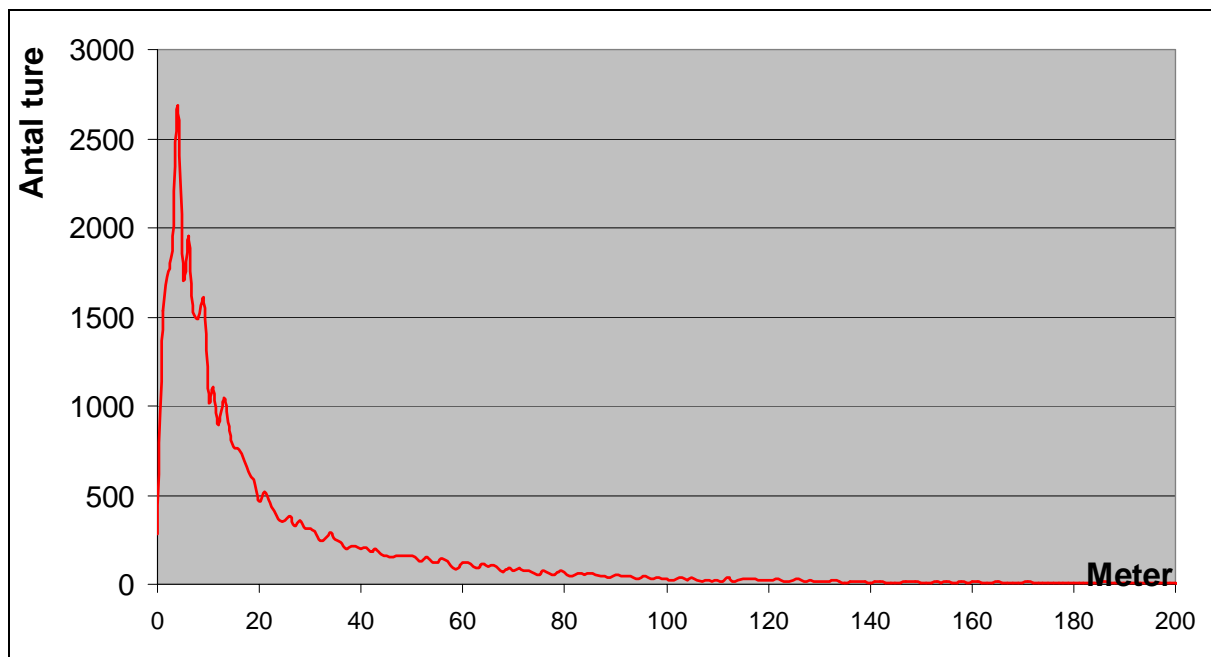
### 3.2 Problemer når ture startes

Mange GPS-eksperimenter, f.eks. de andre byer der benytter denne teknik i EU-projektet PROGRESS, har oplevet store problemer når GPS-enheden starter, i.e. de første koordinater måles først efter noget tid. I Göteborg forsøget er der eksempelvis registreret en gennemsnitlig kørestrækning før første observation på 250 meter (målt i forhold til sidste observation i den foregående tur). Men ofte helt op til 3 km. til det første signal. Som **Figur 4** viser, var dette et langt mindre problem i København. Figuren er baseret på data fra 50 enheder i tredje runde (40.000 ture). X-aksen viser afstanden mellem første GPS position og den foregående turs sidste GPS position. Y-aksen viser antallet af ture med en given afstand til turen før. Selvom figuren ikke viser kvaliteten af det første punkt, viser den at forsinkelsen før enheden modtager data ikke er et problem i en velfungerende GPS-enhed.

Det bemærkes at den større tid i Göteborg-forsøget bl.a. kan skyldes mere kompliceret software, længere boot-tid til den underliggende computer, samt søgning til mobiltelefonnettet (da disse enheder også er forbundet til en server v.h.a. mobiltelefoni). Hvis et mobilbaseret system ønskes, anbefales det således at benytte en to-processor enhed – eller sekventiel opstart - så GPS-enheden hurtigt kommer op og køre og registrerer data, hvorefter de mere komplekse funktioner kan starte op med nogen forsinkelse.



Figur 3 Gemt information om tures relationer som vist i Access (linket til ArcGIS 8.2).



**Figur 4** Afstand mellem sidste GPS-punkt i sidste tur og første i den nuværende tur.

### 3.3 GPS i byområder

Oftest diskuteres problemer med GPS-teknikken i tæt bebyggede områder – især grad af veje i lukkede gaderum. Derfor blev resultaterne fra AKTA indledningsvist gennemgået stikprøvevis for at vurdere omfanget af dette. Her så det ud til, at der også kunne være problemer i lukkede gaderum. Derfor blev det besluttet at gennemføre en mere systematisk analyse af GPS-nøjagtighed som funktion af arealanvendelse.

De mapmatchede GPS-data og det digitale vejkort blev sammenkoblet med et detaljeret kort over arealanvendelsen i Hovedstadsområdet leveret af Hovedstadens Udviklingsråds (HUR) Statistikkontor. Dette kort indeholder 48 forskellige kategorier for arealanvendelse. Hver af disse blev baseret på skøn klassificeret som tæt bebygget (lejlighedsområder, primære bycentre, m.v.), medium (mange kategorier arealanvendelse med fler-etages huse med noget plads imellem), lav (villaer, forstads butiksområder, etc.), og ingen (natur, åbent land, skov, golf baner, golf baner, etc.).

