



Et vejafhængigt kørselsafgiftssystem

- baseret på satellitpositionering

Aalborg Universitet

Det Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakultet

B-sektor | Vej- & trafikteknik | 10. semester

Afgangsprojekt af Simon Bojer Sørensen

2007
november

Aalborg Universitet

Det Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakultet
B-sektor | Vej- og Trafikteknik | Fibigerstræde 11 - 9220 Aalborg Øst

| | |
|-----------------------------|--|
| Titel: | Et vejafhængigt kørselsafgiftssystem - baseret på satellitpositionering <i>A road dependent toll collection scheme - based on satellite positioning</i> |
| Projektperiode: | 10. semester - afgangprojekt (speciale) <i>Final Thesis</i> |
| Aflevering: | 30. november 2007 |
| Projektansvarlig: | Simon Bojer Sørensen |
| Vejleder: | Harry Lahrmann |
| Oplagstal: | 5 |
| Sideantal: | 102 sider |
| Heraf appendiks: | 7 sider |
| Bilag: | CD-bilag vedlagt |
| Forsideillustration: | DDO®land 2004. Ophavsrettigheder: COWI A/S |

Forord

Denne rapport er udarbejdet på B-sektorens 10. semester ved Aalborg Universitet med specialisering inden for Vej- og Trafikteknik.

Rapporten er et afgangsprøve (speciale), og ifølge studieordningen skal projektenheden sætte den studerende i stand til på en selvstændig måde at planlægge og gennemføre et projektarbejde omfattende empiriske og/eller teoretiske undersøgelser af en eller flere problemstillinger inden for centrale emner af specialiseringen.

Jeg vil gerne rette en stor tak til følgende personer, som har været meget behjælpelige i forbindelse med at få installeret OBU'er i nogle taxaer i København:

- Henrik Sylvan og Brian Hansen, Københavns Kommune
- Steen Dahl Andersen, Taxa 4x35, Vanløse
- Peter Ishøj, Ishøj Autoelektro, Vanløse

Desuden vil jeg gerne takke Poul Heide fra M-tec i Pandrup for altid at være behjælpelig, når der har været spørgsmål eller anden brug for hjælp vedrørende dataindsamling.

Endeligt vil jeg takke Nerius Tradišauskas, Ph.d. studerende på AAU, for det stykke arbejde, han har gjort for at opsætte databaser og for at hjælpe med diverse SQL-forespørgsler.

Det anbefales at læse hele rapporten i sin sammenhæng. Hvis læseren ikke er bekendt med de grundlæggende principper og begreber om satellitpositionering, kan appendikset herom dog med fordel læses inden kapitel 2 påbegyndes.

November 2007

Simon Bojer Sørensen

Resumé

I det følgende gives et resumé af rapportens indhold på dansk. På næste side er der et tilsvarende resumé på engelsk.

Denne rapport tager udgangspunkt i et 9. semesterprojekt, hvor fokus lå på at redegøre for fordele og ulemper ved et satellitbaseret kørselsafgiftssystem i forhold til andre afgiftssystemer. I denne rapport er der taget et skridt videre, og fokus er nu koncentreret udelukkende om kørselsafgifter baseret på satellitpositionering.

Satellitpositionering har mange fordele, men også en betydelig ulempe: Teknologien endnu ikke så udviklet, at positioneringen kan foregå problemfrit. Dette besværliggør brugen af teknologien i kørselsafgiftssystemer, da der her er krav om stor nøjagtighed og pålidelighed.

Satellitpositioneringen giver ellers i teorien mulighed for at indkræve vejafhængige kørselsafgifter, og det er ikke nødvendigt at opføre store betalingsanlæg eller på anden måde gøre indgreb i infrastrukturen.

Der forskes flere steder i verden i satellitbaserede kørselsafgiftssystemer, og der er gennemført en række forsøg. Senest har man i Seattle gennemført et projekt, hvor et antal forsøgsdeltagere kørte med en OBU i bilen for at se, hvor meget deres kørevaner blev påvirket af afgifter.

Ofte strander planerne om et satellitbaseret kørselsafgiftssystem, fordi teknologien ikke kan opfylde de opstillede krav.

Det er i dette projekt forsøgt at opbygge en model af et kørselsafgiftssystem, som kan beregne en nøjagtig afgift på trods af problemerne med satellitpositioneringen. Modellen er afprøvet ved at anvende egne indsamlede data fra en række taxaer i København.

Resultaterne er gode, og ikke mindst bedre end resultaterne for en tilsvarende model i 9. semesterprojektet. Priserne for 50 tilfældige ture afviger i prøverne mellem -2,63 % og 3,74 % i forhold til de korrekte priser, og kvartilerne ligger på -0,91 %, -0,54 % og -0,05 %. Der er altså en meget lille spredning på afvigelserne, og de fleste afvigelser går nedad og rammer derved ikke bilisten.

Summary

In the following there is summary of this report. There is a similar summary in Danish on the previous page.

This report is based on a 9th semester project which had its focus on accounting for advantages and disadvantages about a satellite based road pricing system compared to other types of toll collection systems. This report is taken to the next level and is only focusing on road pricing based on satellite positioning.

Satellite positioning has many advantages, but also a major disadvantage: The technology is not yet fully developed, so that positioning can be done without trouble. This complicates the use of the technology in road pricing systems, because they require great accuracy and reliability.

With the use of satellite positioning it is in theory possible to collect road dependent tolls, and it is not necessary to build huge toll facilities or in other ways make interventions in the infrastructure.

Around the world research is done on satellite based road pricing, and there have been made several trials. Latest in Seattle a research project was completed, where a number of participants had a OBU in their cars to see how their driving habits were affected by the road pricing.

Often plans about satellite based road pricing are scrubbed because the technology cannot fulfill the requirements.

In this project it has been tried to build up a model of a road pricing system that is able to calculate an accurate charge regardless of the trouble with the positioning. The model is tested by using collected GPS data from a series of taxis in Copenhagen.

The results are good and especially better than the results from a test of a similar model build in the 9th semester project. The charges for 50 random trips differ in the tests between -2.63 % and 3.74 % from the correct charge, and the quartiles are -0.91 %, -0.54 % and -0.05 %. That means there is only little scattering on the deviations, and mostly it goes the right side so the motorist is not affected.

Indholdsfortegnelse

| | |
|--|-----------|
| Resumé | 7 |
| Summary | 9 |
| Indholdsfortegnelse | 10 |
| 1. Indledning | 13 |
| 1.1. Trængselsproblemer | 13 |
| 1.2. Kørselsafgifter i Danmark | 14 |
| 1.3. FORTRIN og AKTA | 14 |
| 1.4. Projekt på 9. semester | 15 |
| 1.5. Initierende problem | 15 |
| 2. Satellitpositionering og kørselsafgifter | 17 |
| 2.1. Generelt | 17 |
| 2.2. Et ideelt kørselsafgiftssystem | 18 |
| 3. Erfaringer med kørselsafgiftssystemer | 23 |
| 3.3. GPS-forsøg i London | 29 |
| 3.4. AKTA-forsøget i København | 34 |
| 3.5. En GIS-analyse af GPS-kvalitet (AKTA) | 40 |
| 3.6. Undersøgelse af reaktioner på kørselsafgifter | 50 |
| 3.7. Opsummering | 53 |
| 4. Projekt på 9. semester | 57 |
| 4.1. Formål | 57 |
| 4.2. Datakvalitet | 57 |
| 4.3. Afprøvning af model | 59 |
| 4.4. Konklusion | 62 |
| 5. Problemanalyse | 63 |
| 5.1. Grundlæggende problemstillinger | 63 |
| 5.2. Scenarier | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Problemformulering | 67 |
| 6.1. Overordnet problemstilling | 67 |
| 6.2. Metode | 67 |
| 6.3. Kravspecifikation | 67 |
| 7. Model af kørselsafgiftssystem | 69 |
| 7.1. Konfiguration af takststruktur | 69 |
| 7.2. Logdata | 72 |
| 7.3. Opbygning af model | 77 |
| 7.4. Afprøvning af model | 78 |
| 8. Resultater | 79 |
| 8.1. Afprøvningsdata | 79 |
| 8.2. Prisafvigelser | 80 |
| 9. Vurdering | 83 |
| 9.1. Opfyldelse af målsætninger | 83 |
| 9.2. Acceptable afvigelser | 83 |
| 10. Konklusion | 85 |
| 10.1. Om rapporten | 85 |
| 10.2. Vigtige pointer | 85 |
| 10.3. Vigtige resultater | 86 |
| Litteraturliste | 87 |
| Appendiks 1: Satellitpositionering | 95 |
| A1.1. Generelt | 95 |
| A1.2. Teknikken | 96 |

CD-bilag vedlagt bagest i rapporten.

1. Indledning

I indledningen præsenteres motivationen for at skrive denne rapport. Kapitlet afsluttes med opstilling af et initierende problem.

1.1. Trængselsproblemer

I løbet af de seneste år er vejene flere steder i Danmark begyndt at blive overfyldte, og mere og mere af danskernes tid tilbringes i trafikken. Problemerne er størst i hovedstadsområdet, mellem Odense og Middelfart, i Trekantsområdet, i Århus samt i Aalborg ved Limfjordstunnelen, hvor der alle steder dagligt er lange køer i myldretiden.

Den stigende trafik har i København medført, at den gennemsnitlige rejsehastighed i myldretiden er faldet fra 36 km/t i 1982 til 27 km/t i 2005 [Miljøkontrollen, 2007]. I hele hovedstadsområdet giver trængslen forsinkelser på 100.000 timer i døgnet [COWI, 2004]. Beregninger viser, at tidsspildet på landsplan årligt koster samfundet 13 milliarder kroner. [Fyens Stiftstidende, 2006].

Det er ikke kun i Danmark, at der er trængsel på vejene. I adskillige storbyer i udlandet har man kendt til disse problemer i årtier. Mange steder er vejnettet blevet udbygget til det maksimale, uden at problemerne derved er blevet fjernet. Det har derfor været nødvendigt at se på andre løsningsmuligheder. I den sammenhæng er forskellige former for kørselsafgiftssystemer blevet afprøvet og nogle steder implementeret.

I Singapore indførtes i 1975 som det første sted i verden et kørselsafgiftssystem. Resultaterne var med det samme meget positive, og systemet har siden fungeret med stor succes. Det har dog gennemgået nogle forandringer og moderniseringer siden midten af 1990'erne.

I Europa har storbyer som Firenze, Rom, London og Stockholm samme gode erfaringer med at nedbringe trafikken ved hjælp af kørselsafgifter. Flere norske byer har også i mange år taget betaling for kørsel på vejene, men her har formålet primært været at skabe finansieringsgrundlag for nødvendige broer og tunneler samt andre trafikale tiltag. [KeyResearch, 2005]

»Ved anlæg af motorveje får man kun ét usvigeligt resultat – stigende biltrafik, og ti år efter må der derfor anlægges endnu en motorvej.«

John Whitelegg,
engelsk trafikforsker

Kilde: [NOAH, 2001]

1.2. Kørselsafgifter i Danmark

Debatten i Danmark har i de seneste år især gået på, om bilister i Københavnsområdet skal afkræves betaling for kørsel på vejene. Københavns Kommune med teknik- og miljøborgmester Klaus Bondam (R) og overborgmester Ritt Bjerregaard (S) i spidsen er begejstret for idéen, da en begrænsning af vejtrafikken både vil kunne mindske den massive trængsel og bidrage til et renere miljø i hovedstaden.

En mere omfattende mulighed, som hovedsageligt diskuteres i fagkredse, er et landsdækkende kørselsafgiftssystem. Grundprincippet er, at dele af de bilafgifter, der er ved anskaffelse af en bil, erstattes af en forbrugsafhængig kørselsafgift. I rapporten *Ændring af bilafgifter* [Miljøstyrelsen, 2007], fremlægges beregninger af fordelene ved et sådant system. Det konkluderes, at de samfundsmæssige gevinster ved reduktion af trængsel og forurening langt overstiger det samlede velfærdstab, der er forbundet med indførelse af kørselsafgifter.

VK-regeringens skattepolitik er imidlertid ikke forenelig med kørselsafgifter. Hos Venstre er man af den holdning, at kørselsafgifter begrænser samfundets mobilitet og dermed konkurrenceevnen og velfærden. Hos Det Konservative Folkeparti er man som udgangspunkt positive over for et landsdækkende system, men man mener ikke, at teknologien vil være klar før om 10-15 år. Et lokalt afgiftssystem i eksempelvis København kan dog ikke komme på tale hos de konservative, idet det vil være at regne som en straf for de bilister, som tilfældigvis arbejder eller bor i det pågældende område. [Ingeniøren, 2007 a]

1.3. FORTRIN og AKTA

Idéen om et kørselsafgiftssystem i Danmark er imidlertid ikke ny. Allerede i slutningen af 1990'erne blev forskningsprogrammet FORTRIN gennemført med det formål at vurdere de trafikale effekter af et variabelt kørselsafgiftssystem. Forskningsprogrammet blev gennemført i årene 1997 til 2001 på Center for Trafik og Transport ved Danmarks Tekniske Universitet med finansiering fra Transportrådet og Trafikministeriet.

I FORTRIN blev et kørselsafgiftssystem med kilometertaksering beskrevet og defineret, og forskellige takststrukturer blev undersøgt. Dette arbejde gik under betegnelsen *Afgifter i Københavns trafik*, og ved afslutningen på forskningsprogrammet blev det videreført til et praktisk forsøg under navnet AKTA, som blev gennemført i årene 2000 til 2004.

AKTA-forsøget var desuden det danske bidrag til det EU-støttede PROGRESS-projekt, hvor København deltog sammen med syv andre euro-

pæiske byer. Hovedformålet med PROGRESS var at undersøge effektiviteten og den offentlige accept af et kørselsafgiftssystem.

En holdningsundersøgelse blandt københavnske borgere viste dengang, at 65 % var positive over for et kørselsafgiftssystem [Københavns Kommune, 2005 b], mens tilslutningen blandt AKTA-forsøgets 500 deltagere var 68 % ved forsøgets start og 54 % ved forsøgets afslutning. På trods af faldet var langt størstedelen af forsøgsdeltagerne efter forsøgets afslutning dog ikke i tvivl om, at kørselsafgifter ville have en gavnlig effekt på trafikken [Københavns Kommune, 2005 c].

Rent praktisk viste AKTA-forsøget, at det ved hjælp af kørselsafgifter var muligt at ændre forsøgsdeltagernes transportvaner, og resultaterne var endda bedre, end forudgående modelberegninger havde givet håb om [Københavns Kommune, 2005 d].

Læs mere om AKTA-forsøget i afsnit 3.4 og 3.5.

1.4. Projekt på 9. semester

På mit 9. semester omhandlede projektarbejdet også satellitbaserede kørselsafgiftssystemer. Fokus lå her dels på at redegøre for fordelene ved et satellitbaseret system, og dels på at udvikle en simpel satellitbaseret afgiftsmodel til efterfølgende afprøvning.

Modellen viste sig at kunne bestemme kørselsafgifterne med rimelig nøjagtighed. Den beregnede pris for en tur afveg i mere end 80 % af tilfældene mindre end +/- 2 % fra den korrekte pris. Desuden viste resultaterne, at det var muligt at kontrollere at prisafvigelse primært skete til den rigtige side (altså at prisen blev billigere), således at bilisterne ikke ville blive snydt.

Der er i nærværende rapport medtaget tekst og materiale fra 9. semester-rapporten, hvor det er relevant. Desuden præsenteres resultater og konklusioner fra 9. semester-projektet i kapitel 4.

1.5. Initierende problem

Baggrunden for at arbejde med samme emne som projektet på 9. semester er en vision om at kunne forbedre resultaterne ved at raffinere modellen og/eller at benytte mere nøjagtige dataindsamlingsapparater. Desuden kan det overvejes hvor nøjagtig et kørselsafgiftssystem egentlig behøver at være.



2. Satellitpositionering og kørselsafgifter

Som introduktion til rapporten beskrives i dette kapitel, hvordan satellitpositionering kan anvendes i et kørselsafgiftssystem.

2.1. Generelt

Der findes forskellige typer af kørselsafgiftssystemer, som hver især har sine fordele.

Fordelene ved et satellitbaseret system er mange. Blandt andet giver det mulighed for at opkræve afgifter, som er afhængige af den kørte distance (kilometertaksering), af lokaliteten og af tidspunktet. Dertil kommer, at systemet ikke kræver nogen eller kun meget få installationer langs vejnettet og derfor ikke kræver indgreb i infrastrukturen.

Ved kilometertaksering forstås et system, hvor der betales for den kørte distance. I den simpleste form betales samme kilometertakst over alt.

I et ideelt kilometertakseringssystem opdeles byen eller området i zoner med forskellige takster, eller vejene prissættes enkeltvis. Udover at taksterne differentieres i forhold til zoner, afhænger de altså også af vejenes størrelser, status og anvendelse.

Kilometertaksering giver i sagens natur mulighed for at opnå en meget nuanceret taksering og have en optimal styring af trafikken.

2.1.1. Virkemåde

I de enkelte køretøjer installeres en lille computer – en såkaldt On-Board Unit (OBU), som ved hjælp af GNSS hele tiden kan bestemme den aktuelle geografiske position.

Distancen bestemmes enten på baggrund af GNSS-positionerne og en eventuel map matching, eller den beregnes ud fra bilens odometer.

Prisen for en køretur beregnes af OBU'en på baggrund af et digitalt kort, som bl.a. kan indeholde zonegrænser og veje samt takster for de enkelte elementer. Herefter sendes informationen til en central server gennem en indbygget telefonenhed, så der efterfølgende kan opkræves betaling.

