

# GPS & Roadpricing

*Martina Zabic, Civilingeniør*

Center for Trafik og Transport, Danmarks Tekniske Universitet ([MZ@CTT.DTU.DK](mailto:MZ@CTT.DTU.DK))

## Introduktion

I denne artikel præsenteres analysemetoderne og resultaterne fra et eksamensprojekt (Zabic, M., 2004) omhandlende en analyse af GPS kvaliteten i forhold til roadpricing i København. Denne undersøgelse af GPS kvaliteten i forbindelse med roadpricing, er foretaget i tilknytning til det danske AKTA forsøg ([www.akta-kbh.dk](http://www.akta-kbh.dk)), hvor GPS data er indsamlet for 500 biler over en 2-årig periode (2001-2003). Artiklen præsenterer således en analyse af GPS nøjagtigheden med henblik på at undersøge om kvalitet og pålidelighed er tilstrækkelig, til et GPS-baseret roadpricingssystem i København.

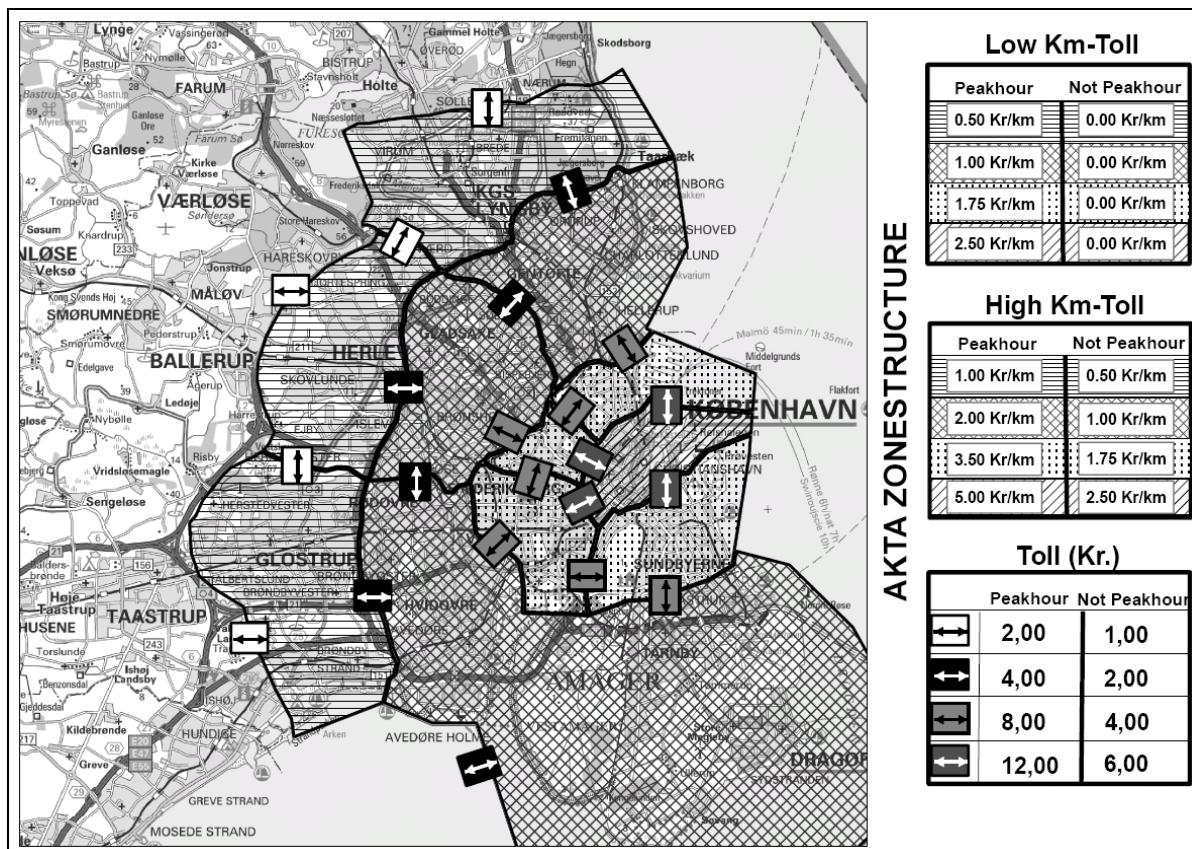
Ved GPS-baseret roadpricing, udstyres den enkelte bil med en computer, der ved hjælp af signaler fra satellitter, kan bestemme bilens placering på vejnettet. Herved kan bilens computer ved hjælp af elektroniske vejkort udregne kilometertaksten det pågældende sted, således at det skyldige beløb enten trækkes direkte eller akkumuleres til senere betaling. Systemets detaljeringsgrad stiller store krav til positionsbestemmelsen af køretøjet.

I modsætning til eksempelvis landmålere, der anvender avanceret og dyrt udstyr, f.eks. med flere modtagere og kontrolstationer til signalkorrektion, var det anvendte udstyr under AKTA forsøget designet med henblik på enhedsomkostningerne skulle være økonomisk realiserbare til brug i et så omfattende roadpricingssystem. Endvidere vanskeliggøres positionerings forholdene, idet bilen der ønskes positionsbestemt er i bevægelse. Når både satellitterne og GPS modtageren er i bevægelse, reduceres estimeringskvaliteten af positionen, som specielt ses når bilerne accelererer, deaccelererer og drejer hurtigt i sving m.m.

Hver GPS-baseret observations nøjagtighed afhænger af antallet af satellitter inden for "sigt", kvaliteten af hvert signal (HDOP) og den retning satellitterne befinder sig i forhold til enheden og dens bevægelse. GPS modtageren har brug for mindst 4 satellitter i sigt for at kunne estimere x, y og z, såvel som tiden, der anvendes til at beregne satellitternes position med. En HDOP værdi mindre end 4 indikerer en god signalkvalitet og dermed en god måling. Pålidelig og uafbrudt positionering kan normalt kun opnås under åben himmel samt hvor ingen eller meget få hindringer forstyrrer positionbestemmelsen. Derfor er GPS modtagelsen speciel følsom i tætte byområder, hvor signalproblemer ofte skyldes høje bygninger, der blokerer for signalerne. Signalproblemerne ses også i skovområder og ved kørsel gennem tunneler og under broer. Netop derfor er det fundet interessant, at analysere og evaluere GPS

kvaliteten og pålideligheden med henblik på indførelsen af et roadpricing system i et tæt byområde som København, hvor signalproblemer af ovenstående karakter kan forventes at forekomme.