Bufferne blev dannet omkring hver knude i vejnettet, med en afstand på 15 meter (hvilket efter nogle tests viste sig at give bedste resultat sammenlignet med andre afstande). Og arealet af ovenstående 4 niveauer af bebyggelsestæthed inden for bufferen blev udregnet. Bufferne, der kun rummede høje bygninger (bortset fra vejarealet selv) fik et score på 6. Høj samt medium - eller medium alene – gav et score på 5, høj og medium kombineret med lav eller ingen 4, og forskellige lavere kombinationer derefter 3, 2 og 1 (de tre niveauer viste sig ikke at adskille sig væsentligt), og 0, som slet ikke indeholdt bebyggelse. Der blev eksperimenteret med forskellige måder at oversætte andele af forskellige arealanvendelser i bufferne til en score, hvoraf ovenstående gav den mest tydelige sammenhæng mellem arealanvendelse og GPS-nøjagtighed.

**Tabel 2** viser antallet af målte versus beregnede knude data for hver type af arealanvendelse. Som nævnt i afsnit 3.2 er punkter med udfald af signaler eller en vis tvetydighed i map-matching defineret som *målte* (p.g.a. af map-matching algoritmens forskellige simplificeringer burde en hel del af disse have været defineret som målte – eller en mellemkategori). Et *målt*

*punkt* er lokaliseret inden for en buffer afstand på 20 meter fra knuden. Som det kan ses af **Tabel 2** er der en klar tendens til en højere andel af beregnede punkter, når bytætheden stiger (i.e. fra 17.7 % til 26.7 %). Imidlertid kan det også ses, at der stadig er en del udfald i områder med lav bebyggelsestæthed. Selvom de enkelte ruter kan genskabes med en vis sikkerhed, viser tabellen ikke et specielt lovende resultat hvad angår andelen af knuder, der indgår i estimerede – ikke målte – dele af en rute. Et noget overraskende resultat var at 0-scoren (arealer med ingen bygninger overheadet) havde en højere grad af udfald end de spredt bebyggede områder. Projektets tidsrammer har ikke tilladt yderligere analyser af dette (der er 17 forskellige kategorier af arealanvendelser uden bebyggelse), om end man måske kan forvente at udfald i skove er mere hyppige end andre kategorier. Det blev dog undersøgt om udfaldene ad motorveje kunne forklare nul-scoren (høj hastighed giver større afstand mellem GPS-punkter ad ruten). Men det var ikke tilfældet.

Score	Beregnet		Målt		Beregnet/målt (%) Inden for kategori
	#knuder	% af total	knuder	% af total	
0	97.962	8,4	445.677	8,0	22,0
1-3	377.229	32,2	2.129.061	38,0	17,7
4	223.021	19,0	1.090.110	19,5	20,5
5	243.861	20,8	1.069.689	19,1	22,8
6	230.374	19,6	863.894	15,4	26,7
Total	1.172.447	100	5.598.431	100	

**Tabel 2** Sammenhæng mellem andel af målte og beregnede observationer som funktion af bebyggelsestæthed (score fra 0 til 6, som defineret i teksten ovenfor).

En lignende analyse blev gennemført på antallet af registrerede satellitter for den enkelte GPS-observation (disse gemmes også i logfilerne), hvilket imidlertid heller ikke viste nogle mærkbare forskelle som følge af arealanvendelse. Fortolkningen må være, at hvis der er et brugbart signal, så er antallet af tilgængelige satellitter nogenlunde stabilt. Og derved også nøjagtigheden af koordinaterne.

Forskellen mellem spredt og tæt bebyggede områder er om der i det hele taget er signal. Dette er illustreret i **Tabel 3**, hvor alle GPS-punkter er analyseret (også dem, som ikke blev benyttet til map-matchingen, fordi de var for langt fra en knude eller for unøjagtige). Som det fremgår, er den gennemsnitlige score på GPS-punkter baseret på et lavt antal satellitter (3, 4 og 5) langt højere end for GPS-punkter baseret på flere satellitter, hvilket indikerer en klar sammenhæng med bebyggelsestætheden (score 6 og 5 er de tættest bebyggede områder). Imidlertid resulterer dette i de fleste tilfælde i en ikke valid observation (ikke mapmatchet), snarere end et GPS-punkt med lav nøjagtighed.