Der er imidlertid visse udfordringer forbundet med at bygge et kørselsafgiftssystem på satellitpositionering. Satellitdækningen er ikke altid

tilstrækkelig til at bestemme en position, og præcisionen er svingende. Hvad disse forhold skyldes, belyses i appendiks 1 om satellitpositionering.

2.1.2. EU-direktiv

I foråret 2004 fremsatte EU et direktiv (2004/52/EF) [EU, 2004], som fastlægger hvilke metoder, der må anvendes i nye kørselsafgiftssystemer efter 1. januar 2007. EU tillader både satellitpositionering og Bizz, men anbefaler dog satellitpositionering.

Direktivet sigter mod en standardisering, som betyder, at europæiske bilister kun skal have installeret én OBU (med understøttelse af både satellitpositionering og Bizz) og kun får én faktura for kørsel på afgiftsbelagte veje i hele EU.

2.2. Et ideelt kørselsafgiftssystem

I dette afsnit beskrives to scenarier med satellitbaseret kilometertaksering. Først et nationalt system og dernæst et lokalt system.

2.2.1. Nationalt

I hele landet indføres et satellitbaseret afgiftssystem med kilometertaksering. Alle biler skal efter en overgangsperiode have installeret en OBU, som registrerer al kørsel, beregner prisen og sender oplysningerne via en indbygget telefonenhed til en central server. Herfra sendes med fast interval en faktura til bilejeren.

For at undgå uoverensstemmelser om prisen på en tur lagres hver enkelt tur som udgangspunkt på serveren i en vis periode. Ønsker bilisten ikke denne lagring, kan han acceptere prisen for den netop overståede tur ved at trykke på en knap på OBU'en.

Kørselsafgiftssystemet skal gøre det ud for dele af det nuværende afgiftssystem. Således skal registreringsafgiften, ejerafgiften og benzinafgiften nedsættes eller afskaffes.

Taksterne i det nye kørselsafgiftssystem skal fastsættes, så den samlede biltrafik nedsættes. Da bilejerskabet utvivlsomt vil stige ved en nedsættelse af registreringsafgiften, skal den gennemsnitlige kørsel pr. bil nedsættes. For at sikre dette må der samlet set indkræves en højere afgift eller sagt på en anden måde: Statens provenu må nødvendigvis være højere.

Takstsystemet kan eksempelvis bestå af tre zonetyper og tre vejtyper, således at der er ni forskellige takstniveauer (figur 1). Nogle af takstniveauerne kan eventuelt have samme takst. Billigst er det at køre uden for byområder på de store primærruter, og dyrest er det at køre i centrum af de største byer på de små veje.

| | Land | By | Tæt by |
|-----------------------|------|----|--------|
| Primære veje | 1 | 2 | 3 |
| Sekundære veje | 4 | 5 | 6 |
| Lokale veje | 7 | 8 | 9 |

Figur 1. Eksempel på takststruktur. Jo mørkere nuance, desto højere takst.

Nogle af takstniveauerne kan eventuelt have samme takst, som her er symboliseret ved nuancen på den grå farve.

Egen figur efter kilde: [Lahrman, 1999]

Derudover er der en myldretidsfaktor, som er højest i myldretiden og lavest i de timer, hvor der er mindst trafik. Endvidere skal en "koldstartsafgift" begrænse antallet af korte ture, og dermed skåne miljøet og flytte flere ture over på cykel eller gang. OBU'ens software og elektroniske tariffkort opdateres løbende ved at sende data via den indbyggede mobiltelefon.

For at imødekomme snyd kobles OBU'en til bilens odometer. På den måde kan bilens reelle tilbagelagte distance sammenlignes med den ud fra GNSS målte distance. Endvidere skal systemet installationer kontrolleres i forbindelse med bilens obligatoriske syn.

Systemet kan også anvendes på broerne, og på sigt vil også andre lande indkræve kørselsafgifter på samme måde.

Udenlandske bilister kan enten køre gratis i Danmark (bortset fra afgifterne på broerne), eller de kan blive opkrævet afgift ved at skulle købe en vignet eller ved at skulle betale for krydsning af grænsen. Alternativt kan de leje en GNSS OBU ved indkørsel til landet og så betale ved returløb ved udkørsel fra landet.

Forud for systemets ibrugtagning skal der etableres flere og bedre kollektive transportmuligheder, så der er et alternativ til at køre i bil og betale kørselsafgifter. Dette gælder især i og omkring tætte byområder, hvor taksten er høj.

Indførelse af et sådant landsdækkende kørselsafgiftssystem skal ske over en årrække for at undgå pludselige værdiforringelser af biler. Således startes med at fjerne de nuværende afgifter på nye biler, som derimod skal have indbygget udstyret til registrering af kørselsafgifter. Hvert år

herefter installeres udstyret i biler af stigende alder, indtil alle biler kører med udstyret.

En indirekte gevinst ved et landsdækkende kørselsafgiftssystem, hvor bilafgifterne nedsættes eller afskaffes, er, at folk vil være mere villige til at skifte den gamle bil ud med en ny. Det medfører, at bilparken i højere grad vil være tidssvarende, og det har stor betydning for trafikikkerheden. Nyere biler har nemlig færre fejl end gamle, og de har langt bedre sikkerhedssystemer indbygget.

2.2.2. Lokalt

I en storby som København eller Århus indføres et satellitbaseret afgiftssystem med kilometertaksering. Alle biler, som er indregistreret inden for områdets grænse, skal have installeret en OBU, som udover GNSS-modulet også skal indeholde en Bizz. Bilister bosat uden for området kan benytte en almindelig BroBizz, eller de kan få installeret en OBU. Bilister, som ikke har nogen af delene, får fotograferet nummerpladen. For at hæve incitamentet til at benytte en OBU, sættes prisniveauet højt for at krydse systemgrænsen for de to alternativer – dog med Bizz som det billigste af de to, da det har de mindste håndteringsomkostninger.

Ved alle indfaldsveje til området etableres kontrolstationer, hvor det via Bizz kontrolleres, om hver enkelt bil har en almindelig BroBizz eller en OBU, eller om bilens nummerplade skal fotograferes.

For biler med OBU registreres al kørsel inden for området, en pris beregnes, og oplysningerne sendes via en indbygget telefonenhed til en central server. Herfra sendes med fast interval en faktura til bilejeren.

For at undgå uoverensstemmelser om prisen på en tur lagres hver enkelt tur som udgangspunkt på serveren i en vis periode. Ønsker bilisten ikke denne lagring, kan han acceptere prisen for den netop overståede tur ved at trykke på en knap på OBU'en.

Takstsystemet kan eksempelvis bestå af to zonetyper og tre vejtyper, således at der er seks forskellige takstniveauer. Nogle af takstniveauerne kan eventuelt have samme takst. Billigst er det at køre langt fra centrum på de store primære veje, og dyrest er det at køre i centrum på de små veje. Derudover er der en myldretidsfaktor, som er højest i myldretiden og lavest i de timer, hvor der er mindst trafik.

OBU'ens software og elektroniske tariffkort opdateres løbende ved at sende data via den indbyggede mobiltelefon. For at imødekomme snyd sammenlignes odometer-distancen med den ud fra GNSS målte distan-

ce. Endvidere skal systemet installationer kontrolleres i forbindelse med bilens obligatoriske syn.

Forud for systemets ibrugtagning skal der etableres flere og bedre kollektive transportmuligheder, så der er et alternativ til at køre i bil og betale kørselsafgifter.

3. Erfaringer med kørselsafgiftssystemer

Som nævnt i indledningen forskes der flere steder i verden i satellitbaserede kørselsafgiftssystemer. Det gøres dels for at undersøge effekten på trafikken og trafikanterne samt dels for at undersøge teknologiens nøjagtighed og pålidelighed.

Nogle af de vigtigste forskningsprojekter har fundet sted i Seattle, London og København, mens der i Tyskland allerede er indført et satellitbaseret kørselsafgiftssystem for lastbiler. I England er der desuden gennemført et studie om folks reaktioner på kørselsafgiftssystemer.

3.1. LKW-Maut i Tyskland

Afsnittet er baseret på følgende kilder: [BMVBS, 2006], [Satellic, 2006], [SPG Media Limited, 2005] og [Toll Collect, 2007].

3.1.1. Introduktion

I Tyskland indførtes i januar 2005 verdens første satellitbaserede kørselsafgiftssystem, det såkaldte LKW-Maut. Systemet omfatter alle lastbiler med en maksimalvægt over 12 tons, der kører på det tyske motorvejsnet.

Afgiften afhænger af kørt distance, antal aksler og lastbilens emissionskategori, og den svarer således i høj grad til de omkostninger, som kørselen pådrager samfundet. Indtægterne benyttes til anlæggelse af nye veje og til vedligeholdelse af landets omfattende vejnet.

Til opbygning og drift af afgiftssystemet er selskabet Toll Collect GmbH oprettet. Der opkræves årligt afgifter for omkring 23 milliarder kilometer motorvejskørsel fra cirka en million lastbiler.

3.1.2. Baggrund

I Tyskland bruges der årligt omkring 56 milliarder kr. på drift og vedligeholdelse af motorvejsnettet. Omkring halvdelen af dette beløb vurderes at skyldes belastninger fra de mange lastbiler, som kører i, til, fra og igennem landet.

I 2000 besluttede den tyske regering, at indføre et kørselsafgiftssystem for lastbiler, for at finansiere de store drifts- og vedligeholdelseskostninger. Regeringen har opstillet følgende strategiske mål i forbindelse med indførelse af systemet:

- *Kørselsafgifter er medvirkende til at skabe økonomiske grundlag for forbedringer i transportinfrastrukturen.*
- *Takket være LKW-Maut er det nu for første gang muligt at lade dem, som belaster infrastrukturen, betale de deraf følgende omkostninger på en optimal måde.*
- *Kørselsafgifter giver incitament til en større udnyttelse af fragtkapaciteten inden for transportsektoren.*
- *At afgifterne afhænger af lastbilernes forureningsniveau, giver incitament til anskaffelse af nye køretøjer eller ombygning af gamle.*
- *Kørselsafgifter vil medvirke til at gøre konkurrencen mellem fragt på skinner og vej mere retfærdig.*

Oversat fra kilde: [BMVBS, 2006]

Det fremgår af målsætningerne, at den tyske regering ser andre fordele ved kørselsafgiftssystemet end dækning af omkostningerne. Det er håbet, at transportsektoren vil optimere sit arbejde yderligere og dermed begrænse trafikken mest muligt, og man regner desuden med, at vognmændene vil værne mere om miljøet ved at anskaffe nye, mere miljøvenlige køretøjer. Endeligt forventes afgifterne at have den effekt, at en del af transporten flyttes til jernbanenettet.

3.1.3. Systemdesign

Automatisk registrering

Som vognmand låner man gratis en OBU, som installeres i lastbilen for vognmandens regning. Ved hjælp af satellitpositionering og et digitalt kort beregner OBU'en løbende den kørte rute og fastlægger kørselsafgiften under kørslen.



Figur 2. OBU'en, som anvendes i LKW-Maut-systemet i Tyskland.
Foto: [SPG Media Limited, 2005]

En indbygget GSM-enhed benyttes til datakommunikation til og fra lastbilen. På den måde sendes oplysninger om køreruter og afgifter fra lastbilen til centralen, så der ved udgangen af hver måned kan trækkes penge fra den tilmeldte konto. Desuden kan der ved hjælp af GSM-enheden sendes software-opdateringer eller nye afgiftsstrukturer fra centralen til lastbilen.

Endelig er der i OBU'en også en DSRC-enhed, som benyttes til kontrol af OBU'ens tilstand. Dette sker trådløst, enten når lastbilen passerer en af Toll Collects 300 portaler, eller når en af Toll Collects 300 servicebiler kører forbi lastbilen.

Manuel registrering

For de vognmænd, der ikke ønsker at installere en OBU i lastbilen, kan afgiften betales over internettet eller på rastepladser og tankstationer ved særlige automater. Afgiften skal i så fald betales inden kørsel, og det kræver, at den planlagte rute indtastes. Chaufføren kan så kun køre ad den planlagte rute.

Håndhævelse af den manuelle registrering sker ved, at der ved Toll Collects 300 portaler eller 300 servicebiler tages digitale fotos af nummerpladen på de lastbiler, som ikke giver trådløst signal om, at de har installeret en OBU. Nummerpladen sammenlignes med det samme med en database over de lastbiler, der har betalt for at køre det pågældende sted. Hvis nummerpladen ikke er anført her, trækkes lastbilen ind til siden, og en bøde udskrives.

3.1.4. GPS-teknologien

OBU'ens positionering fungerer i dag ved hjælp af det amerikanske satellitpositioneringssystem, GPS, men vil også kunne benytte det europæiske satellitpositioneringssystem, GALILEO, når det bliver operationelt.

I GPS-enheden er der indbygget et *dead reckoning*-system, som træder til, når der ikke er tilstrækkelig satellitdækning, og på baggrund af odometer og gyroscopes kan give en estimering af positionen.

I OBU'en sker der løbende på baggrund af positionen fra GPS-enheden en map matching, hvor lastbilen knyttes til et vejsegment fra det digitale kort. Ud fra kortets oplysninger om vejsegmenternes længde og afgiftsniveau beregnes den korte distance og kørselsafgiften. Lastbilens odometer anvendes til kontrol af den beregnede distance.

Da motorvejsnettet er meget grovmasket og har en forudsigelig topologi, er det forholdsvis problemfrit at anvende satellitpositionering til at fastslå lastbilernes køreruter. Dog er der ved tætliggende veje i motorvejskryds og ved parallelle forløb opstillet DSRC-sendere, som trådløst giver OBU'en ekstra positioneringsinformation, så den nøjagtige rute trods vejudformningens kompleksitet kan bestemmes. Der er permanent opstillet omkring 170 af denne slags DSRC-sendere, og ved vejomlægninger i forbindelse med vejarbejde benyttes mobile sendere.

3.2. GPS-forsøg i Seattle

Afsnittet er baseret på følgende kilder: [Kittchen & Wieck, 2006], [PSRC, 2007] og [The Seattle Times, 2006].

3.2.1. Introduktion

I Puget Sound-regionen ved Seattle i staten Washington blev der i 2005 og 2006 afholdt et stort forsøg med et GPS-baseret kørselsafgiftssystem for privatbilister. Formålet med forsøget var primært at skabe viden om folks transportvaner i et samfund med kørselsafgifter og herunder altså også at undersøge effekten af kørselsafgifterne. Derudover gav forsøget en masse erfaringer omkring implementering, teknologi og drift.

Forsøget var et led i en større proces, som skal bekæmpe den trængsel på regionens veje, der er resultat af flere årtiers massiv byvækst uden opmærksomhed på trafikområdet. Årligt koster bilkøerne op mod 1,5 milliarder dollars, og biltrafikken i regionen forventes at stige med 60 % over de kommende 30 år.

De nuværende økonomiske midler er langt fra tilstrækkelige, hvis trængselsproblemerne skal løses, så man har i Puget Sound Regional Council set sig nødsaget til søge alternative finansieringsmuligheder. Det er forventningen, at kørselsafgifter vil kunne skabe det fornødne provenu, så det trafikale netværk kan blive udbygget og moderniseret, og at de samtidig kan være medvirkende til at nedbringe trængslen.

3.2.2. Forsøgsdesign

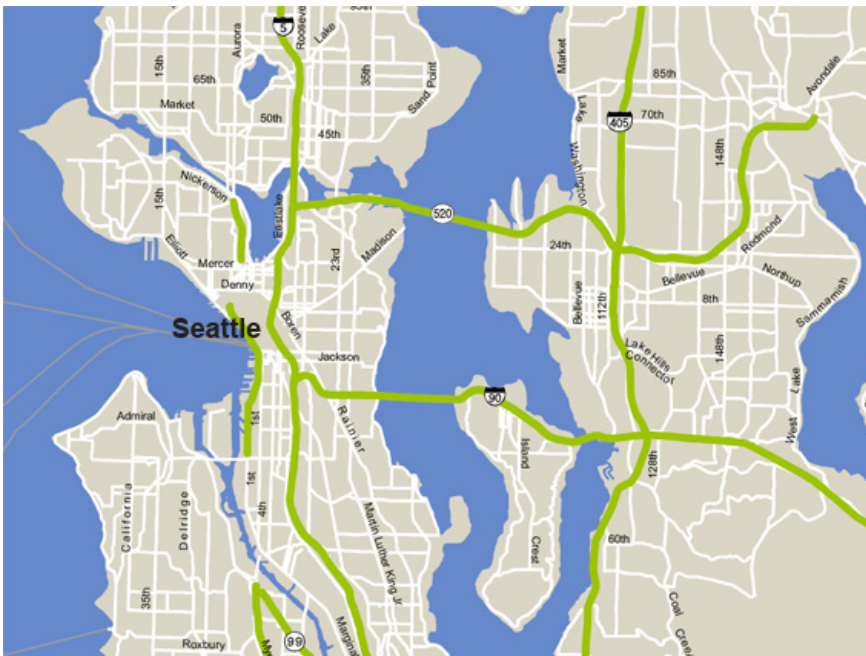
400 repræsentative frivillige bilister fra 270 husstande deltog i det 12 måneder lange forsøg, og i alle bilerne blev der installeret en OBU af samme type, som anvendes i lastbilerne i Tyskland (se forrige afsnit).

I den første periode var OBU'erne ikke aktive og indsamlede blot data, så deltageres normale transportvaner kunne registreres. Ud fra denne viden blev takststrukturen fastlagt, og i den efterfølgende periode, hvor OBU'erne stadig var inaktive, opsparede deltagerne penge svarende til de kørselsafgifter, de skulle have betalt, hvis systemet var aktivt. I den tredje periode var OBU'erne aktive, og deltagerne skulle betale kørselsafgifter af det opsparede beløb fra anden periode. Deltagerne kunne således efter forsøgets afslutning beholde de penge, som svarede til ændringen i kørsel mellem periode 2 og 3.