Under AKTA-forsøget fik 500 deltagere installeret et ”taxameter” i bilen og blev fulgt, ved hjælp af en indbygget GPS modtager, over en toårig periode (Nielsen et al, 2000). Perioden var inddelt i 3 forsøgsrunder med forskellige takstsystemer (jf. figur 1).



Figur 1: Forskellige takstsystemer i AKTA (Baggrundskort fra KMS, Copyright Kort & Matrikelstyrelsen G X-03, [www.kms.dk](http://www.kms.dk)).

## Databehandling og analysemetode

Det indsamlede data udgør ca. 250.000 ture og 120.000.000 GPS observationer. GPS modtagerne estimerede og registrerede bilens position hvert sekund. For hver bil registreres en række informationer omkring den kørte tur. Blandt de vigtigste, foruden dato og tid, er X-koordinaten, Y-koordinaten, antal synlige satellitter, HDOP (Horizontal Dilution of Precision), distancen og hastigheden.

Idet hver bils data gemmes i separate logfiler, blev en fælles database oprettet med henblik på at kunne udføre nogle overordnede analyser på det samlede data. Disse logfiler blev således importeret i databasen, hvori 42.000.000 GPS observationer indgik. Grundet Windows’

begrænsninger med hensyn til store databaser, blev forskellige datasæt oprettet som subsets af den samlede datamængde ved brug af SQL. Disse subsets blev alle oprettet ud fra tilfældigt udtrukket data og indenfor forskellige kategorier, som for eksempel et subset af alt data og et subset af data kun fra København, osv.

Disse datasæt blev importeret i ArcGIS, hvor forskellige analyser af data blev foretaget. Analysemetoderne er baseret på GIS-analyser af det eksisterende datamateriale, hvor manglende data og de systematiske udfald understreger problemerne omkring anvendelsen af GPS til roadpricing.

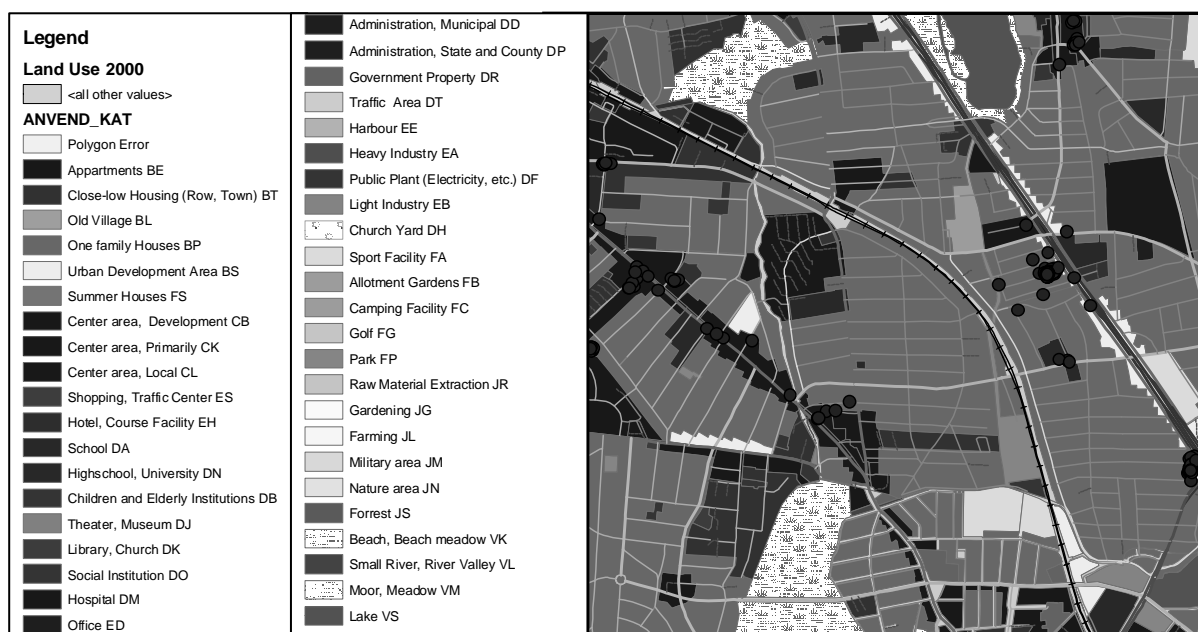
Dataanalysen bygger på forskellige delanalyser af GPS kvaliteten. Først sammenholdes både antallet af satellitter i sigt og HDOP værdien med bebyggelsestætheden i København, for at finde sammenhængen mellem bytæthed og GPS kvalitet. Dernæst undersøges vejnettets egnethed til roadpricing ud fra gennemsnitlige GPS værdier udregnet for hver vej. Her holdes fokus på de områder eller veje, hvor GPS værdierne er kritiske og derfor uegnet til positionsbestemmelse. Tilsvarende foretages en analyse af GPS forholdene udenfor København, for primært at analysere GPS kvaliteten i skovområder, men også for at se på lande- og motorvejene.

Det indsamlede data af bilernes position og hastighed til hvert sekund, er under AKTA projektet blevet sammenholdt med digitale kort, og en mapmatching procedure er gennemført. Mapmatching er en fortolkning af hvilken sekvens af strækninger, en given sekvens af GPS punkter følger. Mapmatchingen sker ved hjælp af en udviklet algoritme, der søger at fortolke data for at undgå fejlregistreringer af målingerne.

Idet bilernes originale logfiler ikke indeholder oplysninger om de forekomne udfald i signalmodtagelsen, er der i analysen foretaget en undersøgelse af det mapmatchede datasæt, hvori udfaldene er registreret. Resultatet sammenlignes med resultater fundet under eget forsøg på at teste GPS dækningen i København. Ved brug af BlomInfo's 3D Bymodel, sammenlignes de omgivende bygningsdimensioner i forskellige gader med henblik på, hvornår udfald i positionsbestemmelsen forårsages af blokeringer.