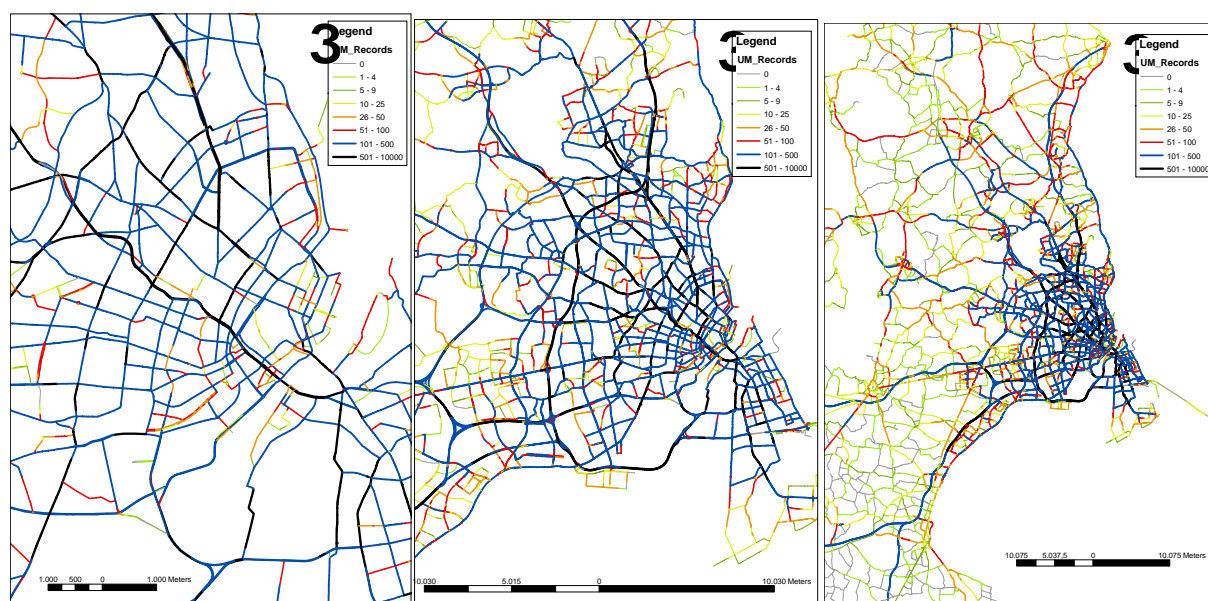
Satellitter	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Gennemsnitlig score	4,55	4,07	3,38	3,18	3,00	3,07	3,02	2,90	3,08	3,26
Observationer	1.271	7.262	29.856	48.213	64.518	57.179	32.504	12.287	4.934	2.172

**Tabel 3** Sammenhæng mellem antal observerede satellitter og kategorien af arealanvendelse for alle GPS-observationer (mapmatchet såvel som mistede) baseret på en stikprøve af data (50 kørere)

Det bemærkes, at de centrale byområder i København ikke har meget høje bygninger – typisk 4-5 etager (kategori 6). Men bygningerne i kategori 6 er bygget tættere på hinanden og vejen, typisk i lukkede gaderum hvor der er samlede karreer langs denne.

## 4. DÆKNINGSGRAD

Til brug for analyser af hastigheder og trængsel er det essentielt, at observationerne har en rimelig dækningsgrad. **Figur 5** viser dækningsgraden uden for myldretiden forskellige steder i Hovedstadsområdet. Erfaringsvis giver 10 observationer en rimelig beskrivelse af hastigheden<sup>6</sup>. **Figur 6** viser store lokalveje uden dækning efter dette kriterium. Stort set alle trafikveje, og alle større veje var dækket. Som det ses er AKTA-data selv med denne ret begrænsede stikprøve rimeligt dækkende. I Trængselsprojektet analyseres disse forhold nærmere, hvilket dokumenteres i en kommende CTT-rapport, der også indeholder en række andre figurer i større format.



**Figur 5** Dækningsgrad af AKTA-data forskellige steder i Hovedstadsområdet. Grøn=1-4 observationer, mørkegrøn 5-9, gul 10-25, orange 26-50, rød 51-100, blå 101-500 og sort 501-10.000.

<sup>6</sup> Dette blev vurderet efter en række forskellige tests og analyser af sammenhængen mellem antal gennemløb (i alt og af forskellige biler) og spredningen/nøjagtigheden af hastighedsmålinger.



**Figur 6.** Dækningsgrad på store lokalveje. Veje markeret med rødt har ikke tilstrækkelig dækning (10 gennemløb af mindst 3 forskellige biler). Det bemærkes at deltagerne primært bor og arbejder inden for amtsgrænsen (dvs. i Københavns Amt, eller Frederiksberg og Københavns Kommuner). Inden for dette område er dækningen næsten komplet. Stort set alle Trafikveje (bortset fra Øresundsbroen) er dækket, hvorfor disse ikke er vist.