Det var fra starten besluttet at kørselsafgiftssystemet skulle være distance- og tidspunktsafhængigt. Takststrukturen blev opbygget på en

sådan måde, lokalveje var gratis at køre på, mens de mellemstore veje (non-freeways) kostede halvt så meget som motorvejene (freeways). Der var to forskellige takststrukturer til hverdage og weekend, og taksten var højest i myldretiden og helt gratis om natten. Takststrukturer og kort fremgår af figur 3.

Logikken i den anvendte takststruktur i Seattle kan diskuteres. Normalt ønsker man at samle trafikken på de store veje, hvor kapaciteten er størst, og hvor færrest bliver generet. I Seattle-forsøget var det lige omvendt: De største veje var de dyreste, og de små veje var helt gratis at køre på. Det må nødvendigvis have flyttet noget trafik til de mindre veje. Denne effekt er dog ikke beskrevet eller diskuteret nogen steder i den anvendte litteratur.



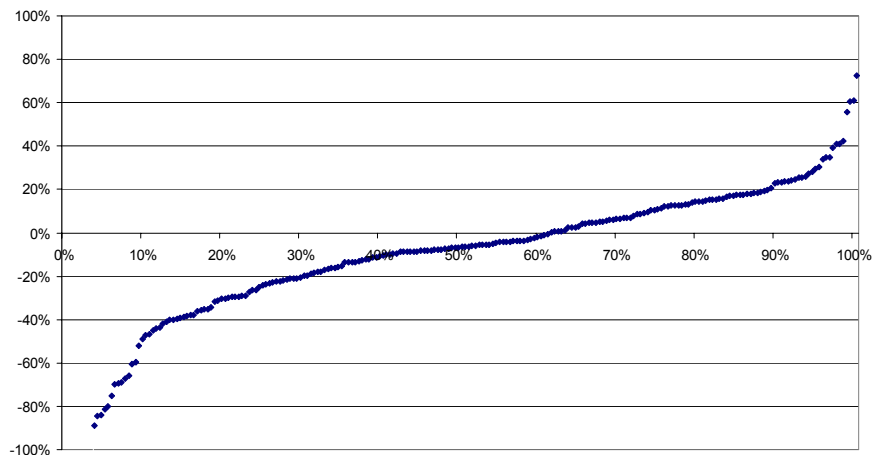
| TOLL RATES PER MILE | | |
|---------------------|-----------|--------------|
| MONDAY — FRIDAY | | |
| TIME | FREEWAYS | NON-FREEWAYS |
| 6 AM | 40¢ | 20¢ |
| 9 AM | 15¢ | 7.5¢ |
| 9 AM | 50¢ | 25¢ |
| 4 PM | 10¢ | 5¢ |
| 4 PM | no charge | no charge |
| 7 PM | 10¢ | 5¢ |
| 7 PM | no charge | no charge |
| 10 PM | no charge | no charge |
| 10 PM | no charge | no charge |
| 6 AM | no charge | no charge |
| SATURDAY — SUNDAY | | |
| TIME | FREEWAYS | NON-FREEWAYS |
| 6 AM | 10¢ | 5¢ |
| 10 AM | 20¢ | 10¢ |
| 10 AM | 10¢ | 5¢ |
| 7 PM | 10¢ | 5¢ |
| 7 PM | no charge | no charge |
| 10 PM | no charge | no charge |
| 10 PM | no charge | no charge |
| 6 AM | no charge | no charge |

Figur 3. Til venstre ses et udsnit af kortet over de afgiftsbelagte veje i Puget Sound-regionen. Ovenfor ses afgiftsstrukturen. Bemærk at små veje er gratis, mens motorvejene er de dyreste at køre på. Illustrationer: [PSRC, 2007]

3.2.3. Resultater

Forsøget viste, at kørselsafgifterne havde en effekt på deltagernes transportvaner, om end det samlede kørselsomfang ikke faldt dramatisk. Således sænkede cirka 40 % af de deltagende husstande sit kørselsomfang mere end 10 %, mens cirka 25 % af husstandene øgede antallet af kørte kilometer mere end 10 % (figur 4). Årsagen til at så relativt mange kørte mere end før var, at de fandt alternative ruter for ikke at køre på afgiftsbelagte veje.

Cumulative Distribution of Percent Change in Weekly Miles Traveled per Vehicle
Experimental Period Compared to the Control Period



Figur 4. Den procentvise ændring i kørselsomfang for de deltagende husstande.

Illustration: [Kittchen & Wieck, 2006]

Af figur 5 ses det ret klart, at der samlet set ikke er sket et særligt imponerende fald i trafikken, nemlig kun 3,7 % (VMT (vehicle miles traveled) per active day). Dog er faldet i eftermiddagsmyldretiden 6,7 %. Det fremgår også af figur 5, at de største fald i trafikken findes på de afgiftsbelagte veje, og at dette fald ikke kan genfindes i det samlede fald – altså er meget trafik, som nævnt tidligere, flyttet til de mindre veje.

| DESCRIPTIVE STATISTIC | AM PEAK | | | PM PEAK | | | NON-PEAK | | | ALL DAY | | |
|--------------------------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|----------|------------|-------|---------|------------|-------|
| | Control | Experiment | % | Control | Experiment | % | Control | Experiment | % | Control | Experiment | % |
| Toll per trip | \$ 1.83 | \$ 1.74 | -4.9% | \$ 1.59 | \$ 1.45 | -8.3% | \$ 0.42 | \$ 0.40 | -3.0% | \$ 0.96 | \$ 0.90 | -6.7% |
| Toll per vmt | \$ 0.23 | \$ 0.22 | -3.6% | \$ 0.26 | \$ 0.25 | -2.1% | \$ 0.07 | \$ 0.07 | -2.6% | \$ 0.15 | \$ 0.15 | -4.4% |
| Toll per active day | \$ 2.48 | \$ 2.34 | -5.8% | \$ 3.10 | \$ 2.83 | -8.7% | \$ 1.47 | \$ 1.39 | -5.1% | \$ 7.05 | \$ 6.56 | -6.9% |
| Vmt per trip | 7.90 | 7.80 | -1.3% | 6.20 | 5.81 | -6.3% | 5.77 | 5.74 | -0.5% | 6.23 | 6.08 | -2.4% |
| Vmt per active day | 10.69 | 10.45 | -2.3% | 12.12 | 11.31 | -6.7% | 20.38 | 19.85 | -2.6% | 43.20 | 41.61 | -3.7% |
| Tolled trip per day | 1.15 | 1.12 | -2.5% | 1.56 | 1.53 | -1.8% | 2.59 | 2.51 | -2.9% | 5.30 | 5.17 | -2.5% |
| Trips per day | 1.35 | 1.34 | -1.0% | 1.96 | 1.95 | -0.4% | 3.53 | 3.46 | -2.1% | 6.84 | 6.75 | -1.4% |

Figur 5. Skema over ændringerne i transportvaner for forsøgsdeltagerne. Bemærk det lave samlede fald i trafikken på 3,7 % (Vmt per active day). Desuden er faldet i trafikken på de afgiftsbelagte veje meget større end det gennemsnitlige fald.

Kilde: [Kittchen & Wieck, 2006]

At faldene i trafikken ikke var større, skal ses i lyset af forsøgets begrænsede omfang, selvom det næppe er den eneste årsag. Effekten var således påvirket af, at den kollektive trafik ikke blev udbygget eller optimeret, og at der var ikke nok deltagere til, at samkørselsordninger kunne etableres, samt at deltagerne kun i begrænset omfang havde mulighed for at omlægge arbejdstider samt andre vaner og pligter.

3.2.4. Teknologierfaringer

Allerede inden forsøgets egentlige begyndelse viste sig et uventet problem: At få installeret OBU'er i 400 biler var en stor logistisk udfordring, og denne problemstilling bør indgå som en vigtig del af planlægningen af et kørselsafgiftssystem.

Derudover var GPS-kvaliteten som forventet ikke helt tilstrækkelig i de tætteste byområder, og det vil derfor i et permanent kørselsafgiftssystem være nødvendigt at opsætte sendere flere steder på vejnettet (ligesom i det tyske system), så OBU'erne kan få tilsendt yderligere og mere nøjagtige oplysninger til beregning af positionen.

3.2.5. Andre erfaringer

Efter forsøgets afslutning blev 16 af deltagerne inviteret til at medvirke i en fokusgruppesession, hvor formålet var at skabe viden om, hvad der havde været medvirkende til at ændre den enkeltes transportvaner, samt hvad deltagerne havde fundet godt og dårligt i forbindelse med forsøget. Nogle af de vigtigste erfaringer, der blev gjort var følgende:

- Realtidsvisningen af kørselsafgiften i OBU'ens display øgede deltageres opmærksomhed på rejseomkostningerne.
- Den månedlige faktura var et godt supplement til OBU'ens visning af kørselsafgift, da der her var overblik over samtlige ture og kørselsmønstre.
- Selvom privatliv altid er et tema i forbindelse med satellitpositionering og kørselsafgiftssystemer, er det ikke et problem, der vil kunne afspore brugen af denne teknologi.

3.3. GPS-forsøg i London

Afsnittet er baseret på [TfL, 2005], [TfL, 2006 a], [TfL, 2006 b] og [TfL, 2007].

3.3.1. Introduktion

I London har man siden 2003 haft et kørselsafgiftssystem, som er baseret på nummerpladegenkendelse, ANPR (Automatic Number Plate Recognition). I et område i centrum på 22 kvadratkilometer skal der betales afgift for at køre. Ved kørsel i betalingsområdet affotograferes nummerpladen, og betaler bilisten ikke senest ved midnat den følgende dag, udskrives en bøde. Effekterne af systemet er bedre end forventet, og trafikken i London er efter systemets indførelse faldet betydeligt. Allerede efter det første år var trængslen i centrum af byen faldet med 30 %.

Systemet er ret simpelt i sin virkemåde, mens det dog har vist sig at være noget af en udfordring at indføre og drive i praksis. Der er blevet opsat adskillige kameraer i byen for at sikre at alle biler bliver affotograferet, men på trods af dette er systemet ikke i stand til at registrere alle

biler automatisk. Således skal op mod 20 % af bilerne registreres manuelt ud fra fotografierne, og dette er meget omkostningsfuldt.

Selvom systemet i London har haft store positive effekter, er det ikke et ideelt system. Når en bilist først har betalt for indkørsel til byens centrum, kan han køre rundt derinde hele dagen. Desuden er det den samme pris, uanset på hvilke veje der køres. Begge dele er ikke optimalt for en begrænsning af trafikken.

Vejmyndighederne i den engelske hovedstad, Transport for London (TfL), undersøger mulighederne for at forbedre kørselsafgiftssystemet eller indføre et nyt. TfL har siden august 2003 foretaget en række undersøgelser af forskellige teknologier til kørselsafgiftssystemer, heriblandt satellitpositionering. I slutningen af 2004 var første del af undersøgelserne (Stage 1) overstået, og i efteråret 2006 var anden del (Stage 2) færdig. De vigtigste punkter fra de to delundersøgelser gennemgås i det følgende.

3.3.2. Stage 1

Formål

I den første delundersøgelse blev flere teknologier undersøgt med henblik på at vurdere, om de havde potentiale til at erstatte det nuværende kørselsafgiftssystem i London med mindre driftsomkostninger og større brugervenlighed. Delundersøgelsen var at betragte som en screeningsanalyse, som ikke var tilbundsående, men blot skulle indkredse hvilke af de fem følgende teknologier, der var værd at undersøge nærmere i Stage 2:

- Automatisk nummerpladegenkendelse (ANPR)
- Mikrobølge bizz (DSRC)
- Infrarød bizz (DSCR)
- Satellitpositionering (GPS)
- Positionering vha. mobiltelefonsignal fra sendemaster (GSM/3G)

De mest lovende teknologier viste sig at være DSRC (mikrobølge bizz) og GPS, og disse blev derfor undersøgt nærmere i Stage 2. Herunder beskrives dog først screeningsundersøgelsen af GPS.

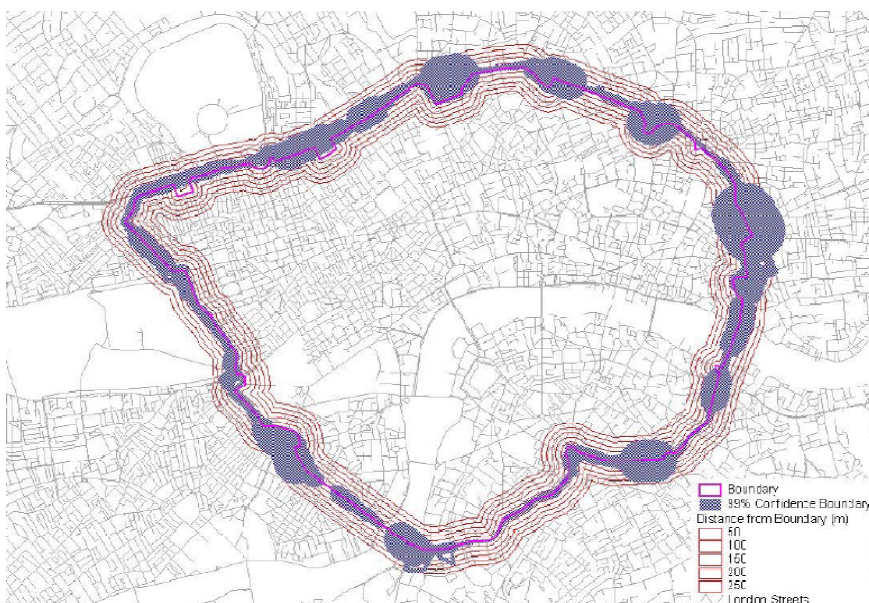
Undersøgelse af GPS-positioner

Udgangspunktet for undersøgelsen af GPS i Stage 1 var, at teknologien skulle kunne erstatte det nyligt indførte system med nummerpladegen-

kendelse. Derfor var interessen koncentreret om at fastslå, om det ved hjælp af GPS-positionering kunne registreres, hvornår en bil kørte ind i betalingsområdet. Det vil sige, at bilernes ruter i realiteten var ligegyldig, idet én enkelt GPS-position inden for zonen ville skulle udløse afgiftsbetaling. Undersøgelserne gik derfor ud på at vurdere kvaliteten af de enkeltvise GPS-positioner.

Et antal biler blev udstyret med GPS-OBU'er fra syv forskellige producenter, og gennem en periode kørte de ad nøje tilrettelagte ruter i centrum af London, således at der blev kørt på veje i områder med forskellig GPS-kvalitet. Over 800.000 GPS-positioner blev på denne måde indsamlet, og hver enkelt af dem blev sammenlignet med den korrekte position.

Den gennemsnitlige afvigelse på positionen var 9,7 meter, men 5 % af positionerne afveg mere end 28 meter og 1 % afveg mere end 57 meter. Det viste sig også, at hvis GPS skulle bruges til at detektere bilers indkørsel i betalingsområdet, så skulle der ved områdets afgrænsning lægges en bufferzone med en bredde på mellem 60 og 250 meter, for at være 99 % sikker på at en GPS-position virkelig var inden for betalingszonen (figur 6).



Figur 6. Forsøgene i Stage 1 viste, at der ved grænsen til den nuværende betalingszone flere steder var så dårlig GPS-kvalitet, at det var nødvendigt at arbejde med en buffer på op til 250 meter (de mørke områder på figuren).

Illustration: [TfL, 2005]

Konklusionen vedrørende GPS i Stage 1 var, at teknologien ikke endnu var tilstrækkelig pålidelig og nøjagtig til at erstatte nummerpladegenkendelsessystemet som kørselsafgiftssystem i London.

3.3.3. Stage 2

Formål

I Stage 2 blev DSRC og GPS undersøgt mere tilbundsående, og hele systemer med supplerende teknologier blev opstillet. I sammenhæng med GPS blev også trådløs forbindelse via Wi-Fi og såkaldt Value-Added Services (VAS) således undersøgt. I dette afsnit beskrives dog kun GPS-teknologien, da de supplerende teknologier ikke har nogen betydning for kvaliteten af GPS.

I den anden undersøgelse af GPS blev der skiftet taktik i forhold til Stage 1. Således var fokus ikke længere på at vurdere, om teknologien kunne erstatte det eksisterende nummerpladegenkendelsessystem. Fokus blev i stedet lagt på vejbaserede kørselsafgifter. Map matching var derfor nu et vigtigt element. Tre kvalitetsindikatorer blev opstillet:

1. Afvigelse på GPS-positioner på en tur (som i Stage 1)
2. Fejlagtig udvælgelse af vejsegmenter på en tur
3. Forkert beregning af samlet afgift for en tur

Det blev også undersøgt, hvor stor effekt den forventede implementering af GALILEO vil få på kvaliteten af satellitpositionering i London.

Undersøgelse af GPS-positionering

14 producenter af GPS-modtagere leverede test-udstyr til Stage 2. Nogle producenter benyttede diverse positioneringshjælpemidler såsom dead reckoning, differentiell GPS, EGNOS og LORAN, mens andre producenter leverede "rene" GPS-modtagere. Ligeledes var det kun nogle af producenterne, der benyttede egne digitale vejkort og eget map matching-system. De øvrige benyttede kortdata og map matching-system leveret af Transport for London.

Blandt de 14 OBU'er var det bedste resultat i forhold til afvigelse på GPS-positionerne noget bedre end i Stage 1. Positionerne fra den bedste OBU lå således i gennemsnit 5,1 meter fra de korrekte positioner, mens det i Stage 1 var 9,7 meter. 5 % af GPS-positionerne afveg mere end 14,4 meter mod 28 meter i Stage 1. Endelig afveg 1 % mere end 26,2 meter mod 57 meter i Stage 1. Alt i alt nogle klare forbedringer.