Eftersom denne 3D bymodel ikke eksisterer for hele hovedstadsregionen og analysen desuden ville være krævende i form af beregningstid for computeren, blev en mere aggregeret analyse foretaget for hele regionen. Bebyggelsestætheden blev estimeret ud fra både befolkningstætheden og arbejdspladسدensiteten for hovedstadsregionen.

Dataanalysen blev understøttet af HSKs digitale arealanvendelseskort (jf. figur 2), som illustrerer arealanvendelseskategorien for hvert område. Arealanvendelseskortet er detaljeret og indeholder 44 forskellige kategorier, hvilket gør det muligt at se GPS forholdene i relation til omgivelserne i området.



Figur 2: Arealanvendelseskort fra Hovedstadens Statistik Kontor (baseret på et kort fra HUR, [www.hur.dk](http://www.hur.dk)).

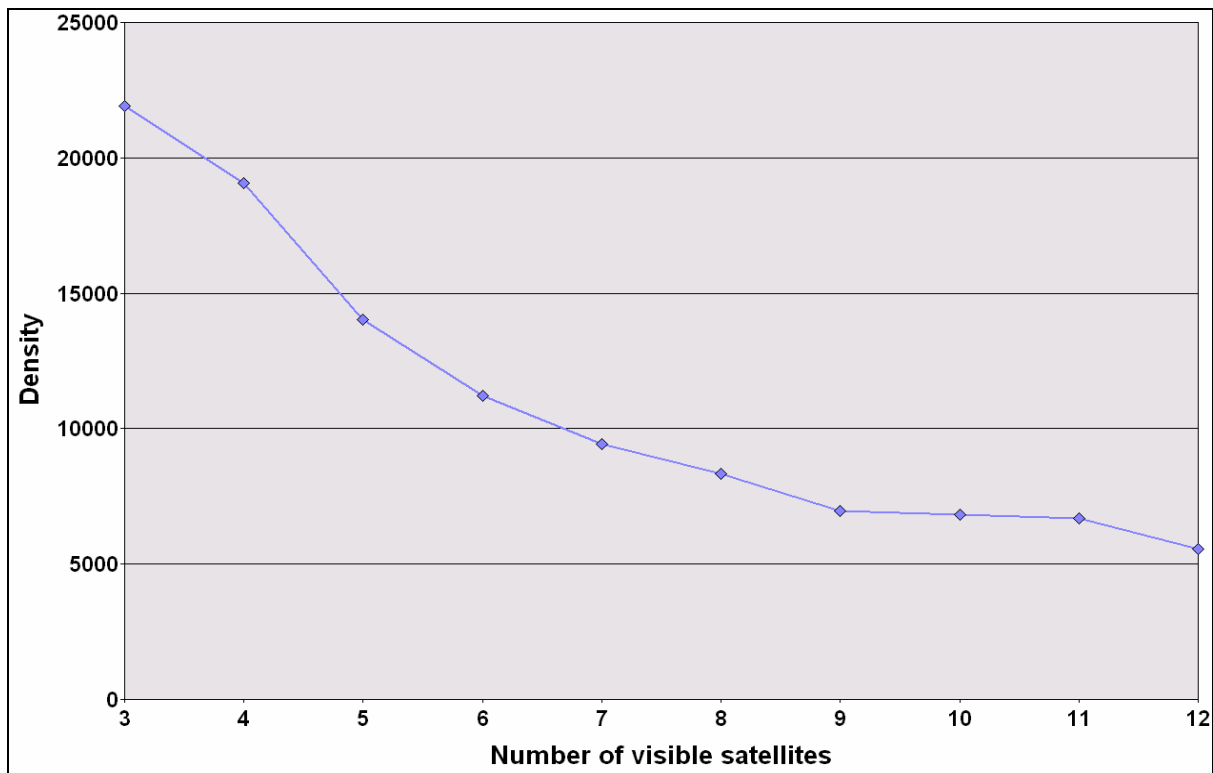
## Resultater

Resultaterne fra analysen er præsenteret i det følgende. De forskellige resultater er illustreret ved figurer eller digitale kort fra ArcGIS med fokus holdt på satellittilgængeligheden. De samme delanalyser er foretaget for HDOP værdien, men er ikke præsenteret i denne artikel, idet disse tendenser ikke er tilsvarende tydelige.

### Sammenligning med omgivelserne

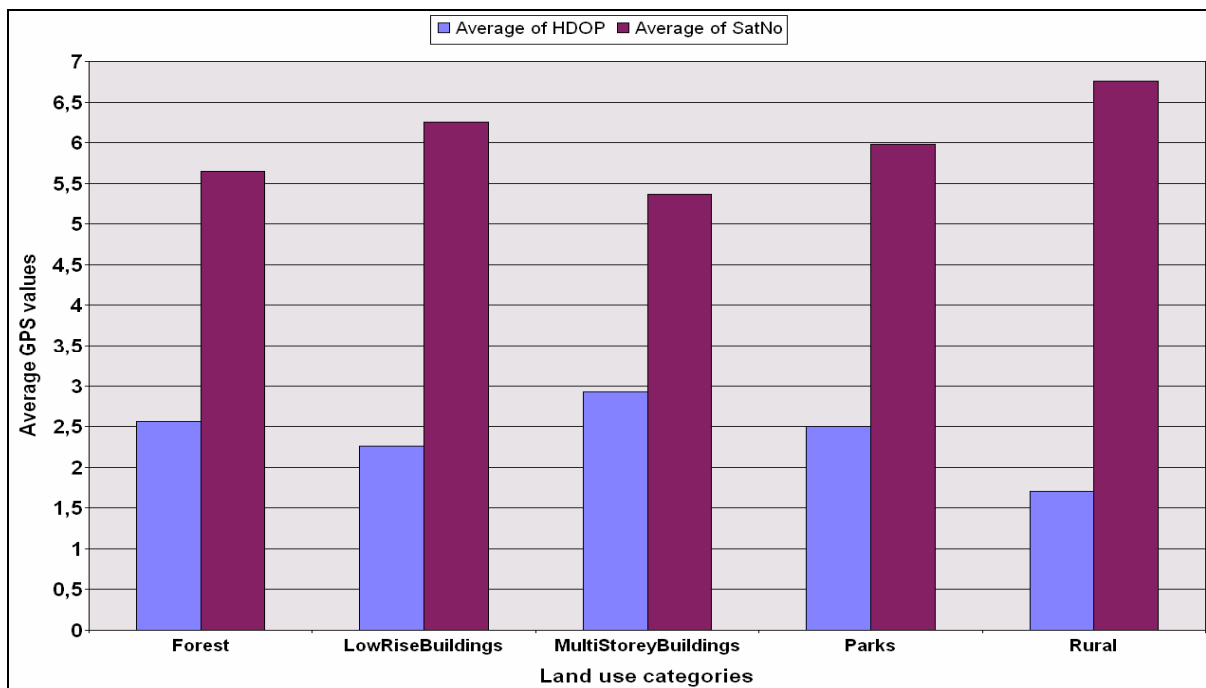
Bebyggelsestætheden blev udregnet for hver GPS observation indenfor en buffer på 30 meter med henblik på at bestemme sammenhængen mellem bebyggelsestætheden og antallet af satellitter i sigt. Bebyggelsestætheden er antaget at afspejle et aktivitetsniveau, der er estimeret ud fra befolkningstætheden og arbejdspladsdensiteten i hovedstadsområdet. Figur 3 illustrerer den gennemsnitlige bebyggelsestæthed i København plottet for hvert antal af synlige satellitter.