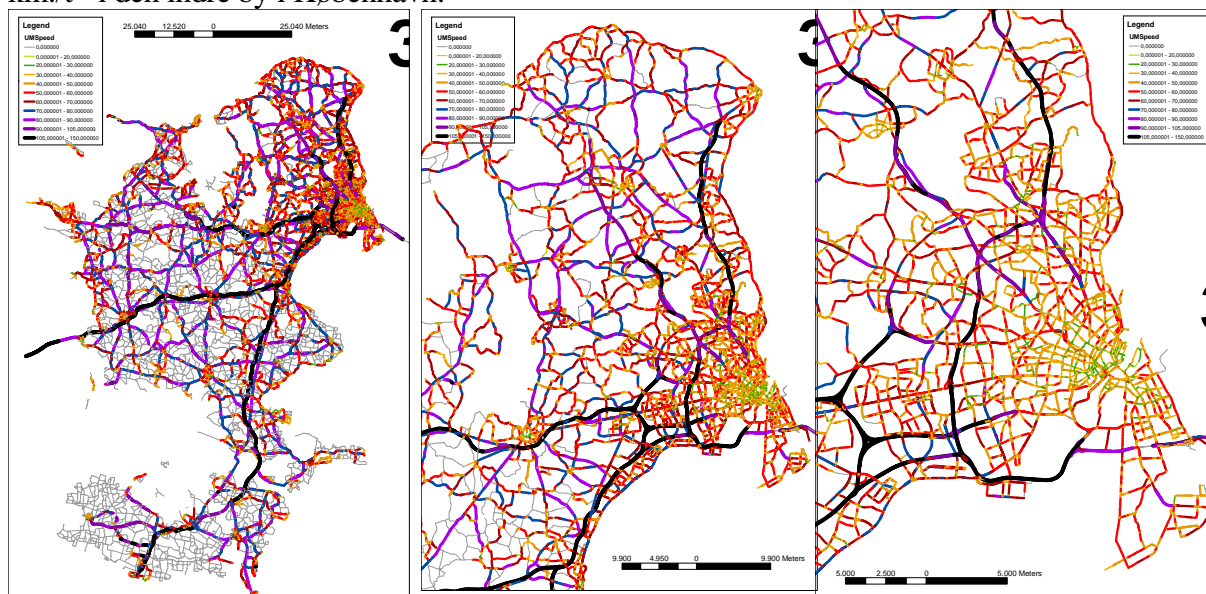
## 5. MÅLTE HASTIGHEDER

**Figur 7** viser målte hastigheder uden for myldretiden. Denne figur, suppleret med en række andre, indgår i stor version i den tekniske CTT-rapport om GPS-delen af trængselsprojektet. Den venstre side af **Figur 7** viser generelt at hastigheden på det Sjællandske landevejsnet er for hurtige (90-105 km./t), men dog i gennemsnit ikke over 105 km./t. I Hovedstadsområdet er det måske især værd at nævne, at der på Motorringvejens nordlige del, samt Farummotorvejen mellem Motorringvejen og Farum selv uden for myldretiden er en vis trængsel (gennemsnits hastigheder under 105 km./t). Tilsvarende er også registreret lavere hastigheder på en del af sydmotorvejen og Lufthavnsmotorvejen, men dette skyldes, at der var vejarbejder på de pågældende veje, mens forsøget fandt sted. Generelt er hastighederne i Københavns ret lave, hvilket skyldes forsinkelser i lyskryds selv uden for myldretiden (simpelt hen som følge af hyppigheden af kryds).

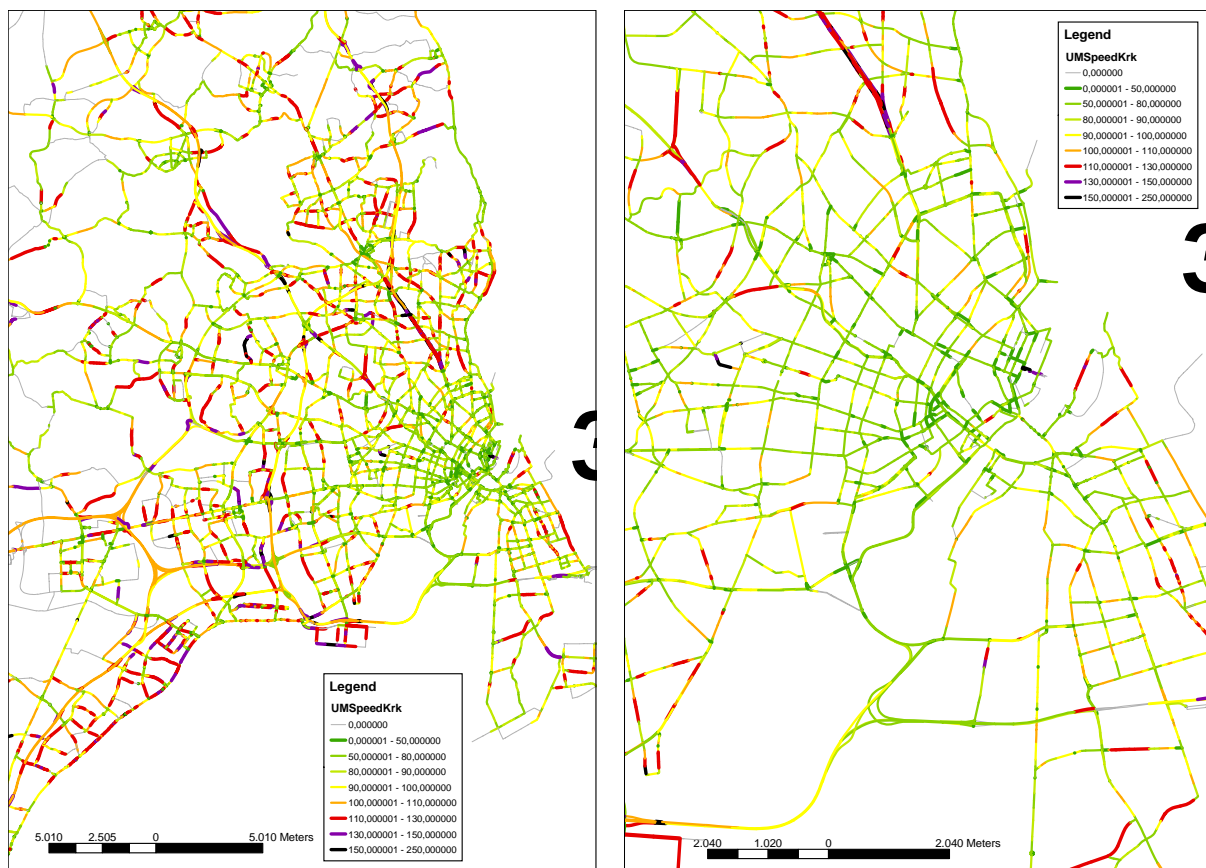
**Figur 8** viser hastighederne sammenlignet med de skilte uden for myldretiden. Det fremgår tydeligt at hastigheden er for stor på de fleste trafikveje i Københavns Amt, samt længere ude i regionen. I særlig grad trafikvejene i Køge Bugt fingeren. Et særligt tilfælde er de to parallelle veje langs Lyngbyvejen. Derimod er gennemsnitshastighederne i centralkommunerne generelt langt lavere end de skilte, hvilket igen skyldes lyskryds. I Københavns centrum skyldes den lave hastighed derudover at bilisterne (fornuftigvis) kører efter forholdene - altså lavere end 50



km./t - i den indre by i København.