I forhold til at udvælge de vejsegmenter, som en rute går ad, havde den bedste OBU registreret 98,6 % af de korrekte segmenter på de ture, der

blev kørt, mens de sidste 1,4 % ikke blev registreret. Til gengæld var 1,0 % forkerte segmenter registreret.

Det viste sig desuden, at de OBU'er, der havde en høj GPS-målingsfrekvens (1 sekund), var klart bedre end OBU'er med lavere frekvens.

Den OBU, som beregnede den mest nøjagtige samlede afgift for de ture, der blev kørt, afveg i gennemsnit -0,49 % fra den korrekte afgift med en standardafvigelse på 1,31 %. Den absolutte gennemsnitlige afvigelse var 0,82 %. Der foreligger ikke nærmere oplysninger om resultaterne, og det er derfor umuligt at sige noget om ekstremaer og spredning på afvigelserne. Hvis det antages, at afvigelserne var normalfordelte omkring gennemsnittet på -0,49 % (hvilket næppe er tilfældet), svarer det til, at 95 % af afvigelserne lå mellem -3,11 % og 2,13 %. Det skal dog understreges, at dette estimat ikke er pålideligt, og i øvrigt siger det heller ikke det noget om ekstremaerne.

Undersøgelsen påviste i øvrigt stor sammenhæng mellem evnen til at registrere korrekte vejsegmenter og at beregne den korrekte afgift.

Det skal understreges, at det ikke var den samme OBU, der var bedst i alle tre undersøgelser. Desuden vides det ikke hvilke OBU'er, der indeholdt hvilke hjælpemidler, så det er ikke muligt at vurdere effekten af disse hjælpemidler.

Transport for London skriver i sin konklusion, at GPS endnu ikke er tilstrækkelig nøjagtig og pålidelig, til at teknologien kan anbefales. Det er nemlig holdningen, at afvigelsen på den samlede afgift for en tur ikke må overstige 0,5 % til 1,0 %.

Undersøgelse af GALILEO

I Stage 2 blev det også undersøgt, hvor stor betydning den europæiske pendant til GPS, GALILEO, vil få for satellitpositioneringen i London. Hertil blev en 3D-model af byen samt en softwaremodel (Polaris) af satellitsystemet benyttet, og det var så muligt at beregne antallet af synlige satellitter overalt i London, når systemet bliver implementeret.

Effekten af GALILEO kan vurderes ud fra figur 7 og figur 8. På figur 7 er det ved hjælp af Polaris beregnet hvor mange satellitter, der er synlige 75 % af tiden i dag, hvor der kun er GPS-satellitter og hjælpesystemet EGNOS. På figur 8 er det ved hjælp af Polaris beregnet, hvor mange satellitter, der vil være synlige 75 % af tiden, når der både er GALILEO- og GPS-satellitter samt hjælpesystemet EGNOS. Det ses, at der er betydeli-

ge forbedringer, men at det ikke er overalt, at effekten af GALILEO er lige stor. Beregninger i Polaris viser, at der stadig vil være mange områder af London, hvor mindre end fire satellitter vil være synlige i mindst 25 % af tiden.

Figur 7. Polaris-beregning af antal synlige satellitter på vejene i London.

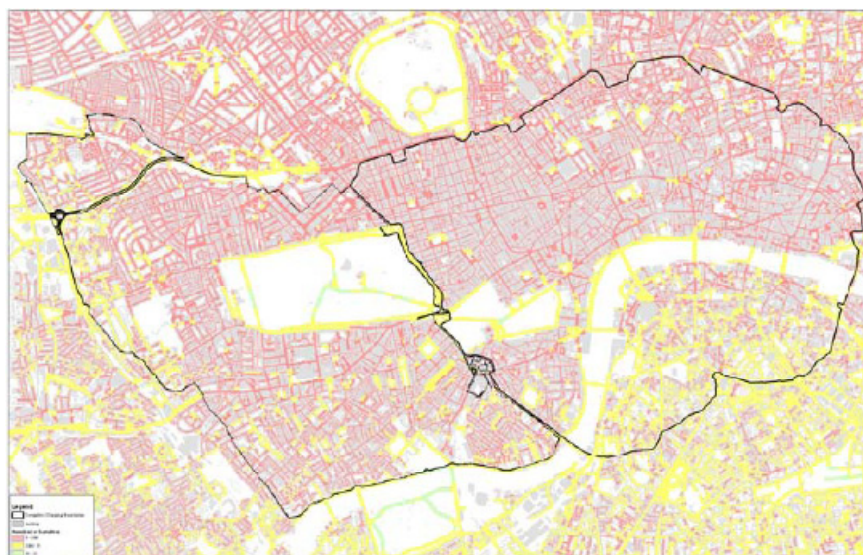
GPS + EGNOS

Illustration: [TfI, 2006 b]

Signaturforklaring:

Vejene med antal synlige satellitter i 75 % af tiden.

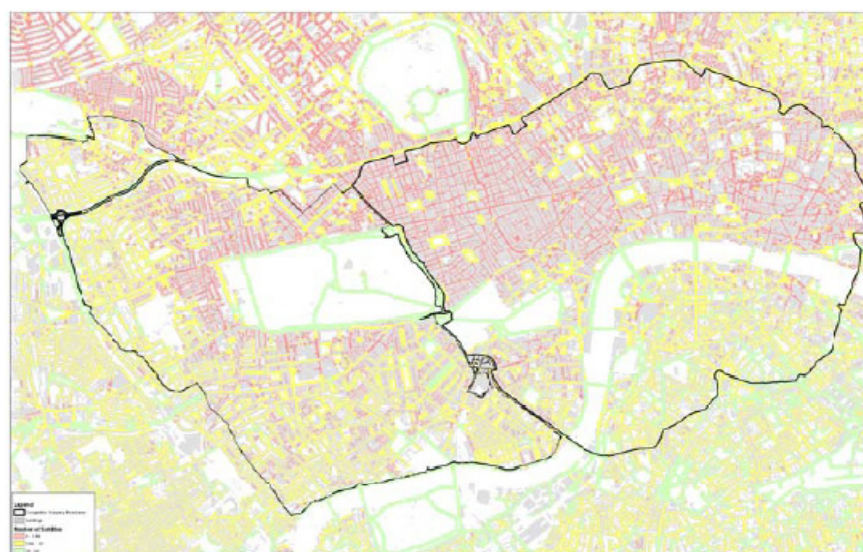
RØD: 0-3 synlige satellitter
 GUL: 4-10 synlige satellitter
 GRØN: 11+ synlige satellitter



Figur 8. Polaris-beregning af antal synlige satellitter på vejene i London.

GALILEO + GPS + EGNOS

Illustration: [TfI, 2006 b]



3.4. AKTA-forsøget i København

Afsnittet er baseret på [Københavns Kommune, 2005 d], [PROGRESS, 2005] og [Zabic, 2004].

3.4.1. Baggrund

AKTA-forsøget i København var som nævnt i indledningen en del af det EU-støttede PROGRESS-projekt, som blev gennemført i perioden 2000-

2004. Projektet involverede otte europæiske byer, som foruden København var Bristol, Genova, Göteborg, Helsinki, Edinburgh, Trondheim og Rom. For uddybende information om PRoGR€SS henvises til projektets hjemmeside:

<http://www.progress-project.org>

3.4.2. Formål

Det primære formål med AKTA-forsøget var, at opnå empirisk viden omkring anvendelsen af kørselsafgifter og derved danne grundlag for en eventuel beslutning om at indføre kørselsafgifter i København. Følgende delmål søgtes herunder opfyldt:

- At undersøge forskellige prisstrategiers påvirkning af trafikmønstret.
- At opnå viden omkring de forhold, der påvirker befolkningens accept af kørselsafgifter.
- At vurdere de mulige teknologier (typer og metoder) på området.
- At udbrede kendskabet til kørselsafgifter som et trafikpolitisk virkemiddel.

3.4.3. Forsøgsdesign

Over en toårig periode gennemførtes tre forsøgsrunder med i alt cirka 500 frivillige bilister ud fra en udvalgt pulje på 30.000 husstande. I hver bil blev der installeret en OBU med tilhørende "taxameter" (figur 9), så forsøgsdeltagerne hele tiden kunne følge med i prisen for kørslen.

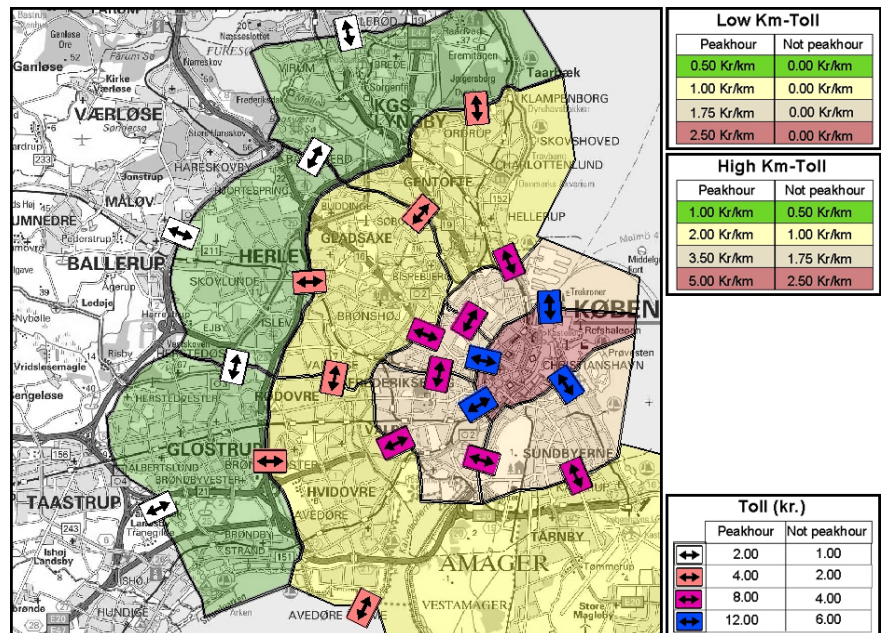
Forsøget var bygget op om to typer af kørselsafgiftssystemer:

- Kilometertaksering
- Bompenge

Under kilometertaksering var der en høj takst og en lav takst, mens der under bompengesystemet kørtes gratis eller med betaling ved krydsning af en zonegrænse. I begge systemer var der højere takst i myldretiden end uden for myldretiden (figur 10).



Figur 9. "Taxameteret" i bilerne i AKTA-forsøget.
Foto: [Heide, 2001]



Figur 10. De tre takstsystemer, som blev afprøvet i AKTA, bygger på fire zone-ringe, som yderligere er inddelt i 11 zoner.

Illustration: [CTT, 2005]

I forsøgsrunde 1 og 2 kørte forsøgsdeltagerne først i otte uger med én takst og dernæst i otte uger med en anden takst. Det var enten kombinationen *lav kilometertakst/høj kilometertakst* eller kombinationen *gratis/bompenge*. Forsøgsdeltageres motivation var, at de fik udbetalt et beløb svarende til deres nedsættelse af kørselsomfanget i løbet af forsøget.

I forsøgsrunde 3 kørte forsøgsdeltagerne først i 12 uger uden betaling, og dernæst i 12 uger med høj kilometertakst. Efter de første 12 uger fik forsøgsdeltagerne udbetalt et beløb svarende til de kørselsafgifter, de skulle have betalt, hvis der havde været høj kilometertakst. Herefter skulle deltagerne selv betale for kørslen i de næste 12 uger – dog kunne de ikke komme til at betale mere, end de havde fået udbetalt.

3.4.4. Registreringsmetoder

I kraft af at AKTA-forsøget netop var et forsøg, var det ikke hensigtsmæssigt at opføre betalingsanlæg eller på anden måde gøre indgriben i infrastrukturen. Til både kilometertaksring og bompengesystemet anvendtes derfor GPS til registrering og efterfølgende afregning af deltageres kørsel. På den måde skulle der blot installeres en OBU i bilerne, og udstyret kunne flyttes fra en bil til en anden mellem de tre forsøgsrunder.

En anden fordel ved at benytte GPS var, at forsøgsdeltageres kørselsvaner kunne registreres og efterfølgende analyseres. Dette var af stor vigtighed for forsøgets mål om at undersøge forskellige prisstrategiers påvirkning af trafikvanerne.

Anvendelsen af satellitpositionering var således ikke valgt, fordi det var givet, at det var den bedste registreringsmetode i et eventuelt virkeligt afgiftssystem, men fordi det var mest fleksibelt i forhold til forsøgets opbygning og omfang.

I praksis fungerede registreringen ved, at OBU'en hvert sekund sammenlignede bilens GPS-position med et indbygget digitalt kort, som indeholdt takstzonerne. Herved kunne krydsninger af zonegrænser identificeres, så der enten kunne betales bompeng eller skiftes kilometertakst afhængig af afgiftssystemet.

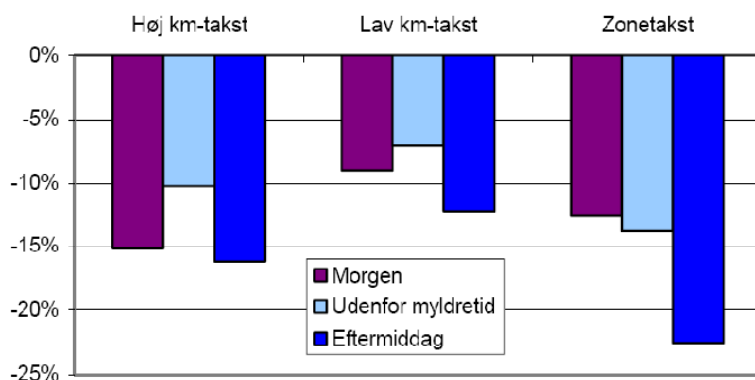
3.4.5. Afgifternes virkning

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater fra AKTA-forsøget, som er beskrevet i [Københavns Kommune, 2005 d].

Trafikale effekter

På baggrund af kendte transportarbejder i zonerne i hovedstadsområdet blev resultaterne for de 500 forsøgsdeltagere opskaleret til at dække alle bilister i regionen. I opskaleringen blev der taget højde for den priselasticitet, der er mellem privat og erhvervmæssig trafik. Erhvervstrafik regnes normalt for at være mindre prisfølsom end privat trafik.

De opskalerede resultater fremgår af figur 11 som den reduktion i trafikarbejdet, de tre afgiftssystemer har affødt.



Figur 11. Ændring i trafikarbejdet i afgiftsområdet ved forskellige afgiftssystemer.
Illustration: [Københavns Kommune, 2005 d]

Som ventet gav den høje kilometertakst en større reduktion i trafikarbejdet end den lave kilometertakst, men reduktionen svarer dog ikke til prisforskellen mellem de to takstsystemer. Således er reduktionen kun omkring halvanden gange større med den dobbelt så høje takst i myldretiden og betaling uden for myldretiden. Som en mulig forklaring anføres, at den blotte indførelse af et afgiftssystem giver en reduktion i trafikarbejdet, skønt prisen er relativt lav. Samtidig har forsøgsdeltagerne ikke

på så kort tid kunnet nå (og måske heller ikke ønsket) at omlægge deres kørselsvaner, selvom de har kørt med høj takst.

At der i systemet med lav takst skete en så relativt høj reduktion uden for myldretiden, hvor kørslen var helt gratis, kan også overraske. Forklaringen på dette er formentlig, at forsøgsdeltagerne i høj grad fuldstændig fravalgte bilen, og således ikke blot flyttede turene væk fra myldretiden.

Zonetakstsystemet gav markant større reduktion i især eftermiddagsmyldretiden end systemet med høj kilometertakst. Dette var også uventet men kan forklares med, at forsøgsdeltagerne i zonetakstsystemet med fordel kunne gøre ærinder, når de alligevel havde krydset en grænse i forbindelse med eksempelvis bolig/arbejdssted-trafik. Desuden var det fordelagtigt at gøre så mange ærinder som muligt i lokalområdet, så krydsning af en zonegrænse kunne undgås. Disse to forhold kan have begrænset antallet af lange ture og dermed trafikarbejdet.

En anden forklaring kan være, at det rent psykologisk virker som en højere pris, når man på én gang betaler et stort beløb for krydsning af en zonegrænse, i forhold til løbende at betale en langt lavere kilometertakst.

På figur 11 ses endvidere, at reduktionen for alle tre systemer var størst i eftermiddagsmyldretiden. Dette skyldes, at det er nemmere at ændre sine kørselsvaner på dette tidspunkt i forhold til om morgenen, hvor man skal nå på arbejde til tiden.

Resultaterne fra forsøget viser desuden som forventet, at effekten var størst i byens centrum og mindst i de ydre forstæder. Uden for afgiftsområdet var der praktisk talt ingen effekt.

Adfærdsændringer

Hvordan kørselsafgifterne ændrede forsøgsdeltagernes adfærd og transportvaner, blev undersøgt gennem før/efter interviews, analyser af GPS-data og Stated Preference-analyser (SP).

Først og fremmest viser resultaterne, at adfærdsændringerne var større, end det var forventet på baggrund af SP-analyserne. Dette skyldes efter al sandsynlighed blandt andet, at forsøgsdeltagerne på forhånd ikke har kunnet overskue de samlede økonomiske konsekvenser af at betale et mindre beløb for hver enkelt tur. Efterhånden som forsøget er skredet

frem og afgifterne er akkumuleret, er det imidlertid gået op for forsøgsdeltagerne, hvor meget omlægningen af kørselsvanerne kan betyde.