Grafen er udarbejdet som et gennemsnit af de mange målinger. Hvor det gennemsnitlige aktivitetsniveau og dermed bebyggelsestætheden er høj, er antallet af synlige satellitter lavt. Af grafen ses en tydelig sammenhæng mellem antallet af satellitter i sigt og bebyggelsestætheden, hvilket understreger, hvorledes GPS forholdene afhænger af omgivelserne. Hvis GPS modtageren omvendt har flest satellitter i sigt, er den gennemsnitlige bebyggelsestæthed meget lavere. Eftersom roadpricing typisk omhandler højere takster ind mod centrum af byen, er det givetvis et problem at antallet af satellitter i sigt og dermed positioneringskvalitet er forringet i centrumområdet.



Figur 3: Sammenhæng mellem antallet af synlige satellitter og den gennemsnitlige bebyggelsestæthed i København.

Ved at udregne det gennemsnitlige satellitantal for hver zone med en arealanvendelseskategori, er sammenhængen mellem antallet af synlige satellitter og omgivelserne fundet. For fem udvalgte karakteristiske arealanvendelseskategorier, er det gennemsnitlige satellitantal og HDOP værdien udregnet (jf. figur 4).

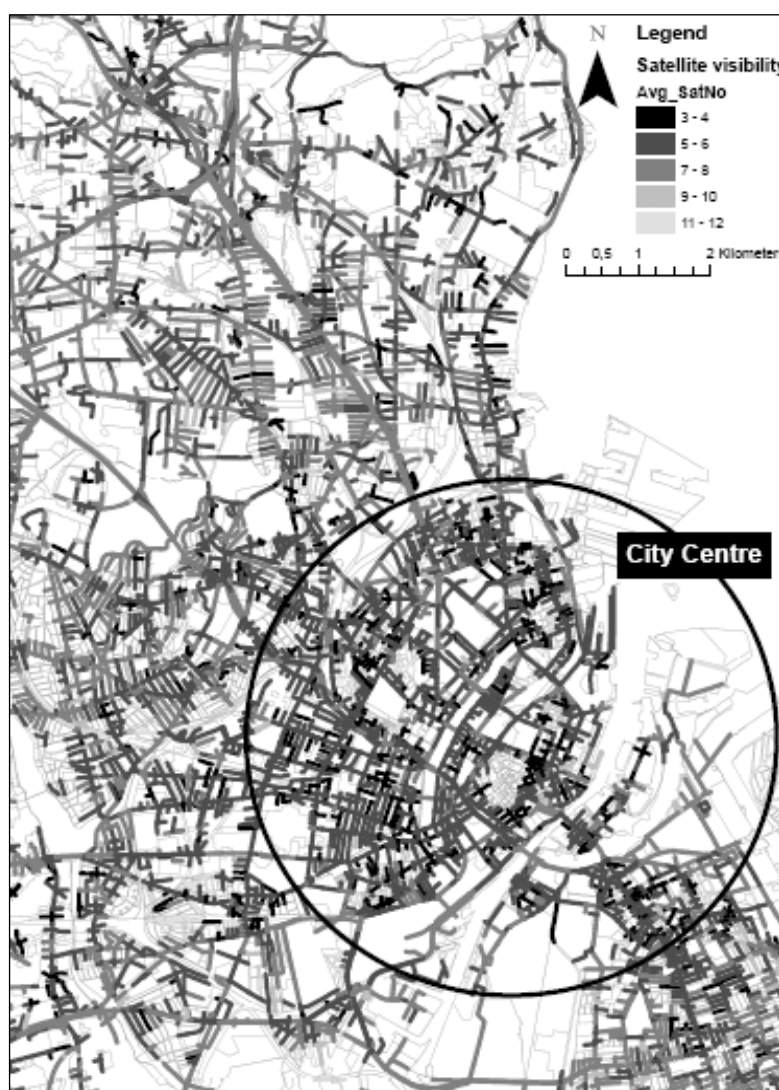


Figur 4: Gennemsnitligt satellitantal og HDOP for forskellige arealanvendelseskategorier.

Af figuren ses, hvorledes det gennemsnitlige satellitantal varierer mellem kategorierne. Værdien er lavest for etagebolig, idet de høje bygninger som tidligere nævnt, skygger for signalerne.