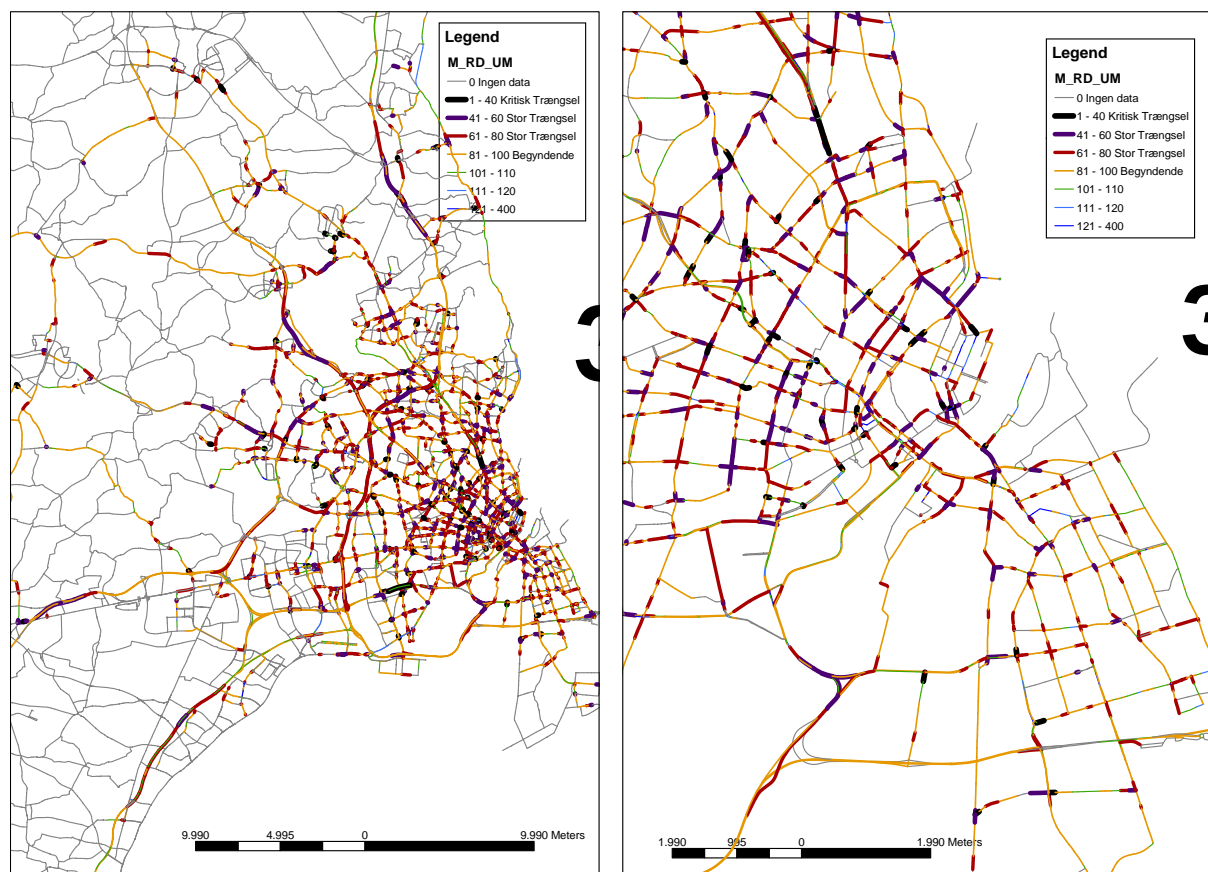
**Figur 7** målte hastigheder uden for myldretiden. Sort over 105 km./t, mørke lilla over 90, lilla 80-90, blå 70-80, mørkerød 60-70, rød 50-60, brun 40-50, orange 30-40, mørkegrøn 20-30 og lysegrøn 0-20. Figureerne m.fl. indgår i stor størrelse i den tekniske rapport om GPS-delen af trængselsprojektet.



**Figur 8.** Sammenligning mellem målte gennemsnitshastigheder og skiltede hastigheder, uden for

*myldretiden. Sort er > 150%, lilla 130-150%, rød 110-130%, orange 100-110%, gul 90-100%, lysegrøn 80-90%, grøn 50-80%, mørkegrøn 0-50% og grå uden tilstrækkeligt antal obs. (<10)*

**Figur 9** viser den registrerede trængsel i morgenmyldretiden. Som det fremgår, er der generelt stor trængsel i det meste af Hovedstadsområdet. Det bemærkes, at trængslen ikke kun ligger på motorvejsnettet, men også på en meget stor del af trafikvejnettet. I Københavns Kommune er der især trængsel op til lyskryds. Men som det fremgår, er der en række vejstrækninger, hvor køerne fra de enkelte kryds er ved at nå de tidligere liggende kryds. Eksempelvis på Jagtvej. Det bemærkes også, at der er enkelte strækninger, hvor hastigheden er nær eller endog højere end uden for myldretiden. Dette skyldes dels grønne bølger, dels lavere lastbilprocenter og flere bilister, der kender de pågældende strækninger i morgenmyldretiden, end mellem myldretiderne.