Analyserne viser, at adfærdsændringerne hos forsøgsdeltagerne fordeler sig på følgende måde (sorteret efter størrelse):

1. Ændring af ruter.
2. Ændring af antal ture.
3. Ændring af destinationer.
4. Ændring af turtidspunkt.
5. Kobling af ture til turkæder med flere turformål.
6. Ændring af transportmiddel.

Ikke overraskende var ændring af ruter den største form for adfærdsændring. Det skyldes, at det oftest er forholdsvis nemt at køre en anden vej for at undgå eller minimere kørselsafgifterne.

Antallet af ture er også nemt at ændre. Eksempelvis kan indkøbene samles på færre ture ved at købe mere ad gangen, eller man kan arbejde hjemmefra engang imellem.

På grund af forsøgets korte tidshorizont skete ændringer i destinationsvalg kun for indkøbs- og fritidsture. På lang sigt kan det formentlig forventes, at pendlingsmønstre og lokalisering af husstande og virksomheder i forhold til hinanden også påvirkes af kørselsafgifter.

Tidspunkter for ture ændrede sig til en vis grad hos forsøgsdeltagerne. Det drejer sig hovedsageligt om ture, der blev flyttet væk fra myldretiden for at spare kørselsafgifter. På lang sigt vil der formentlig også være et betydeligt antal ture, der flyttes ind i myldretiden, fordi der efter indførelse af afgifter ikke længere er så meget trængsel.

På trods af at det er forholdsvis let at klare flere ærinder på samme køretur, ændredes forsøgsdeltagerenes adfærd ikke meget på dette punkt. Det kan naturligvis skyldes, at deltagerne i forvejen var gode til netop dette.

Umiddelbart kan det virke bemærkelsesværdigt, at der kun var en lille ændring af transportmiddel. Det skyldes, at den kollektive trafik for de ture, forsøgsdeltagerne ændrede, var så lidt konkurrencedygtig, at den blev fravalgt i den sammenhæng. Samtidig benyttede en stor andel af forsøgsdeltagerne i forvejen andre transportmidler mellem bolig og arbejde.

3.4.6. Teknologierfaringer

Brugen af GPS i AKTA-forsøget har givet en stor erfaring med denne teknologi. Med logning hvert sekund blev der indsamlet omkring 120 mio. logninger fordelt på cirka 250.000 ture over tre perioder. Hermed er det en af de mest omfattende tests af GPS.

I afrapporteringen af forsøget [Københavns Kommune, 2005 d] konkluderes, at kvaliteten af GPS-logningerne havde været svingende og i høj grad geografisk betinget. Således var der større unøjagtighed og flere udfald i centrum af København og brokvartererne, hvor der er høj og tæt bebyggelse, end i resten af regionen.

Unøjagtigheden af GPS-positionerne viste sig efterfølgende at kunne korrigeres ved hjælp af en map matching-algoritme, så de korrekte forløb af turene ret pålideligt kunne fastlægges i langt de fleste tilfælde. Straks værre så det ud med signaludfaldene. Især i lukkede gaderum kunne der forekomme længere perioder, hvor der ikke var kontakt med nok satellitter, og positionen derfor ikke kunne bestemmes. Dette anses i rapporten som et problem, da det netop er i de centrale byområder, at et kørselsafgiftssystem helst skal have effekt, og trafikken dermed reduceres.

Dertil kommer, at 14 % af forsøgsparticipanterne oplevede at enheden i bilen stoppede med at virke midt i forsøgsperioden [CTT, 2004]

I rapporten fra Københavns Kommune vurderes det, at GPS vil kunne benyttes til kørselsafgiftssystemer baseret på bompeng eller kilometer-taksering, hvis der indlægges en 100 meter buffer mellem de enkelte takstzoner. Men det vurderes samtidig, at GPS-teknologien endnu ikke er pålidelig nok til et vejtypeafhængigt kørselsafgiftssystem, hvor der er forskellige takster på eksempelvis motorveje, almindelige veje og boligveje mv.

3.5. En GIS-analyse af GPS-kvalitet (AKTA)

3.5.1. Baggrund

I sit eksamensprojekt fra 2004 på Danmarks Tekniske Universitet beskæftigede Martina Zabic sig med GPS-kvaliteten i hovedstadsområdet. Efterfølgende er projektet blevet fremlagt i flere sammenhænge både indenlands og udenlands, og en række undersøgelser refererer til projektet.

Dette afsnit sammenfatter resultater og konklusioner fra Martina Zabic' eksamensprojekt. Afsnittet er således baseret på rapporten *En GIS-analyse af GPS-kvalitet til roadpricing* [Zabic, 2004].

3.5.2. Analyser

På baggrund af de indsamlede data fra AKTA udførtes en række analyser af GPS-kvaliteten med henblik på at vurdere, om teknologien kunne anvendes i et kørselsafgiftssystem. Analyserne drejede sig om følgende:

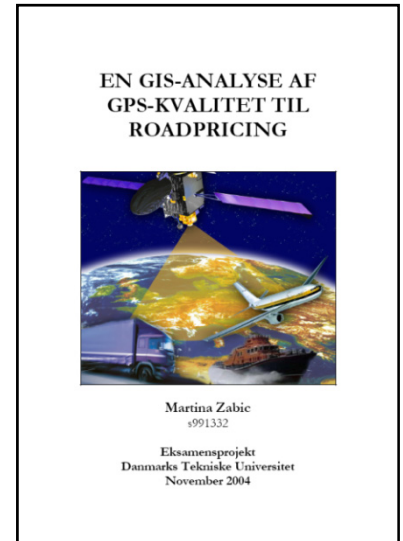
- Tilgængelige satellitter (områdebaseret)
- HDOP (områdebaseret)
- Tilgængelige satellitter (vejbaseret)
- HDOP (vejbaseret)
- Udfald på veje
- Døgn- og årstidsvariation

I det følgende gennemgås de seks punkter hver for sig. Slutteligt følger eksamensprojektets konklusioner.

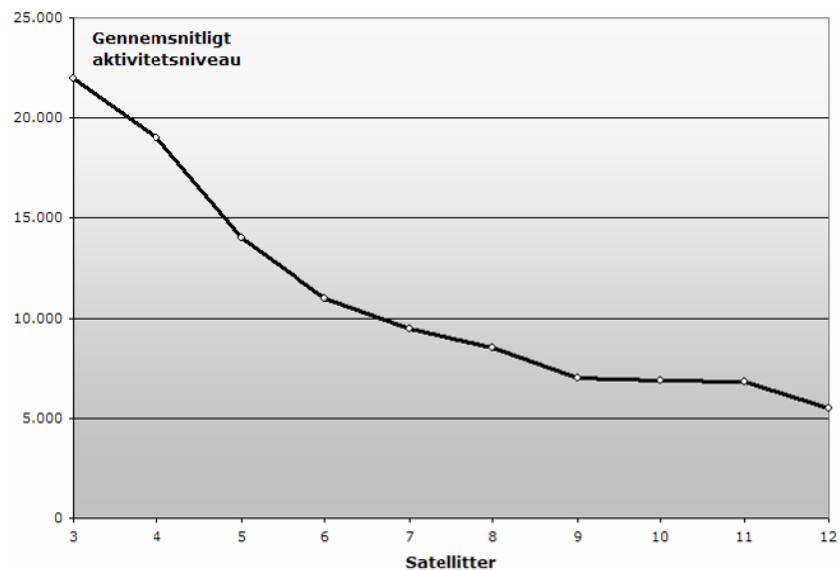
Tilgængelige satellitter (områdebaseret)

I denne analyse blev det gennemsnitlige antal tilgængelige satellitter beregnet for 618 definerede zoner i hovedstadsområdet. På figur 16 og figur 17 på side 44 vises resultaterne for henholdsvis hele området og for Københavns midtby. Det ses tydeligt, at de dårligst dækkede områder ligger i centrum af København, mens skovområder også har dårligere dækning end de øvrige områder.

For hver zone blev antallet af satellitter desuden sammenholdt med bebyggelsestætheden, som af gode grunde er højest i byområder og lavest i landområder. Som det fremgår af figur 12, er der en tydelig sammenhæng mellem bebyggelsestætheden og antallet af tilgængelige satellitter. Således må det forventes, at der ikke kan skabes forbindelse til ret mange satellitter i tætte byområder.

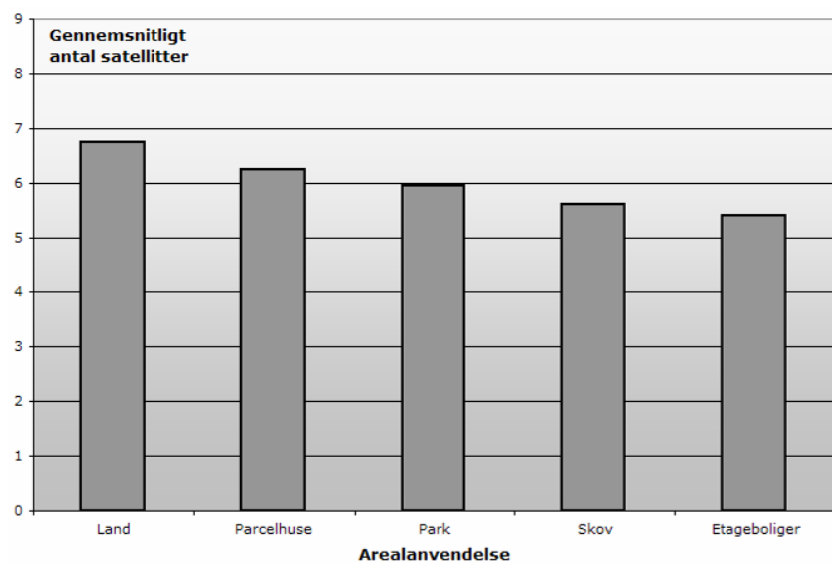


Figur 12. Det gennemsnitlige aktivitetsniveau (bebyggelsestæthed) som funktion af antal satellitter. Der ses en tydelig sammenhæng mellem bebyggelsestætheden og antallet af tilgængelige satellitter.
Egen figur efter kilde: [Zabic, 2004]



Antallet af tilgængelige satellitter blev også sammenholdt med et zonekort med fem arealanvendelses kategorier. Resultatet fremgår af figur 13. Det ses, at det gennemsnitlige antal satellitter er klart højest i landområder, mens det i parcelhusområder og parkområder er middelhøjt. Lavest er det i områder med etageboliger og i skovområder.

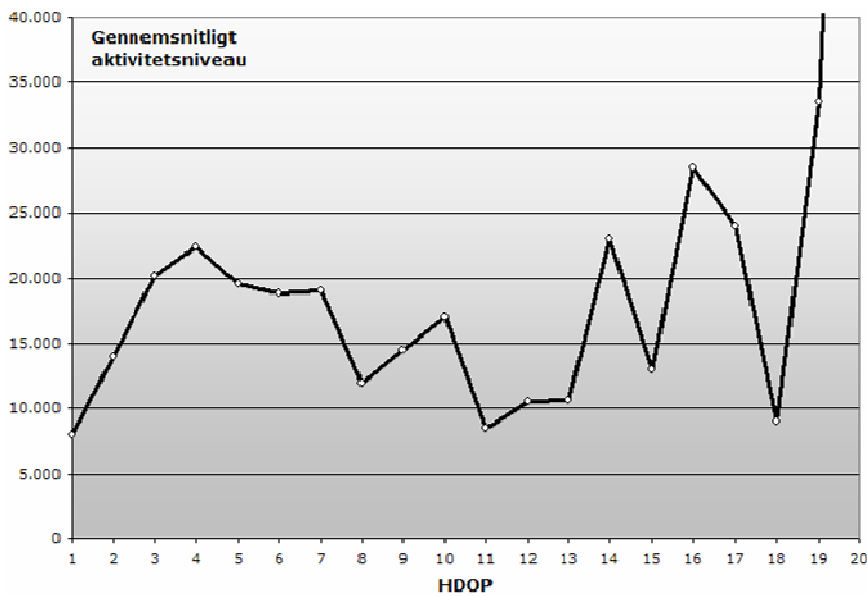
Figur 13. Det gennemsnitlige antal satellitter for hver arealanvendelseskategori.
Egen figur efter kilde: [Zabic, 2004]



HDOP (områdebaseret)

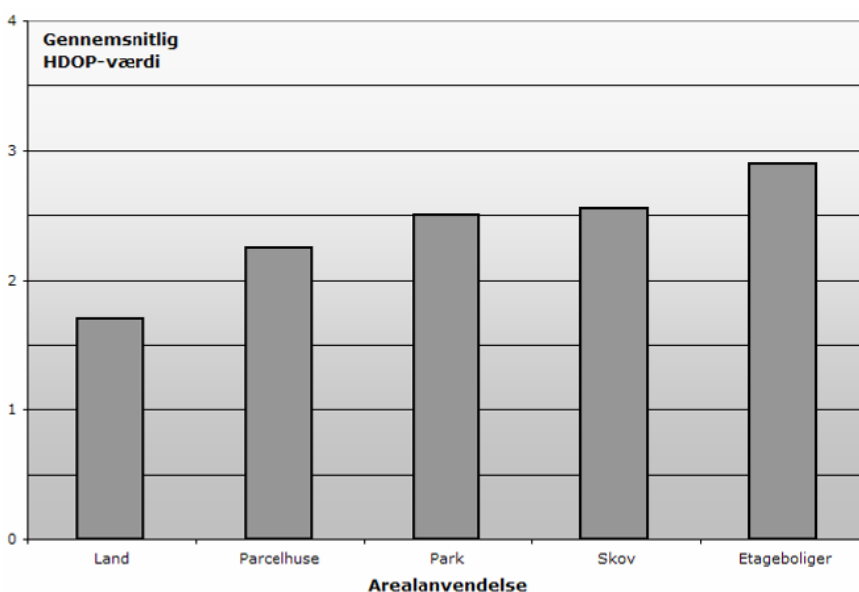
I denne analyse blev den gennemsnitlige HDOP-værdi beregnet for de samme 618 definerede zoner, som blev benyttet i den første analyse. På figur 18 og figur 19 på side 45 ses, at resultaterne stemmer overens med resultaterne fra den første analyse på den måde, at der generelt er en lav HDOP-værdi, hvor der er mange tilgængelige satellitter og omvendt. Der er dog enkelte afvigelser fra dette, idet HDOP-værdien ikke kun afhænger af antallet af satellitter (se appendiks 1).

På samme måde som i den første analyse, sammenholdtes HDOP-værdien med bebyggelsestætheden (figur 14). Der er dog ikke samme entydige sammenhæng, hvilket skyldes, at der er meget få logninger med en HDOP-værdi større end 4. Således er gennemsnitsværdierne beregnet på et lille datagrundlag, og det er derfor mest retvisende kun at betragte kurven, hvor HDOP er mindre end 4. Her svarer sammenhængen til forventningerne.

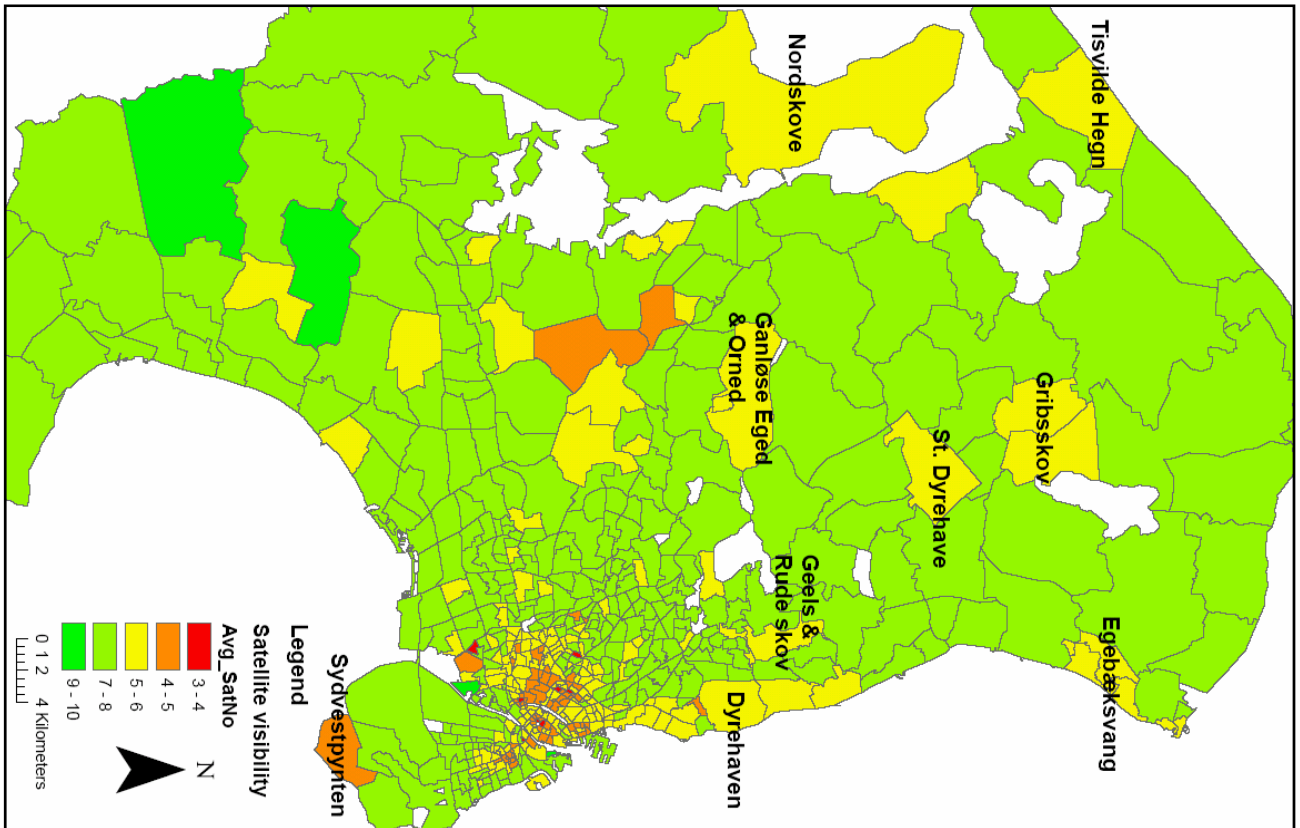


Figur 14. Det gennemsnitlige aktivitetsniveau (bebyggelsestæthed) som funktion af HDOP. Ved en HDOP-værdi mindre end 4 er der en forventelig sammenhæng med bebyggelsestætheden. Ved større værdier er datagrundlaget ikke tilstrækkeligt til at konkludere noget. Egen figur efter kilde: [Zabic, 2004]

HDOP blev også sammenholdt med de fem arealanvendelseskategorier. Resultatet fremgår af figur 15. Det ses, at den gennemsnitlige HDOP-værdi er klart lavest i landområder, mens den i parcelhusområder, parkområder og skovområder er middelhøj. Højest er den i områder med etageboliger.