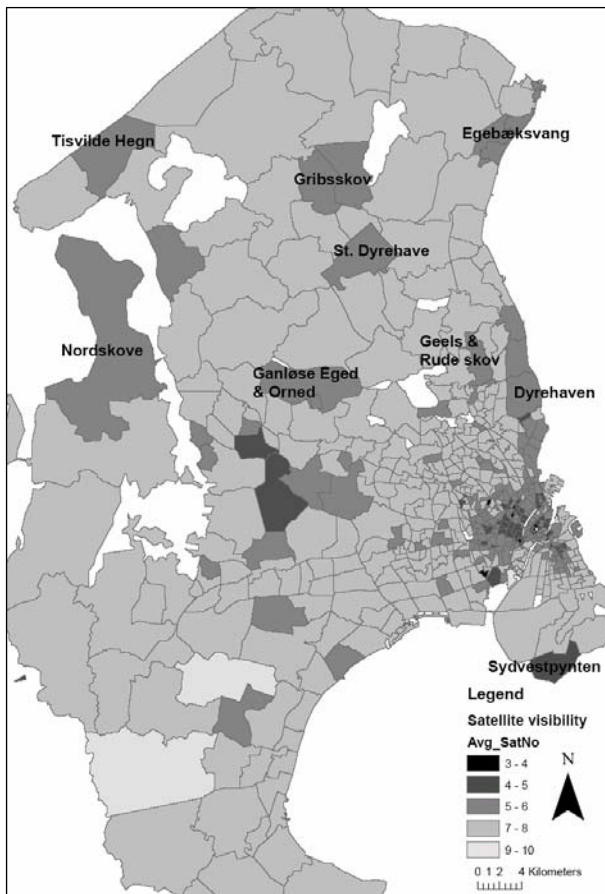
### Analyse af vejenes egnethed til roadpricing

Vejenes egnethed til roadpricing blev undersøgt på baggrund af gennemsnitlige værdier udregnet for hver vej i København. I forbindelse med roadpricing er det interessant at undersøge, hvilke veje der er egnede dertil med hensyn til satellitforholdene. En vej kan f.eks. have gode forhold i vejens ene ende, mens satellitforholdene ændres for vejens modsatte ende. Dette kan eksempelvis skyldes tværgående sideveje eller andre ændringer af de omgivende forhold. Satellitforholdene er undersøgt for vejnettet i København ved at lave en buffer (på 30 m) omkring hele vejnettet i Hovedstadsområdet. Derefter, er det gennemsnitlige satellitantal og HDOP udregnet for hver vejstrækning på baggrund af de målinger, der findes indenfor bufferen. Resultaterne er til sidst sammenlignet med bebyggelsestætheden.

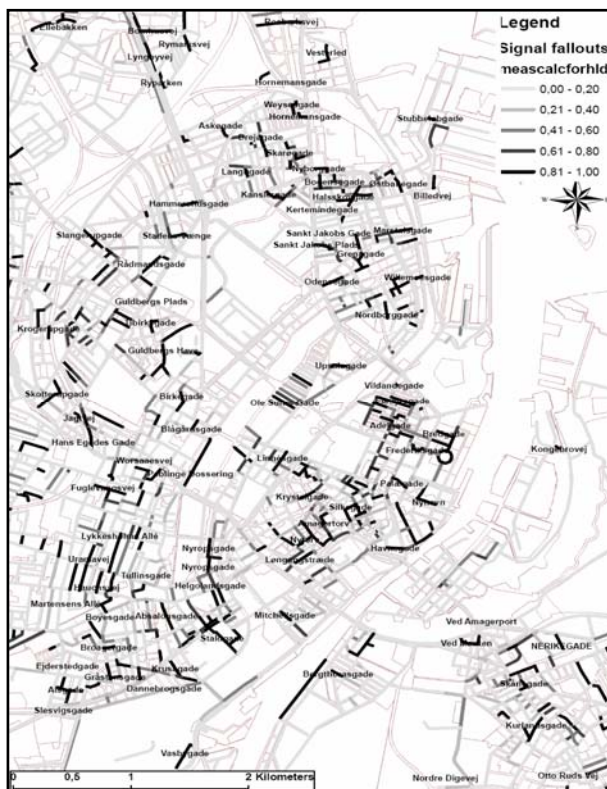


Figur 5: Gennemsnitligt satellitantal pr. vej i København (vejkort baseret på Kraks kdv geodatabase, [www.krak.dk](http://www.krak.dk))

Resultaterne viser sammenhængen mellem GPS kvaliteten og bebyggelsestætheden i København. Både for HDOP og antallet af satellitter i sigt, er værdierne dårligere i København – specielt for Brokvartererne, Frederiksberg og Indre by, hvor de kritiske områder findes (jf. figur 5). Omkring parkområderne i København, er positioneringsmuligheden bedre, idet de kritiske værdier aftager i disse områder. Endvidere viste resultaterne, at hvis 5 satellitter er i sigt, opnås en væsentlig bedre positionsbestemmelse, idet HDOP værdien derved er lavere. Ved 5 satellitter i sigt, er der en overbestemmelse i positionsbestemmelsen, der dermed sikrer en bedre nøjagtighed af positionen.



Figur 6: Lavere satellittantal i skovområder (zoner angivet med navn). Zonepolygonerne er baseret på OTMs zone kort.



Figur 7: Udfaldsprocent per vej i København. (Vejkort baseret på Kraks kvd geodatabase, [www.krak.dk](http://www.krak.dk))

Udenfor København, viste analysen, hvorledes skovområder også har indflydelse på GPS kvaliteten. Skovområderne har 5-6 synlige satellitter, men omgivelserne har 6-7 satellitter i sigt. (jf. figur 6) I disse områder er GPS forholdene dårligere end for de grønne områder i København, hvilket skyldes, den tættere beplantning af høje træer i skovområderne. I skovområderne forringes signaler på grund af multipath, der opstår når signalerne ikke modtages direkte, men bliver reflekteret på omgivende overflader. Når GPS signalerne reflekteres på store objekter, såsom træer og bygningerne, forsinkes signalerne fra satellitten, hvilket giver fejl i positioneringen. Langs hovedveje og motorveje er satellitdækningen god med undtagelse af strækninger under broer og gennem tunneler, hvor udfaldene opstår.

### Analyse af signaludfald

Idet GPS modtageren ikke kan registrere bilens position ved færre end 3 satellitter, indeholder de originale logfiler ikke oplysninger om de faktisk forekomne udfald i signalmodtagelsen. Det er derfor fundet interessant at undersøge det mapmatchede data, hvor udfaldene er registreret for hver vejstrækning.

På baggrund af dette mapmatchede data blev et forhold mellem antallet af faktiske udfald og det samlede antal GPS målinger på vejstrækningen udregnet for hver vej i København. Hvis en vejstrækning har en forholdsværdi på 1, har alle målinger på vejstrækningen således været udfald, og omvendt har der ingen udfald været på vejstrækningen hvis forholdsværdien er 0.