**Figur 9.** Trængsel i morgenmyldretiden. Målt gennemsnitshastighed 7.00-9.00 hverdagsmorgener sammenlignet med målt gennemsnitshastighed uden for myldretiderne.

**Tabel 4** og **5** opsummerer den såkaldte vejtrængsel, altså antal kilometer vej med forskellige trængselsniveauer. Som det fremgår, er der stor trængsel på en ret stor del af vejnettet. Kritisk trængsel forekommer kun på få strækninger. Men kriteriet er også meget kraftigt herfor – nemlig nær totalt sammenbrud i hele morgenmyldretiden (7.00 – 9.00) i gennemsnit over alle hverdage hele året. I den kommende tekniske dokumentation af trængselsprojektet gennemføres samme analyse, men for spidstimen defineret som den time, hvor hastigheden er lavest.



km. Område	Samlet længde	Ingen eller ubetydelig trængsel			Stor	Kritisk
		Ingen måling	Hurtigere hastighed	Begyndende		
Københavns Kommune	291	13	46	153	74	5
Frederiksberg Kommune	38	2	5	16	15	0
Københavns Amt	1.039	226	175	468	165	4
Total, dækningsområdet	1.367	240	226	637	254	10
Frederiksborg Amt	1.073	760	75	192	45	2
Roskilde Amt	632	390	68	150	23	0
Total, Hovedstadsområdet	3.073	1.390	369	979	323	12

**Tabel 4** Vejtrængsel, morgenmyldretid, km.

km. Område	Samlet længde	Ingen eller ubetydelig trængsel			Stor trængsel	Kritisk
		Ingen måling	Hurtigere hastighed	Begyndende		
Københavns Kommune	100	4	16	53	26	2
Frederiksberg Kommune	100	4	13	42	40	1
Københavns Amt	100	22	17	45	16	0
Total, dækningsområdet	100	18	17	47	19	1
Frederiksborg Amt	100	71	7	1	4	0
Roskilde Amt	100	62	11	24	4	0
Total, Hovedstadsområdet	100	45	12	32	10	0

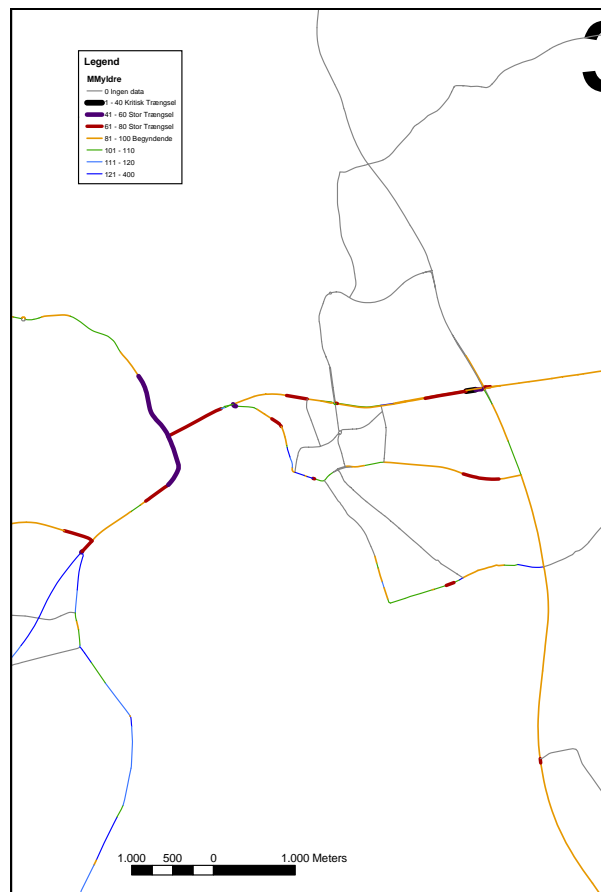
**Tabel 5** Vejtrængsel, morgenmyldretid, %

## 6. BRUG AF TRÆNGSELSDATA TIL PLANLÆGNING

Observationerne fra AKTA-data er så nøjagtige, at de også kan bruges til konkrete planlægningsformål og lokale analyser. I det følgende gives eksempler herpå.