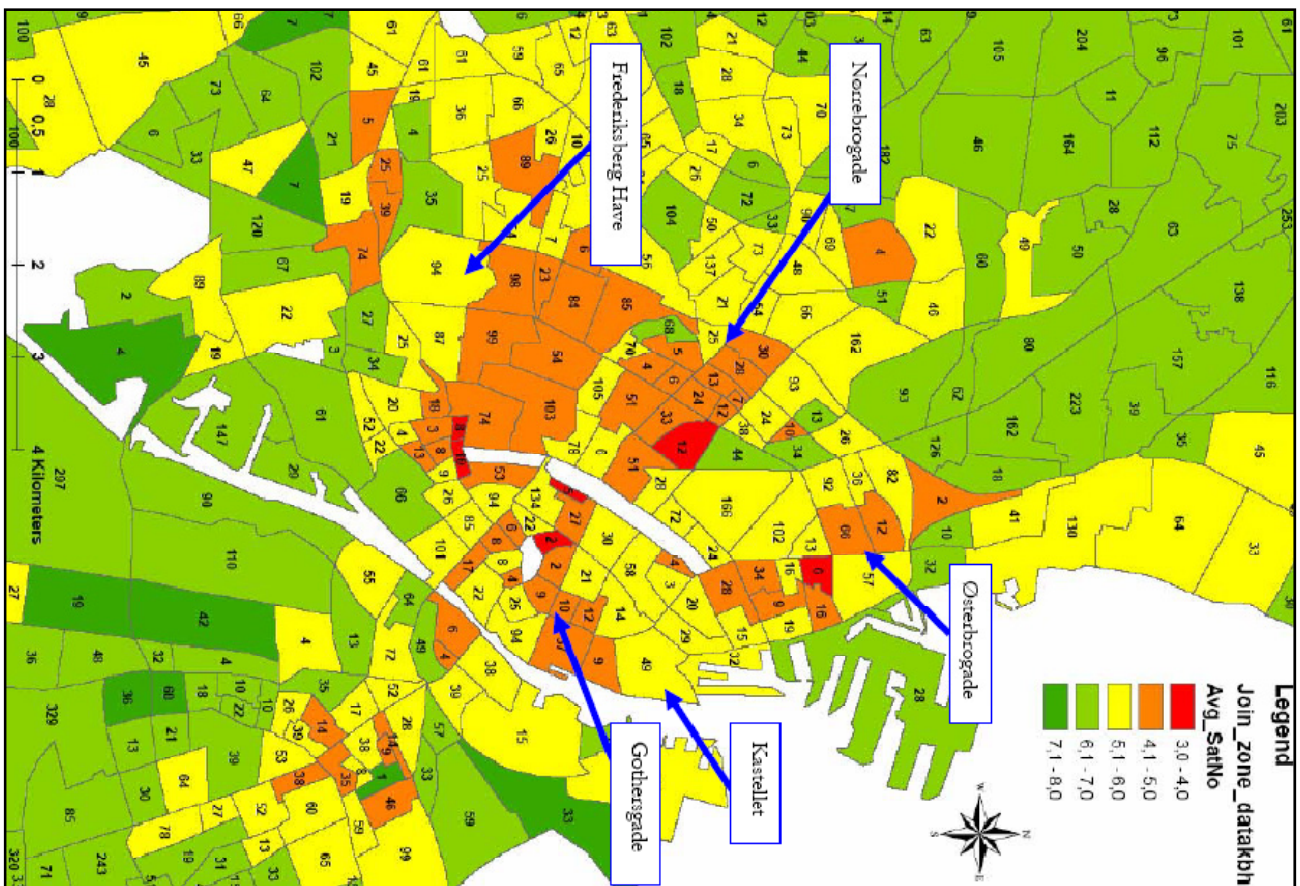


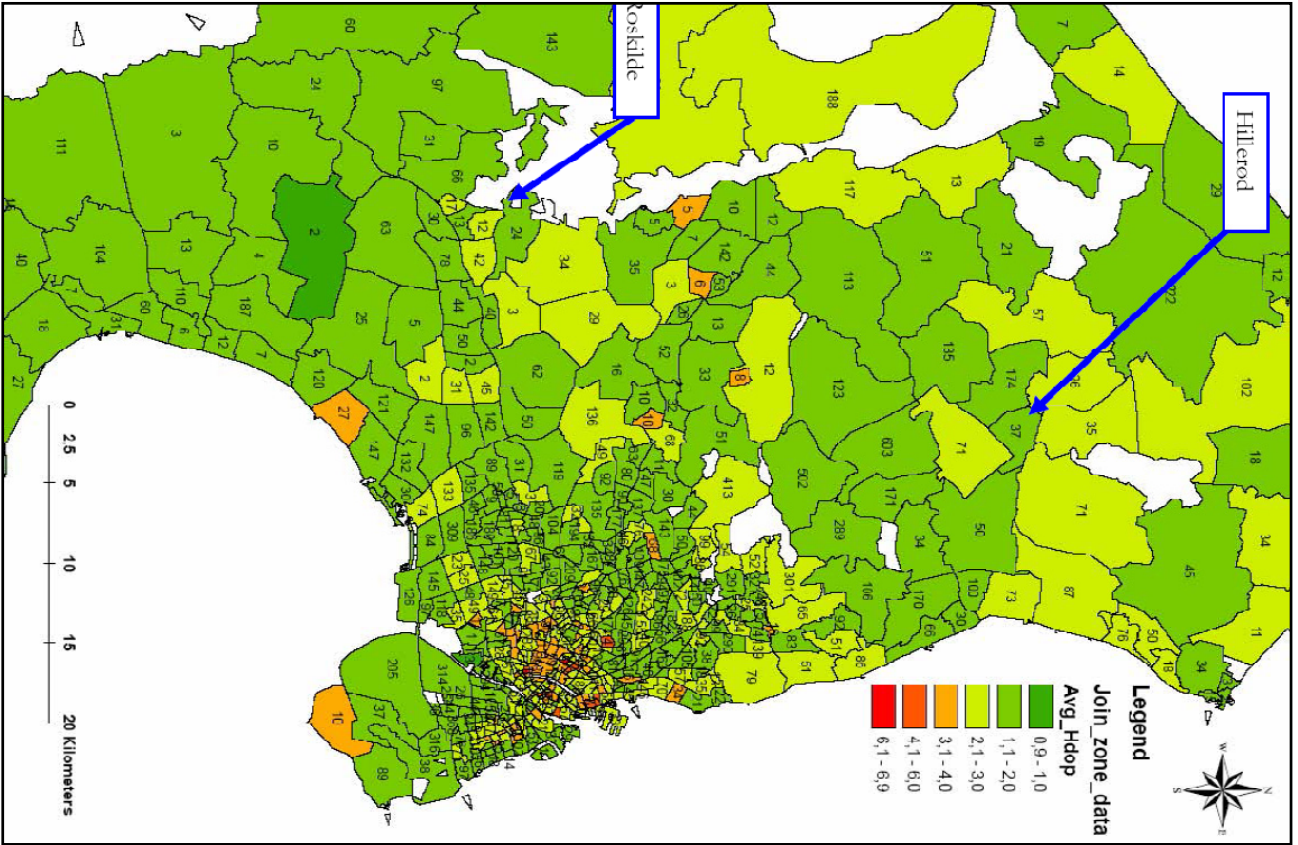
Figur 15. Den gennemsnitlige HDOP-værdi for hver arealanvendelseskategori. Egen figur efter kilde: [Zabic, 2004]



Figur 16 (ovenfor). Tilgængelige satellitter på Sjælland. Der er dårligst dækning i centrum af København og i skovområder.
Illustration: [Zabic, 2004]

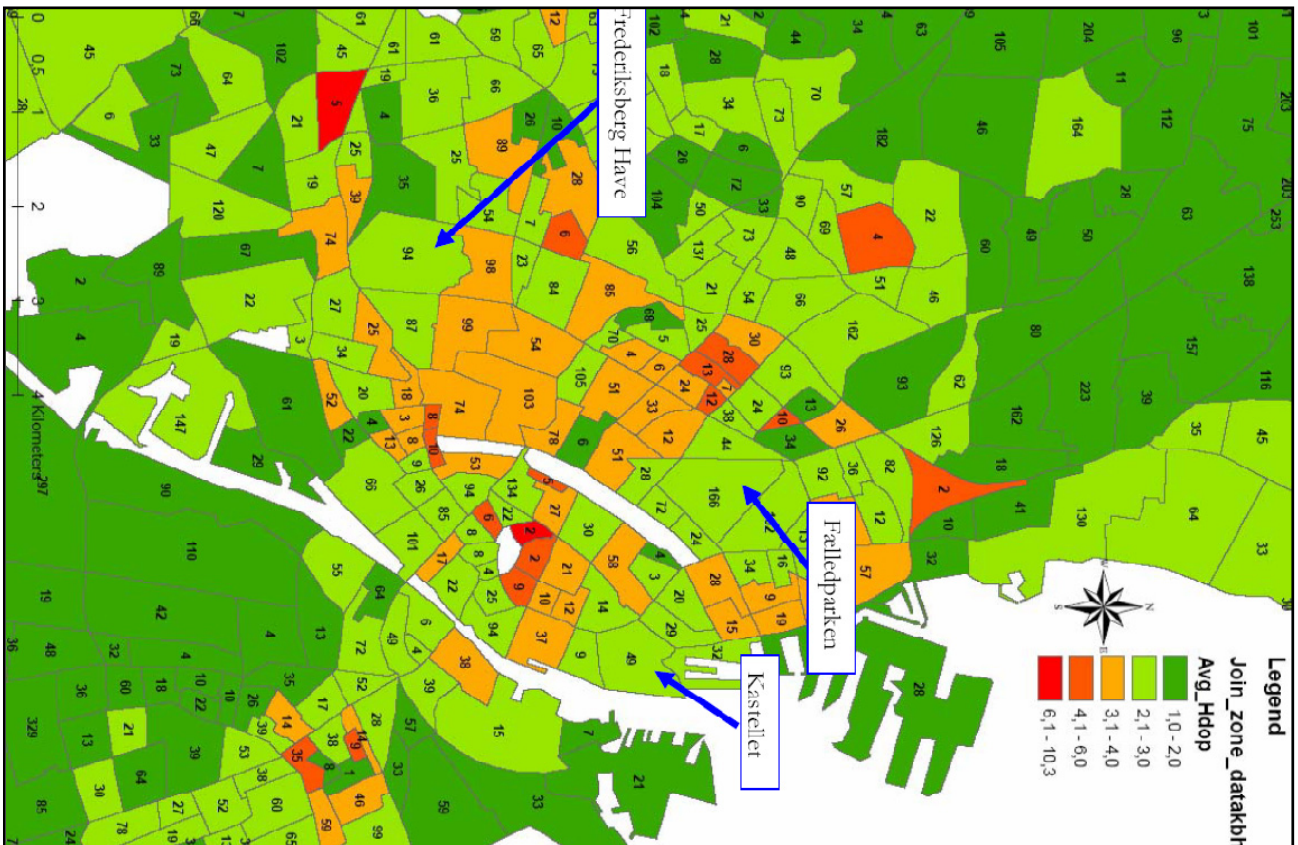
Figur 17 (nedenfor). Tilgængelige satellitter i København.
Illustration: [Zabic, 2004]





Figur 18 (ovenfor) HDOP på Sjælland. De højeste og dårligste værdier findes i centrum af København og i skovområder. Illustration: [Zabic, 2004]

Figur 19 (nedenfor). HDOP i København. Illustration: [Zabic, 2004]



Tilgængelige satellitter (vejbaseret)

I denne analyse blev det gennemsnitlige antal tilgængelige satellitter fundet for hver vej i København. Til beregningen benyttedes data inden for en buffer på 30 meter omkring vejene. Resultaterne fremgår af figur 20 på side 48. Igen ses det tydeligt, at der er færrest satellitter i det centrale København.

HDOP (vejbaseret)

I denne analyse blev den gennemsnitlige HDOP-værdi beregnet for hver vej i København. Til beregningen benyttedes data inden for en buffer på 30 meter omkring vejene. Resultaterne fremgår af figur 21 på side 48.

Der er ingen tvivl om, at de højeste HDOP-værdier findes i det centrale København, men det er trods alt få veje, der har et gennemsnit over 4,0. Samtidig skal det fremhæves, at der som tidligere nævnt er relativt få logningerne med HDOP-værdier over 4,0. Det betyder, at hvis en vej har fået en høj gennemsnitlig HDOP-værdi, så har der sandsynligvis ikke været ret mange logninger på den pågældende vej, og den beregnede værdi er derfor ikke pålidelig.

Udfald på veje

I denne analyse blev det undersøgt, hvor der forekommer udfald i positionslogningerne. Da der af gode grunde ikke er data for de pågældende steder, anvendtes den tidligere omtalte map matching-algoritme, som blev udviklet på Danmarks Tekniske Universitet til formålet. Algoritmen beregner den mest sandsynlige rute ud fra en række parametre.

I analysen blev forholdet mellem det samlede antal ture og antallet af ture fastlagt ved hjælp af map matching-algoritmen fundet for hver enkelt vej. På figur 22 og figur 23 på side 49 vises de københavnske veje med angivelse af dette forhold, hvor værdien 1,0 svarer til, at alle ture er fastlagt ud fra map matching-algoritmen (og dermed alle har været udfald), og værdien 0,0 svarer til, at alle ture er forløbet normalt uden udfald. Det skal understreges, at fejl i selve map matchingen kan medvirke til at give et forkert billede af virkeligheden.

Døgn- og årstidsvariation

Ved statistisk sammenligning af det gennemsnitlige antal tilgængelige satellitter og den gennemsnitlige HDOP-værdi for henholdsvis juni/juni og december/januar blev der ikke fundet signifikante forskelle, der kun-

ne danne grundlag for at konkludere, at der skulle være en årstidsvariation i GPS-kvaliteten.

Dette kan skyldes, at to der er to årstidsbestemte fejlkilder, som er særligt markante på hver sin årstid. I teorien skulle GPS-kvaliteten være ringere om vinteren end om sommeren på grund af forstyrrelse af signalmodtagelsen grundet større nedbørsmængder og kraftigere ionosfæriske påvirkninger, men omvendt skulle den øgede bladvækst på træerne om sommeren blokere for signalerne, så GPS-kvaliteten her skulle være ringere end om vinteren.

Ved statistisk sammenligning af det gennemsnitlige antal tilgængelige satellitter og den gennemsnitlige HDOP-værdi for henholdsvis nat og dag blev der ligeledes ikke fundet signifikante forskelle, der kunne danne grundlag for at konkludere, at der skulle være en døgnvariation i GPS-kvaliteten. Teoretisk set skulle kvaliteten ellers være ringere i dagtimerne end om natten på grund af signalforstyrrelser fra den øgede solaktivitet.