Disse forholdsværdier er illustreret på et vejkort i ArcGIS med henblik på at vise de områder i København, hvor udfaldene sker hyppigst (jf. figur 7). Resultaterne for et specifikt område i København er herefter blevet sammenlignet med resultaterne fra et mindre selv gjort forsøg med henblik på at bekræfte resultaterne. Figur 7 viser de veje i København, hvor der er udfald i signalmodtagelsen i over 80 % af alle tilfælde på vejen. Endvidere ses det, at de mindre sideveje har en større udfaldsprocent end de bredere veje. Størstedelen af de større trafikveje har få eller ingen udfald.

## Sammenligning med digital 3D Bymodel

På baggrund af figur 7, ses at Nansensgade har en lavere udfaldsprocent (<40 %) i den ene ende af vejen og en højere udfaldsprocent (60-80 %) i den anden ende. For dette specifikke område i centrum af København, er det valgt at sammenligne bygningsdimensionerne for disse veje for at undersøge eventuelle forskelle. Dimensionerne er hentet fra BlomInfos 3D bymodel ([www.blominfo.dk](http://www.blominfo.dk)).



For forskellige positioner i både Nansensgade og den tværgående Vendersgade, er vejens bredde og bygningshøjden i begge sider af vejen målt ved hjælp af modellen (jf. figur 8).

Figur 8: Position 1-8 til sammenligning af dimensioner for område i centrum af København. (vejkort baseret på Kraks kvd geodatabase, [www.krak.dk](http://www.krak.dk) og bygningspolygoner baseret på KMS Top10DK

I den nedenstående tabel (jf. figur 9) ses de målte dimensioner samt udfaldsprocenten. Sammenligningen viser at bygningernes højde har større indflydelse på vejens satellitdækning end selve vejbredden.

Satellitdækningen på vejen ændres ikke markant, hvis vejen kun er en smule bredere, mens en lille ændring i bygningshøjden har stor indflydelse på udfaldsprocenten.



Position	Road width	Building height, west or south side	Building height, east or north side	Signal fall-out
1	16 m	20 m	20 m	<40 %
2	16 m	19 m	19 m	<40 %
3	16 m	19 m	20 m	<40 %
4	16 m	19 m	20 m	<40 %
5	16 m	19 m	21 m	60-80 %
6	19 m	20 m	22 m	80-100%
7	19 m	21 m	20 m	80-100%
8	16 m	21 m	20 m	60-80 %

Figur 9: Sammenligning af dimensioner for område i centrum af København.

## Diskussion

På baggrund af de forskellige foretagne delanalyser, viser analyseresultaterne overordnet samme tendenser. Lukkede gaderum og tæt bebyggelse, bevirker at GPS kvaliteten forringes i København. Med hensyn til roadpricing, er resultaterne fra analysen ikke tilfredsstillende. Ved roadpricing kræves et pålideligt system, der gør det muligt at regulere trafikken ved variable kørselsafgifter, der afhænger af hvor, hvornår og hvor langt, der køres. Ved et sådan afgiftssystem, kan fuldstændig "fair" prissætning kun opnås, hvis positionsbestemmelsen af bilerne er tilstrækkelig nøjagtig. GPS kvaliteten på vejene i København skal være bedre, hvis et roadpricingssystem med variable afgifter, skal fungere optimalt. Som det fremgår af analysen, afhænger GPS kvaliteten af bebyggelsestætheden, hvorfor problemområderne primært findes i de tættest bebyggede områder, hvor trafikken netop skal reguleres og ledes væk fra.

## Indflydelse på systems udformning

Afhængigt af detaljeringsgraden stilles forskellige krav til positionsbestemmelsen. Hvis takststrukturen skal baseres på enkeltstrækninger eller efter vejklasser/typer, stilles de største nøjagtighedskrav, da det i disse tilfælde er nødvendigt, at bestemme den præcise rute, hvorpå der køres. Selvom der på de større trafikveje i København var få udfald under AKTA-forsøget, er problemerne ikke løst, idet der på mange af de omkringliggende sideveje var udfald i signalmodtagelsen, ved hver måling på vejen. Problemet opstår, når der ikke kan takseres for kørsel på de små veje i lokalområderne. Selvom der er væsentlig færre kørte ture på de små veje, har deres virke stor betydning for systemets pålidelighed.

Hvis der i København findes veje, hvor takseringen ikke fungerer optimalt, kan der forstilles en situation, hvor bilisterne bevidst vælger at køre ad mindre veje for at undgå opkrævning. Ved udfald under broer og gennem tunneler er problemet mindre, dels forbi udfaldet vil være kortvarigt og dels fordi den kørte strækning, vil være entydig, da der typisk ikke er frakørselsmuligheder.

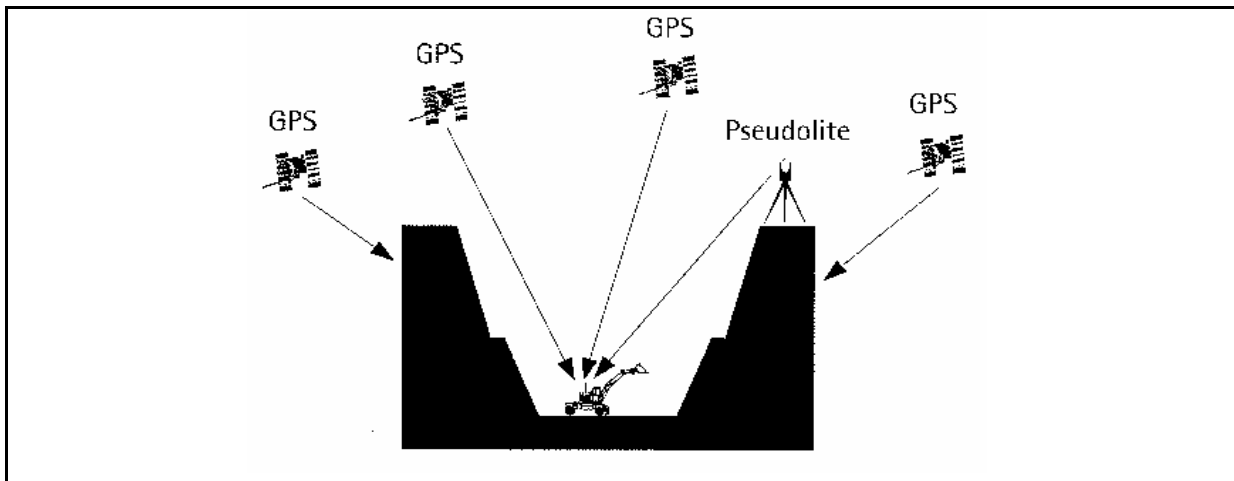
Forstilles en mindre detaljeret takststruktur baseret på betalingszoner, stilles der mindre krav til positionsnøjagtigheden. Ved et sådan system, er det ikke nødvendigt at vide, hvilken rute der præcist køres på, men i hvilken zone bilen befinder sig. I dette tilfælde opstår problemerne omkring zonegrænserne, hvor det er nødvendigt at vide, hvilken zone, den kørende bil befinder sig i. Ved denne løsning, vil det være nødvendigt at indføre bufferzoner omkring takstgrænserne, da positionsbestemmelsen er forbundet med en vis unøjagtighed. Bufferzonerne vil dermed sikre at der ikke fejltakseres i systemet.