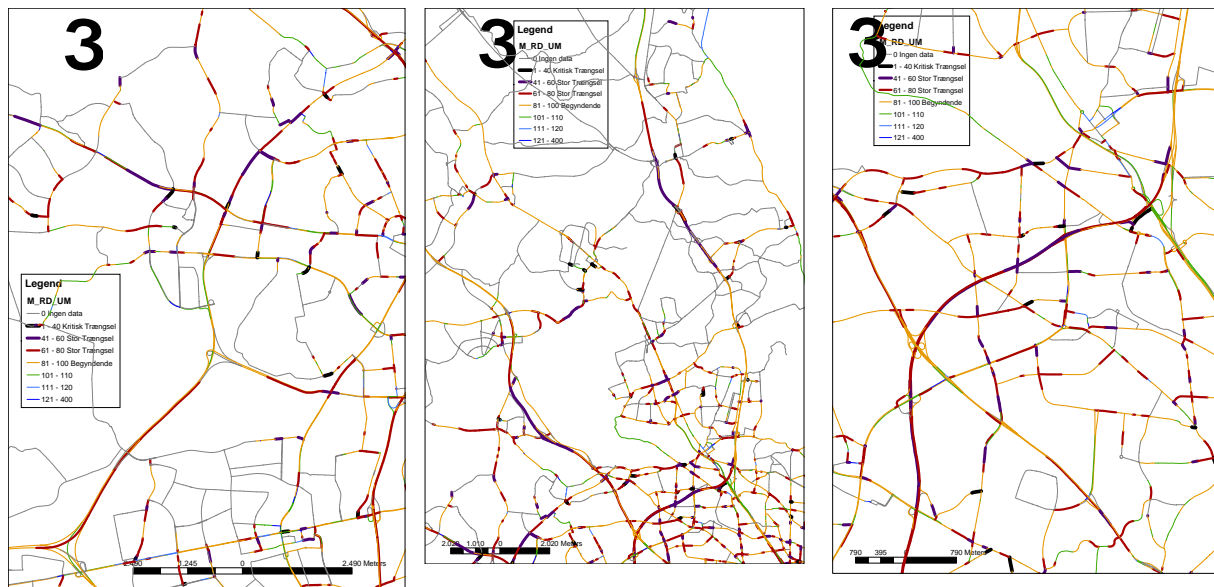
**Figur 10** viser vejnettet omkring Frederikssund, og trængslen i morgenmyldretiden. Det har været debatteret at bygge en ny bro over Roskilde Fjord (eller tunnel), f.eks. som del af en nordlig omfartsvej. Fra AKTA-data kan de præcise rejsetider for ruten gennem Frederikssund summeres, hvilket da kan indgå i et estimat for det eksisterende tidsforbrug og tidsforbruget nord om Frederikssund. Selv så langt ude i Hovedstadsregionen er der et tilstrækkeligt datagrundlag for en sådan analyse:

- Fra Gerlev til krydset med Rute nr. 211 er der 7,9 km.
- 30 gennemløb i morgenmyldretiden giver 10,6 min. i gennemsnit i den retning, der har mest trængsel.
- 25 gennemløb giver 9,6 min. i gennemsnit i eftermiddagsmyldretiden.
- Ca. 70 gennemløb uden for myldretiden giver 8,7 min. i gennemsnit.
- Gennemsnitshastigheden er da 54 km./t uden for myldretiden, 45 km./t i morgenmyldretiden og 49 km./t i eftermiddagsmyldretiden.
- En ny vej nord om Frederikssund vil være ca. 10 km. lang med gennemsnitshastighed 75 km./t (der vil være 2 kryds). Rejsetiden vil da være 8 min. i snit.
- Gevinst 2,6 min. per tur om morgenen, 1,6 min. om eftermiddagen, 0,7 min. resten af dagen

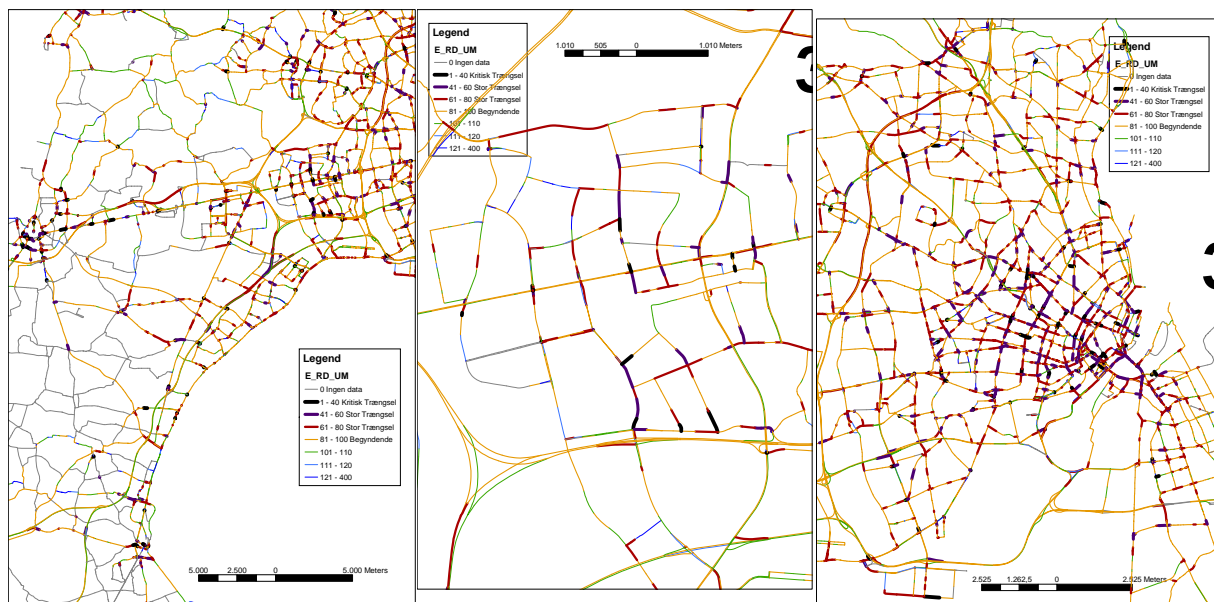


**Figur 10.** Trængselssituationen ved Frederikssund (samme farveskala som figur

**Figur 11** viser trængslen i morgenmyldretiden ved specifikke lokaliteter. Denne information kan benyttes til vurdering af behov for afledning af lokale flaskehalse, f.eks. ved udvidelse af små delstrækninger på vejnettet, indførelse af trafikstyrede signalanlæg (større omløbstid når kapaciteten ved fast omløbstid nås), eller omlæggelse af vejkryds til rundkørsler. Derudover bekræfter figurene de trængselsmålinger, som Vejdirektoratet gennemfører på TRIM-nettet.