3.5.3. Konklusioner og anbefalinger

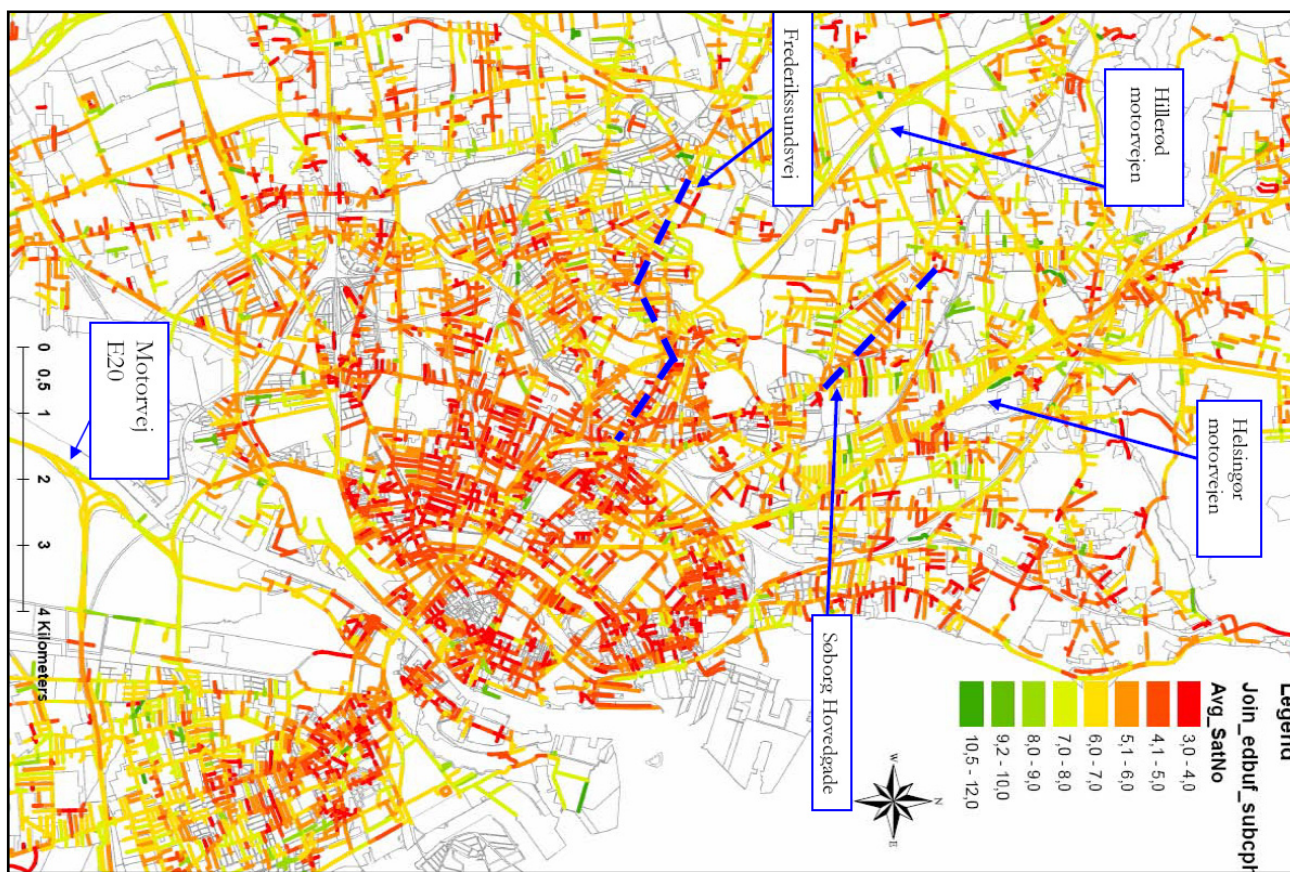
Hovedkonklusionen på de gennemgåede analyser var, at GPS ikke var nøjagtig nok til at danne grundlag for et kørselsafgiftssystem med vejbaseret kilometertaksering. Martina Zabic skriver blandt andet i rapporten:

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.

[Zabic, 2004, p154]

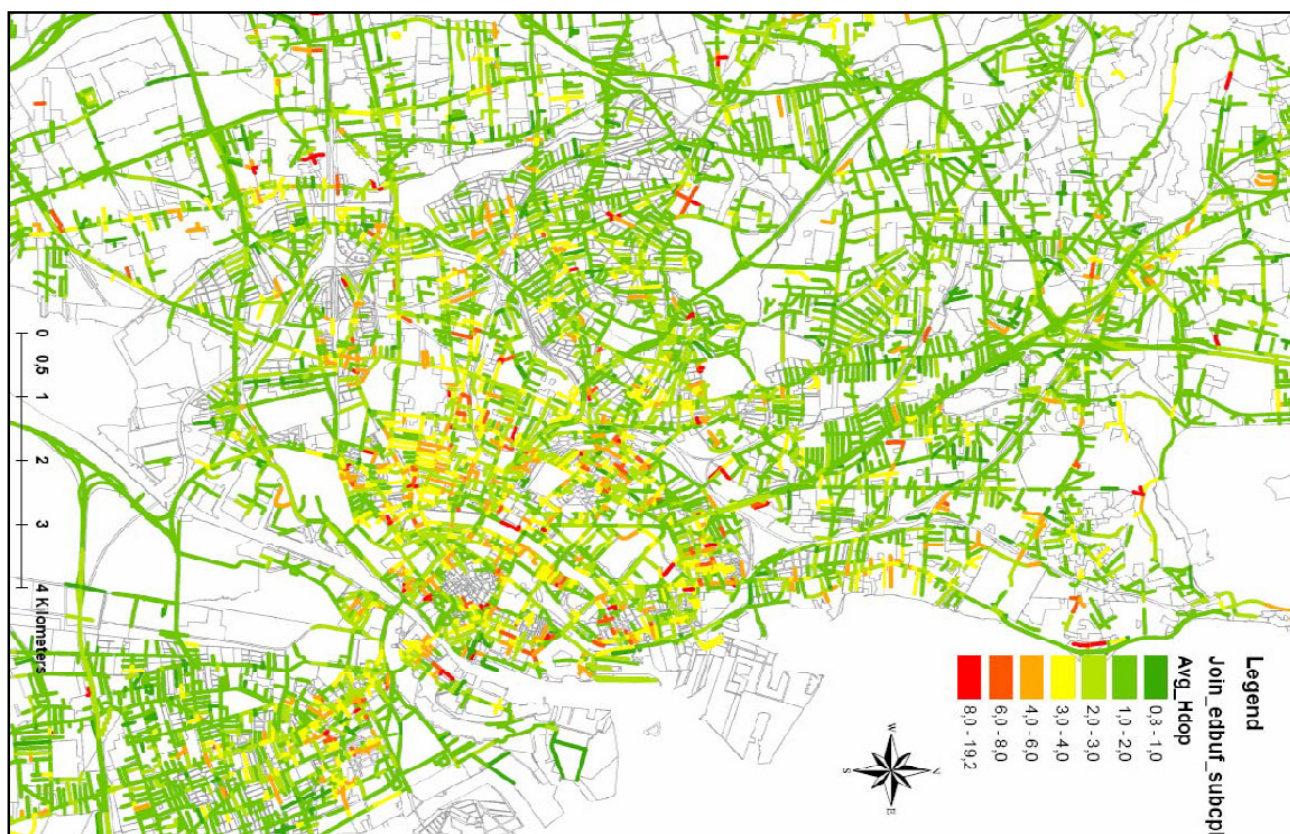
Hun frygter med andre ord, at vejene, hvor GPS-kvaliteten er dårlig, vil blive benyttet uforholdsmæssigt meget, fordi bilisterne her ofte vil kunne undgå at betale kørselsafgift på grund af registreringsusikkerheden. På den måde kommer kørselsafgifterne til at have den omvendte effekt end den ønskede – nemlig at bilisterne vælger de små veje frem for de store.

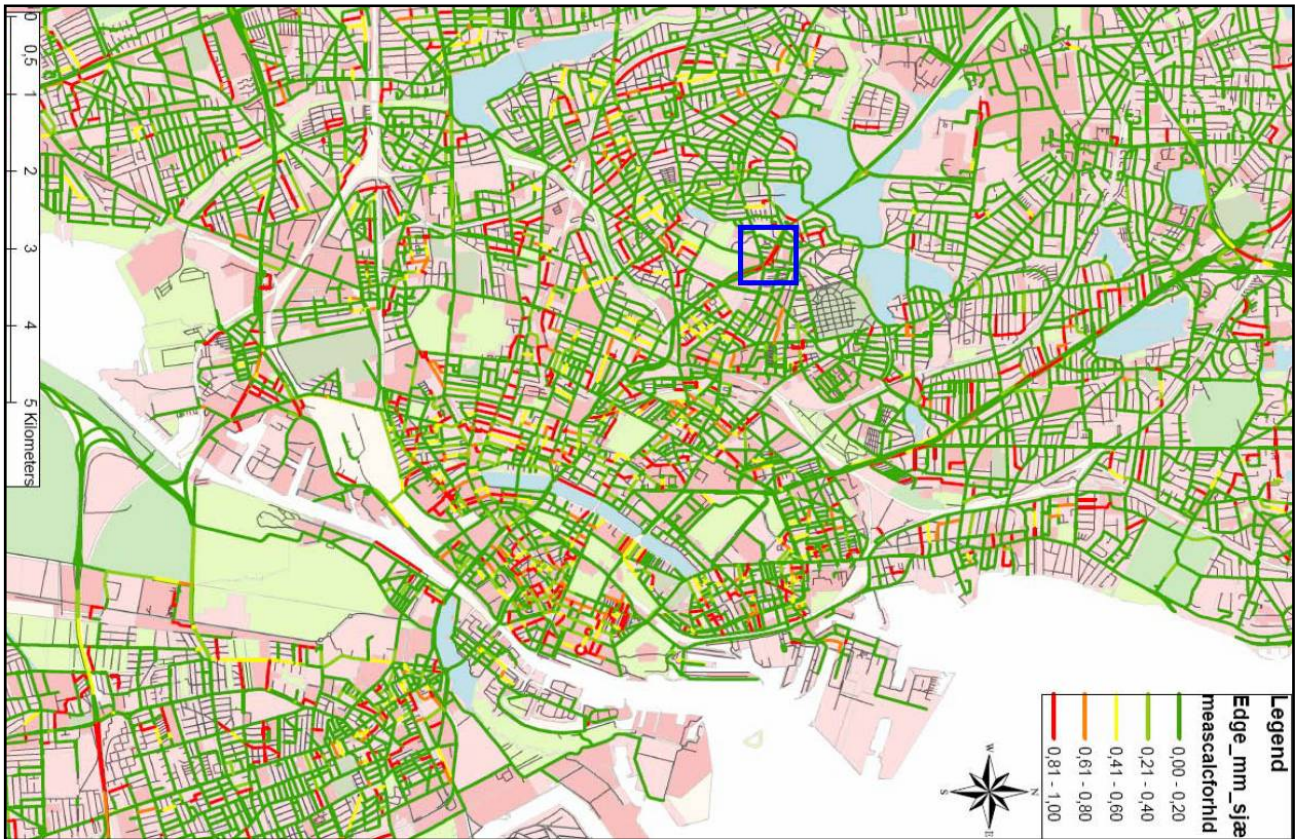
På baggrund af ovenstående anbefales det i rapporten, at et satellitbaseret kørselsafgiftssystem blot etableres med betalingszoner uden differentiering i forhold til vejtyper og -størrelser med videre. Zonegrænserne kan så placeres i korridorer, hvor der i henhold til analysernes kort over antal satellitter og HDOP er god GPS-kvalitet.



Figur 20 (ovenfor). Tilgængelige satellitter på vejene i København.
Illustration: [Zabic, 2004]

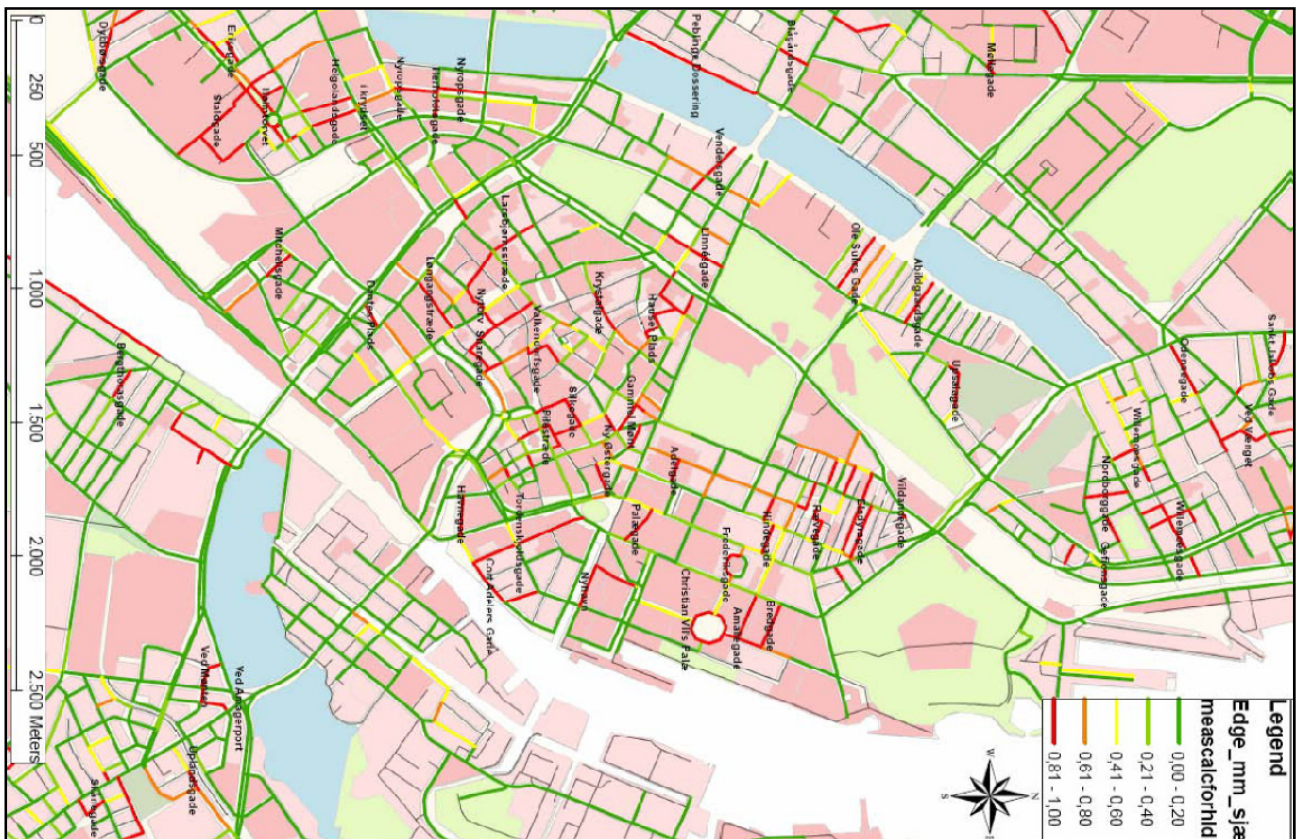
Figur 21 (nedenfor). HDOP på vejene i København.
Illustration: [Zabic, 2004]





Figur 22 (ovenfor). Udfald på vejene i København. Jo højere "meascalforhold" desto flere udfald.
Illustration: [Zabic, 2004]

Figur 23 (nedenfor). Udfald på vejene i centrum af København. Jo højere "meascalforhold" desto flere udfald.
Illustration: [Zabic, 2004]



3.6. Undersøgelse af reaktioner på kørselsafgifter

Afsnittet er baseret på artiklen *Responses to complex pricing signals: Theory, evidence and implications for road pricing* [Bonsall et al., 2006]. Artiklen er en sammenfatning af en rapport fra 2004 udarbejdet på University of Leeds.

3.6.1. Introduktion

Det engelske Department for Transport (DfT) har i en årrække været undersøgt mulighederne for et landsdækkende kørselsafgiftssystem. I 2004 blev en rapport udgivet, som påviste, at trafikken kunne sænkes 46 %, hvis et system med 10 takstniveauer blev indført, og 48 %, hvis et system med 75 takstniveauer blev indført.

De bagvedliggende modeller byggede på den antagelse, at bilisterne var i stand til at reagere og handle rationelt i forhold til afgiftssystemet. Ud fra den betragtning, at dette næppe vil være realistisk at forvente, blev det besluttet at undersøge folks evner til at forstå og overskue komplekse takseringssystemer. Undersøgelserne blev foretaget af forskere på University of Leeds.

3.6.2. Adfærdsundersøgelser

Undersøgelser af menneskers adfærd, når de skal tage beslutninger om komplekse problemstillinger, kan også være interessante i forhold til folks reaktioner på et kørselsafgiftssystem.

I rapporten fra University of Leeds beskrives følgende koncepter og teorier fra psykologien (egne oversættelser):

- Risk aversion (undgåelse af risici)
- Ambiguity avoidance (undgåelse af uklarheder)
- Bounded rationality (begrænset rationalitet)
- Heuristics (heuristisk (simpel) tænkning)
- Transaction costs (procesomkostninger)

Risk aversion (undgåelse af risici)

De fleste mennesker undgår helst at udsætte sig selv for unødvendige risici, og derfor vælger de også hellere et produkt, hvor de kender prisen, end et produkt, hvor prisen er usikker. Det gør de simpelthen af frygt for, at den ukendte pris er højere end den kendte pris.

Ambiguity avoidance (undgåelse af uklarheder)

Folk vælger på samme måde det produkt eller koncept, de forstår, frem for noget, der fremstår uklart eller uforståeligt. De gør de af frygt for, at det uforståelige viser sig at være dyrere eller værre end det forståelige, selvom de ved, at det forståelige ikke er optimalt.

Bounded rationality (begrænset rationalitet)

Mennesket har en begrænset evne til at behandle og huske information, og nogle forskere mener, at vi ikke er i stand til at behandle mere end syv forskellige numeriske eller abstrakte data. Derfor er folk kun delvist rationelle og kan i komplekse tilfælde ikke overskue, hvilken af flere muligheder, de skal vælge.

Heuristics (heuristisk (simpel) tænkning)

Heuristisk tænkning bruges ofte ved rutinearbejde eller i uvigtige situationer, samt når folk er pressede eller når informationen er kompleks eller svært tilgængelig.

Heuristik har mange former. Én form baseres på forsøg i at finde sammenhænge mellem variabler såsom pris/kvalitet eller tid/distance. Den ene variabel benyttes så til at forudsige den anden. Med nogen øvelse kan denne metode med tiden komme til at fungere udmærket, viser forskning.

En anden form baseres på fralæggelse af ansvar - enten ved at tage imod råd fra andre, ved at følge rygter eller forlydender, ved at undgå konfrontation med dilemmaet, eller ved simpelthen bare lade være med at tage stilling.

Transaction costs (procesomkostninger)

Den ydelse, der skal lægges i at behandle kompleks information, kan ses som en slags procesomkostning, og som alle andre omkostninger er procesomkostninger noget, som folk forsøger at minimere. Derfor bruges (ubevidst) hellere heuristisk tænkning, når der skal tages en beslutning, i stedet for på at bruge tid på at finde en løsning.

I forhold til et kørselsafgiftssystem har det den betydning, at det ikke kan forventes, at bilister hjemmefra bruger tid på at finde den billigste rute. I stedet vil de undervejs i kørslen løseligt sjusse sig frem til hvilken rute, der er mest optimal. Som nævnt tidligere kan denne form for simpel tænkning dog med tiden blive ret pålidelig.