En anden mulighed er at placere zonegrænserne strategisk i områder eller på veje, hvor der ikke er kritiske GPS forhold. På baggrund af de udarbejdede kort, der viser gennemsnitlige værdier pr. vej (jf. figur 5) eller udfaldene i GPS modtagelsen (jf. figur 7), vil det være muligt at udpege de områder eller veje, hvor zonegrænserne eksempelvis kan placeres for at minimere risikoen for fejltaksering. Når der i betalingszonesystemet takseres efter hvilken zone, en pågældende bil befinder sig i, opstår der tilsvarende problemer på de mange små sideveje, hvor der ved alle målinger var udfald i positionsbestemmelsen. På disse små veje opstår det største problem, når den pågældende bil har parkeret og GPS modtageren har været slukket i længere tid. Selvom bilens sidste position er gemt, vil GPS modtageren når bilen (og GPS enheden) starter op, ikke kunne modtage satellitsignaler og deraf beregne sin næste position. Hvis positionen ikke kendes, kan den tilhørende betalingszone ikke bestemmes, hvorfor takseringen ikke bliver korrekt. Ved takstsystemet baseret på enkeltstrækninger, vil problemet være tilsvarende, idet takseringen ikke kan foregå for en bil, der ikke er tilknyttet en vej.

### **Forbedringsforslag**

Positionsbestemmelsen kan forbedres, hvis GPS enheden integreres med andre positioneringssystemer, som f.eks. et Kalmanfilter (Cederholm, P., 1999). Filteret sammenholder de seneste målinger med de sidst udregnede positioner og på baggrund af en statistisk vægtning af disse, bliver positionsnøjagtigheden forbedret. En anden fordel ved Kalmanfilteret er, at der kan beregnes en position, selvom der ikke er kontakt til satellitterne i sigt. Kalmanfilteret er allerede integreret i de fleste håndholdte GPS modtagere.

Et supplementsystem til GPS er pseudolit systemet (kort for pseudosatellit). En pseudolit er en landbaseret elektronisk enhed, der transmitterer et GPS lignende signal, som kan modtages af en GPS modtager. Tilføjelsen af pseudolit signaler forbedrer satellitdækningen og satellitgeometrien, hvorfor også positionsnøjagtigheden bliver bedre. Antallet af pseudolitter og placeringen af disse kan vælges efter behov. Ved integration af GPS og pseudolit systemet, vil det integrerede system eksempelvis kunne anvendes i forbindelse med roadpricing i tætte byer. Ved placering af pseudolitterne på tagene i Københavns kritiske gader, kunne forstilles en forbedring af satellitdækningen og positionsangivelsen i disse områder (jf. figur 10).



Figur 10: GPS/Pseudolit system til brug ved eksempelvis roadpricing ved placering af enheden på tagene i København (El-Rabbany, A., 2002)

Positionsnøjagtigheden kan tilsvarende forbedres ved integration af fremtidige GNSS- og hjælpesystemer, der p.t. er under udvikling. Fordelene ved at modernisere gamle systemer og udvikle nye, ligger i samarbejdet mellem systemerne. Modtagere, der er integreret mellem systemerne, har en række fordele. Grundet de flere satellitter, er modtageren givetvis mere pålidelig, men er også mere robust overfor jamming og interferens.

GLONASS er globalt navigations system udviklet af Sovjetunionen ([www.glonass-center.ru](http://www.glonass-center.ru)). Systemet har meget til fælles med det amerikanske NAVSTAR system og består af 24 satellitter, hvoraf 7 p.t. kredser om Jorden. GLONASS systemet er under videreudvikling og en ny generation af satellitter designes med henblik på at gøre systemet fuldt operationelt igen. Den nye generation af satellitter vil være forbedret og i stand til at transmittere civilkoden på både L1 og L2, i overensstemmelse med NAVSTAR systemet. De nye satellitter forventes lanceret i 2006. Problemet ved en integration af NAVSTAR og GLONASS er, at NAVSTAR og GLONASS anvender forskellige referencesystemer, til at angive satellitternes position. NAVSTAR anvender WGS84, mens GLONASS anvender PZ-90. Endvidere anvender de to systemer forskellige reference tider. Der er udviklet en transformationsmulighed mellem de to systemer (Boucher, C. et al, 2001).

GALILEO er Europas svar på NAVSTAR og udvikles af Europa Kommissionen i samarbejde med ESA (European Space Agency, [www.esa.int](http://www.esa.int)). Systemet er et civilkontrolleret system, der udvikles uafhængigt af militære interesser, med udgangspunkt i det amerikanske militærs tilbageholdelse af præcision for civile brugere. Det fuldt udviklede Galileo system består af 30 satellitter, fordelt i 3 baner om Jorden. Den første satellit skal opsendes senest d. 13. februar 2006. Galileo systemet vil være interoperabelt med både GLONASS og NAVSTAR. En civil bruger kan således ved sin ene GPS modtager, bestemme positionen ud fra enhver kombination af de tre systemers satellitter.

Indtil disse GNSS systemer er færdigudviklede, kan brugen af regionale hjælpesystemer være gavnlige. Et regionalt hjælpesystem er typisk et system bestående af geostationære satellitter kombineret med en eller flere satellitkonstellationer (NAVSTAR eller GLONASS) og endnu flere stationære GPS modtagere på Jorden. Systemet fungerer i få ord ved at de mange stationære GPS modtagere på Jorden samarbejder med satellitterne fra GNSS systemet. Det regionale hjælpesystem mindsker altså de fejl, der forstyrrer satellitsignalerne og sikrer derved en bedre positionsnøjagtighed ned til omkring 3-5 meter. Forskellige hjælpesystemer er under udvikling, som en del af GNSS.