**Figur 11.** Trængsel, specifikke lokaliteter morgenmyldretid. Samme farveskala som figur 9.



**Figur 12.** Trængsel, specifikke lokaliteter eftermiddagsmyldretid. Samme farveskala som figur 9.

Sædvanligvis forventes, at trængslen er mest koncentreret i morgenmyldretiden, fordi denne er mere koncentreret. Dette er ofte bekræftet på motorvejnettet, og TRIM-målinger her. Imidlertid viser **Figur 12** sammenlignet **Figur 11**, at der i en række byområder, f.eks. Roskilde, Glostrup, Lyngby og en stor del af centalkommunerne, er større trængsel i eftermiddagsmyldretiden end i morgenmyldretiden. Dette skyldes kombinationen af pendling og erhvervstrafik med indkøbsstrafik og ærindetrafik, der er mere intensiv om eftermiddagen, dvs.:

- Trængsel = pendling/længde af pendlingstid + erhvervstrafik + indkøbsstrafik + ærindetrafik

## 7. DISKUSION OG KONKLUSION

AKTA eksperimentet i København har givet ny indsigt i brugen af GPS til road pricing, hastighedsmålinger samt måling af trængsel. Det var måske overraskende, at GPS-teknologien volder så mange problemer, som det viste sig. Men i forhold til Tyske MAUT og andre udenlandske forsøg med GPS inden for EU-projektet PROGRESS, er AKTA ret succesfuldt, idet det var muligt at løse problemerne og opnå et brugbart datasæt.

AKTA data blev benyttet i trængselsprojektet, hvilket har muliggjort en række analyser af trængsel i hovedstadsområdet. De væsentligste konklusioner vedr. hastigheder uden for myldretiden herfra er, at:

- Hastigheden på landevejene i regionen er systematisk over den skilte. I øvrigt derudover i særlig grad på Sjælland uden for Hovedstadsområdet.
- Hastigheder på trafikveje i Københavns forstæder er meget over den skilte uden for myldretiden. I særlig grad gælder dette for Købe Bugt fingeren og de to veje langs Lyngbymotorvejen.
- Hastigheden i centralkommunerne er langt lavere end den skilte selv uden for myldretiden (krydseffekt)
- Der er begyndende trængsel på motorringvejen, selv uden for myldretiden, ligeså på Farum Motorvejen mellem Motorringvejen og Farum.

Konklusioner vedrørende trængsel:

- Der er kritisk trængsel på en række motorveje i Hovedstadsområdet, hvilket bekræfter tal og malinger fra Vejdirektoratet (TRIM-nettet, m.v.).
- Der er kritisk trængsel på en række trafikveje i Hovedstadsområdet. Ikke kun i centralkommunerne, og ikke kun i Kbh.-amt. Men selv længere ude i regionen
- En række trafikveje i byområder har størst trængsel i eftermiddagsmyldretiden (modsat motorvejnettet). Målinger på motorvejsnettet kan således ikke generaliseres til trafikvejnettet

Perspektiver fra projektet er, at GPS-baserede data kan benyttes til:

- Registrering af trængsel til trafikpolitik og strategisk planlægning
- Etablering af datagrundlag til trafikmodellering, samt til digitale kort til styring af flåder af køretøjer
- Levering af data til trafiktekniske analyser, optimering af kryds, etc.
- Kvalificering af konkrete beslutninger om forbedret infrastruktur
- På længere sigt til kontinuert overvågning og trafikinformation, samt til vejledning ved uheld, vejarbejder, etc.

## **8. TAK TIL**

AKTA er primært finansieret af EU's 5. Ramme Program og Københavns Kommune og Trafikministeriet, med med- og egenfinansiering af CTT/DTU. AKTA ledes af Kbh., hvorfra Poul Sulkjær takkes for projektledelse, mens PLS RAMBØLL Management, DTU og Vejdirektoratet også deltager. Trængselsprojektet er finansieret af Trafikministeriet, Københavns Kommune, Vejdirektoratet og den første fase af Transportrådet. Dette projekt gennemføres af COWI og CTT med dataleverancer fra AKTA, Vejdirektoratet og Kbh. Kommune. Fra CTT takkes i særlig grad Christian Würtz for hjælp til leverance af data til artiklen og fra Rambøll Jens Peder Kristensen for samarbejde om de to referencer til artiklen, hvorfra kapitel 2 og 3 er kraftigt inspireret.

## **9. REFERENCER**

Nielsen, O.A. & Jovicic, G (2003). The AKTA road pricing experiment in Copenhagen. Conference paper. Session II: Valuation/Pricing. Moving through nets: The physical and social dimensions of travel. 10<sup>th</sup> International Conference on Travel Behaviour Research. Lucerne, Switzerland, 10-15. August 2003.

Nielsen, O.A. & Kristensen, J.P. (2003a). Behavioural effects of road pricing – First lessons from Copenhagen. Conference paper, Session 4.15. ITS World Madrid 16-20. November 2003.

Nielsen, O.A. & Kristensen, J.P. (2003b). Using GPS for Road Pricing - Experiences from Copenhagen. Conference paper, Session 4.15. ITS World Madrid 16-20. November 2003.