I Europa er netop udviklet (2004) et regionalt hjælpesystem, EGNOS, i samarbejde mellem ESA (European Space Agency), Eurocontrol (Den Europæiske Organisation for Luftfartens Sikkerhed) og Europa Kommissionen. EGNOS er baseret på både NAVSTAR og GLONASS og dækker foreløbigt Europa og Nordafrika. Systemet består af 3 geostationære satellitter og et netværk af referencestationer på Jorden. EGNOS fungerer ved at transmittere signaler, der indeholder informationer om positioneringssignalernes pålidelighed og nøjagtighed. Ved EGNOS hjælpesystemet kan brugere få forbedret positionsnøjagtigheden fra de tidligere ca. 20 meter til 5 meter i dag ([www.esa.int](http://www.esa.int)).

De forskellige hjælpesystemer vil, når de er færdigudviklet, forbedre positioneringen i de pågældende regioner. De forventes, at de mange regionale hjælpesystemer med tiden vil blive sammenkoblet og interoperable. Et sammenkædet system af regionale hjælpesystemer, vil supplere GNSS systemet og forbedre positionsnøjagtigheden væsentligt overalt på Jorden.

## **Konklusion og perspektivering**

Dataanalysen har vist sammenhængen mellem GPS kvaliteten og bebyggelsestætheden i København. Både for kvaliteten af hvert signal (HDOP) og antallet af satellitter i sigt, er værdierne dårligere i København – specielt for Brokvartererne, Frederiksberg og Indre by, hvor de kritiske områder findes. Omkring grønne områder i København aftog de kritiske værdier.

Resultaterne viste, at det primært var de mindre sideveje, der havde udfald. De faktiske udfald under AKTA forsøget, stemte godt overens med de anslået kritiske områder. Det blev endvidere vist, bygningshøjderne har stor betydning for satellitdækningen i gaden, mens vejens bredde har mindre betydning.

Udenfor København, viste analysen, hvorledes skovområder med tætte træer også har indflydelse på GPS kvaliteten. I disse områder er GPS forholdene dårligere end for de grønne områder i København, hvilket skyldes, den tættere beplantning af høje træer i skovområderne. Langs hovedveje og motorveje er satellitdækningen god med undtagelse af strækninger under broer og tunneler, hvor udfaldene opstår.

På baggrund af flere foretagne delanalyser, viser analyseresultaterne overordnet samme tendenser. De lukkede gaderum og tæt bebyggelse, bevirker at GPS kvaliteten forringes i København. Med hensyn til roadpricing, er GPS kvaliteten ikke tilfredsstillende. Ved roadpricing kræves et pålideligt system, der gør det muligt at regulere trafikken ved variable kørselsafgifter, der afhænger af hvor, hvornår og hvor langt, der køres. Som det fremgår af analysen, afhænger GPS kvaliteten af bebyggelsestætheden, hvorfor problemområderne primært findes i de tættest bebyggede områder, hvor trafikken netop skal reguleres og ledes væk fra.

En forbedrende mulighed er at placere betalingszonegrænserne strategisk i områder eller på veje, hvor der ikke er kritiske GPS forhold. På baggrund af de udarbejdede kort, vil det være muligt at udpege de områder eller veje, hvor zonegrænserne eksempelvis kan placeres for at minimere risikoen for fejltaksering.

Positionsbestemmelsen kan yderligere forbedres, hvis GPS enheden integreres med andre positioneringssystemer. Både Kalmanfiltrering samt forskellige andre positioneringssystemer kan forbedre positionsbestemmelsen, idet systemerne overtager positionsbestemmelse i de tilfælde hvor GPS enheden ikke har tilstrækkeligt antal satellitter i sigt.

Indenfor den nærmeste fremtid, vil flere GNSS- og hjælpesystemer træde i funktion, hvilket vil forbedre positionsnøjagtigheden specielt i tæt bebyggede områder. Fordelene ved at modernisere gamle systemer og udvikle nye, ligger i samarbejdet mellem systemerne. Modtagere, der er integreret mellem systemerne, har en række fordele. Grundet de flere satellitter, er modtageren givetvis mere pålidelig, men er også mere robust overfor jamming og interferens. Integrerede hjælpesystemer i andre lande, har vist at have en forbedrende effekt. Simulationsundersøgelser har tilmed vist, hvorledes de integrerede hjælpesystemer forbedrer satellitdækningen i storbyer med væsentlig højere bebyggelse end i København.

Den samlede vurdering af GPS kvaliteten til roadpricing er, at GPS dækningen i København umiddelbart ikke er tilstrækkelig. Grundet de mange udfald i positionsbestemmelse, samt de anslåede kritiske områder i København, vil der ved indførelse af et GPS-baseret roadpricingssystem, opstå en række problemer i forbindelse med betaling for hver kørte kilometer. Problemerne og omfanget af disse, vil givetvis afhænge af kørselsafgiftssystemets udformning.

## Referencer

Zabic, M.

**En GIS-analyse af GPS-kvalitet til Roadpricing.**

Eksamensprojekt ved CTT, DTU, November 2004.

Boucher, C.; Altamimi, Z.

**ITRS, PZ-90 and WGS84: Current Realizations and the Related Transformation Parameters.**

*Journal of Geodesy*, vol. 75, 2001. p. 613-619.

Cederholm, P.

**Kalmanfiltrering af GPS positioner.**

Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Aalborg Universitet.

*Landinspektøren Nr. 3-99*, oktober 1999, p. 408-415.

El-Rabbany, A.

**Introduction to GPS – The Global Positioning System.**

Artech House, London, 2002.

Nielsen, Otto Anker; Kristensen, Jens Peder & Würtz, Christian.

**Using GPS for road pricing – Experiences from Copenhagen.**

*19<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Session: PS 117. Madrid, November 2000.

*Tak til BlomInfo A/S og Stadskonduktørembedet i Københavns Kommune for lån af 3D Bymodellen for Nørrevold Kvarter i København.*