3.6.3. Taksering i andre sammenhænge

Telefoni

Der er i telebranchen blevet gennemført mange undersøgelser af kundernes vaner og adfærd, og nogle af observationerne kan overføres til kørselsafgiftssystemer.

I telebranchen er det velkendt, at størstedelen af kunderne har ikke det telefonabonnement, der er mest fordelagtigt for dem. De fleste gider ikke bruge ressourcer på at sammenligne de forskellige abonnemeter, og er derfor ikke klar over, at de betaler overpris.

Nogle har muligvis på fornemmelsen, at der findes et abonnement, som er billigere end det, de har. De anser dog omkostningerne ved at sætte sig ind i, hvilke andre muligheder, der er, for større end den besparelse, de forventer at kunne opnå ved skift til et andet abonnement.

Andre ved godt, at de kan få et abonnement, der er billigere under givne omstændigheder, men beholder det dyre abonnement af den årsag, at det har den mest simple taksering og dermed giver en forudsigelig udgift. Derfor er de såkaldte *flatrate*-abonnemeter, hvor der betales en fast (høj) pris for ubegrænset forbrug, meget populære. Denne abonnementsform kendes også især fra internetudbydere.

Erfaringerne i telebranchen viser altså, at folk ikke er villige til at sætte sig ind i de udbudte telefonabonnemeter, og at der er en vis præference for det simple og forudsigelige, selvom det er dyrere. I forhold til et kørselsafgiftssystem kan det betyde, at bilisterne ikke nødvendigvis bruger tid på at planlægge ruter og vælge de billigste veje (som ellers er målsætningen), og at de frem for et avanceret takstsystem med mulighed for at køre til lave takster vil foretrække et simpelt system med højere takster.

Taxaer

I taxaer afhænger prisen for en tur af tidspunkt, varighed, distance og dermed også chaufførens rutevalg og eventuelle forhindringer på turen. Undersøgelser viser, at folk ofte kun har en ringe fornemmelse af, hvad prisen for en tur vil blive, inden den påbegyndes. Da der således ikke er nogen forventning om, hvad der skal betales, accepteres prisen ud fra den opfattelse, at den må være korrekt og retfærdig.

I forhold til et kørselsafgiftssystem kan det måske give mulighed for at mindske graden af åbenhed i systemet, og derved fjerne nogle mellemregninger i afgiftsberegningen. Her tænkes specielt på, hvad et eventuelt display skal vise under kørslen. Hvis den akkumulerede afgift vises i hele kroner eller hele femmere, vil det ikke være muligt for bilisten at opdage små ubetydelige fejl i størrelsesordenen øre. Fejl, som i øvrigt vil være både til bilistens fordel og ulempe, hvorfor de over tid ophæver hinanden og således er endnu mere ubetydelige.

I problemanalysen behandles blandt andet krav til nøjagtigheden i et kørselsafgiftssystem.

3.6.4. Konklusioner

Rapporten fra University of Leeds udmunder i en række diskussioner og konklusioner, hvoraf de vigtigste er medtaget herunder.

Først og fremmest slås det fast, at grundlaget for et succesfuldt kørselsafgiftssystem er logik og klarhed i takststrukturen. Selvom dette opnås, er det dog ikke realistisk at forvente, at bilisterne kan eller vil beregne prisen for hver enkelt køretur, de skal foretage. Det er snarere mere realistisk at håbe på, at bilisterne - muligvis efter nogen øvelse - er i stand til at vurdere hvilken af forskellige ruter, der er billigst.

For at gøre takststrukturen forståelig og logisk er det essentielt, at den grundigt bliver kommunikeret ud til bilisterne. Her skal der tages hensyn til, at folk er forskellige, og derfor bør strukturen forklares både i ord, tekst og tal samt billeder og figurer. Desuden skal der være både kortfattet og detaljeret information. Derudover er det vigtigt at takststrukturen tydeligt afspejler formål og hensigter med kørselsafgiftssystemet.

En god idé vil være at lade folk afprøve systemet i en periode i begyndelsen, så de kan lære afgiftsstrukturen af kende uden at skulle betale nogen afgift. Et andet element, der kan medvirke til at højne folks forståelse af systemet, er internettet, hvor der kan udvikles værktøjer som ruteplanlægning og personlige oversigter over kørsel og afgifter.

3.7. Opsummering

3.7.1. Trafikale effekter

I Tyskland har indførelsen af kørselsafgifter for lastbiler vist sig at være en god idé. Det vides ikke i hvor høj grad, afgifterne har ændret på transportsektorens brug af de tyske motorveje, men den tyske stat har i

hvert fald fundet en måde at finansiere drift og vedligeholdelse af vejnettet.

AKTA-forsøget i København viste, at indførelse af et kørselsafgiftssystem kunne nedbringe trafikken mellem 10 % og 20 % afhængig af hvilket system, der anvendtes. I forsøget skete den største reduktion i zone-takstsystemet i eftermiddagsmyldretiden og uden for myldretid, mens det mere "retfærdige" system med høj kilometertakst havde den største reduktion i morgenmyldretiden. Kørselsafgifterne affødte nogle naturlige adfærdsændringer hos forsøgsparticipanterne. Specielt rutevalg og antallet af ture blev ændret.

I både Seattle og København har forsøgene givet reelle håb om, at kørselsafgifter kan medvire til at sænke trafikken. I København var forsøgsresultaterne dog lidt bedre end i Seattle, men det skyldes sandsynligvis forskelle i afgiftsstrukturer og -niveauer. I Seattle, hvor det var dyrest at køre på de store veje og gratis at køre på de små, var faldet i trafikken gennemsnitligt 6,7 % i eftermiddagsmyldretiden. I København, hvor alle veje var afgiftsbelagte og afgiftsniveauerne i kilometertakseringsforsøget var zonebaserede, var faldet i trafikken ved lav kilometertakst (som prismæssigt mest ligner Seattle-forsøget) gennemsnitligt 12 % i eftermiddagsmyldretiden.

Forsøget fra London kan ikke på samme måde sammenlignes med Seattle og København, da det var teknologiorienteret, og ikke effektorienteret. I London er man dog efter indførelsen af det nuværende kørselsafgiftssystem meget positiv over for kørselsafgifter. Der er nemlig sket et betydeligt fald i trafikken i centrum af byen, og det giver naturligvis håb om, at et satellitbaseret kørselsafgiftssystem vil kunne nedbringe trafikken i hele den engelske hovedstad og muligvis i hele landet.

3.7.2. Erfaringer med satellitpositionering

I Tyskland var der en del problemer med at få systemet til at virke, hvilket var årsag til, at opstarten blev udskudt af flere omgange. Men siden indførelsen har systemet fungeret uden større problemer. GPS-positioneringen fungerer fint i forhold til motorvejsnettets grovmaskede topologi, selvom det enkelte steder ved tætliggende veje i motorvejskryds og ved parallelle forløb er nødvendigt at opstille sendere, som giver OBU'en ekstra positioneringsoplysninger.

Nogenlunde de samme erfaringer gjorde man i Seattle, hvor det afgiftsbelagte vejnet også er forholdsvis grovmasket. Her fungerede GPS-positioneringen – med få undtagelser ved nogle tætliggende veje – ud-

mærket uden for de tætteste byområder, mens der dog var problemer med modtageforholdene mellem de høje bygninger i de centrale områder.

I London, hvor forsøget kun drejede sig om at undersøge teknologierne, var resultaterne af GPS-undersøgelserne efter Transport for Londons opfattelse ikke positive. Her mener man ikke, at forsøgets bedste OBU med en gennemsnitlig prisafvigelse under 1,0 % er tilstrækkelig nøjagtig og pålidelig til, at et kørselsafgiftssystem kan bygge herpå. Måske bygger uviljen på nogle oplysninger om spredninger og ekstremaer for prisafvigelse, som ikke fremgår af de udgivne rapporter. I hvert fald virker det næsten utopisk at tro, at den gennemsnitlige afvigelse vil kunne komme ret meget længere ned.

I London blev effekten at det planlagte europæiske satellitpositioneringssystem, GALILEO, også undersøgt. Resultaterne gav forventning om, at positioneringsmulighederne vil blive bedre, men selv med både GALILEO, GPS og EGNOS ville store dele af London centrum stadig ikke have tilstrækkeligt mange synlige satellitter i 25 % af tiden, viste beregninger.

I AKTA-forsøget i København oplevede man, at der var problemer med modtageforholdene i de tætte byområder, og på den baggrund blev det vurderet, at GPS-positionering ikke var tilstrækkelig pålidelig og nøjagtig til et vejbaseret kørselsafgiftssystem, og at det kun med store bufferzoner kunne benyttes til at zonebaseret afgiftssystem.

De umiddelbare teknologierfaringer fra AKTA-forsøget stemmer meget godt overens med Martina Zabic' analyseresultater. Her påvises også store problemer med modtageforholdene i de tætte byområder.

3.7.3. Reaktioner på kørselsafgifter

Studiet fra University of Leeds påpeger, at det er vigtigt for succesen af et kørselsafgiftssystem, at takststrukturen er let gennemskuelig og at den bliver kommunikeret ud til bilisterne på flere forskellige måder, så alle har en chance for at forstå den.

Det kan ikke forventes at alle vil bruge tid og ressourcer på at beregne prisen for alle ture, men med tiden vil de fleste lære at kunne vurdere hvilken rute, der vil være mest hensigtsmæssig.

4. Projekt på 9. semester

Som nævnt i indledningen omhandlede projektarbejdet på 9. semester også satellitbaserede kørselsafgiftssystemer og kan således opfattes som et for-projekt til dette afgangsprøveprojekt. I dette kapitel bringes de vigtigste elementer fra 9. semester-rapporten. Rapporten kan findes på <http://www.plan.aau.dk/~sbs04/rapporter/>.

4.1. Formål

Et af formålene med projektet på 9. semester var at lave en model af et satellitbaseret vejafhængigt kørselsafgiftssystem til efterfølgende afprøvning. Idéen var at udvikle et system, som kunne beregne kørselsafgifterne med relativ stor nøjagtighed på trods af svingende GPS-kvalitet. Der blev udviklet en model, som arbejdede med tre vejtakstklasser og tre takstzoner.

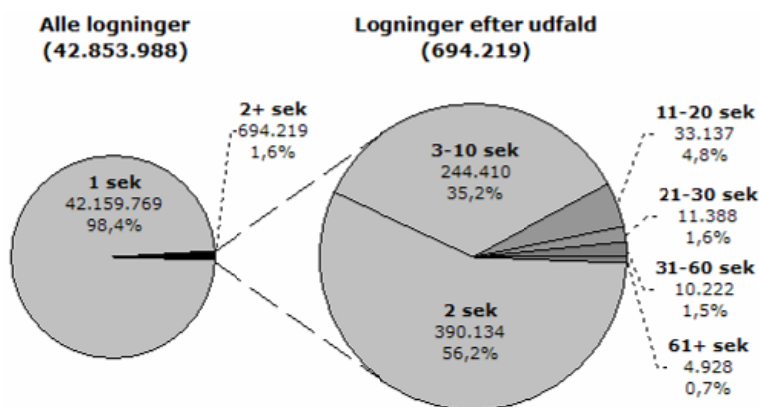
4.2. Datakvalitet

Modellen blev bygget op omkring GPS-logdata fra AKTA-forsøget i København. Disse data er af meget svingende kvalitet - både på grund af GPS-kvaliteten i hovedstadsområdet og på grund af dataindsamlingsprocedurerne. Fordi ud over at der naturligvis var fejl og udfald i logningerne, som det altid er tilfældet med GPS-logninger, så var der ikke logget under kørsel med mindre end 5 km/t. Det betyder, at der ofte er "udfalds"-lignende ophold i logningssekvensen.

Et andet minus ved AKTA-data er, at der ikke er logget fra bilernes odometer. Det har den betydning, at den kørte distance udelukkende kan beregnes ud fra GPS-punkterne, der som nævnt ovenfor er af noget upålidelig kvalitet.

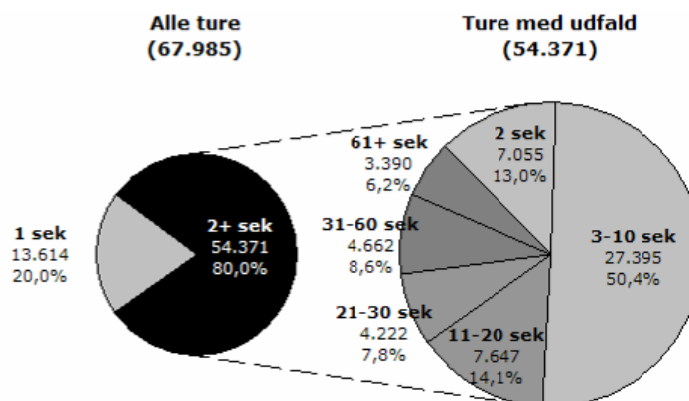
4.2.1. Udfald

Forekomsten af udfald i de benyttede data fra AKTA-forsøget fremgår af figur 24. Det ses, at 1,6 % af det samlede antal logninger er sket efter udfald (2+ sekunder mellem logninger). Ved 91,4 % af de 694.219 logninger efter udfald varer udfaldene kun op til 10 sekunder, og ved 0,7 % af logningerne efter udfald varer udfaldene længere end 60 sekunder.



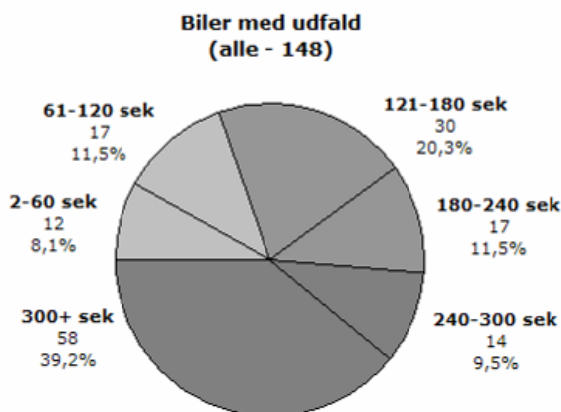
Figur 24. Varighed mellem logninger i forskellige varighedsintervaller. 1,6 % af det samlede antal logninger er efter udfald.

På figur 25 ses hvor mange ture, der har haft udfald, og hvor længe, de har varet. Det ses, at der i 80,0 % af det samlede antal ture forekommer mindst ét udfald (på 2+ sekunder). I 63,4 % af de 54.371 ture med udfald varer det største udfald højst 10 sekunder, og i 6,2 % af turene er der udfald længere end 60 sekunder.



Figur 25. Antal og andel af ture med maksimale udfald i forskellige varighedsintervaller. 80 % af turene har udfald.

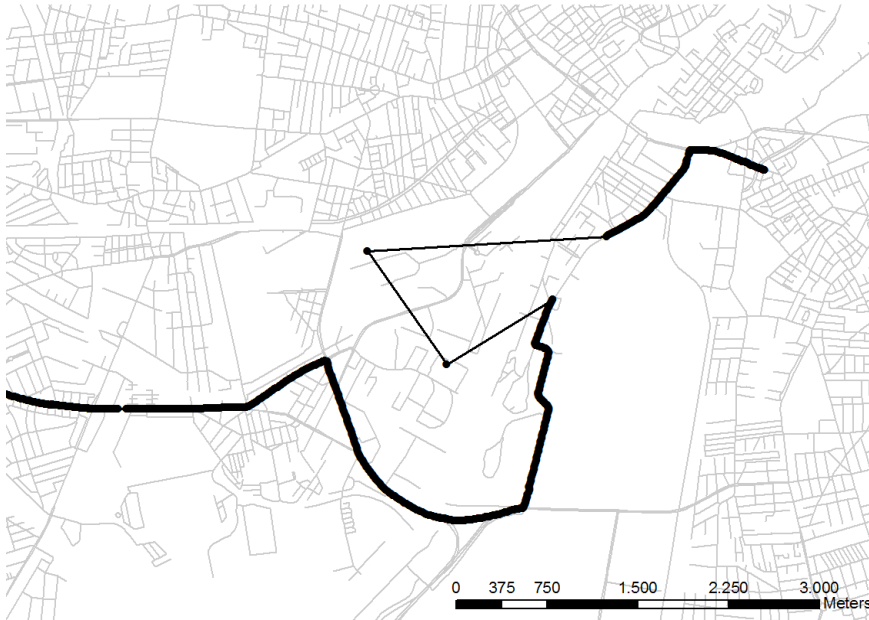
På figur 26 ses, hvor mange biler, der har haft mindst ét udfald.. Som det fremgår, har alle 148 biler haft udfald. Kun 19,6 % af bilerne har ikke haft større udfald end 60 sekunder, og hele 39,2 % har haft udfald på mere end 300 sekunder.



Figur 26. Antal og andel af biler med maksimale udfald i forskellige varighedsintervaller. Alle biler har udfald.

4.2.2. Fejl

Det er som regel let at opdage store fejl ved visuel inspektion (figur 27), men det kan være temmelig vanskeligt at automatisere denne proces.



Figur 27. Eksempel på logningsforløb, hvor der pludselig er to fejllogninger i forbindelse med et udfald. Denne ene fejllogning er 1.500 meter fra den nærmeste sandsynlige korrekte position.

Ekstrem hastighed, ekstrem acceleration eller stor retningsændring mellem to på hinanden følgende logninger kan være indikation på fejl, men det er vanskeligt at opstille kriterier, som giver en entydig og fyldestgørende identifikation af fejl. Det er specielt i forbindelse med udfald, at det er vanskeligt at identificere fejl.

Da det var så vanskeligt at opnå et pålideligt resultat af fejlsøgningen, gav det ikke megen mening at basere en decideret kvantitativ analyse herpå.

Det blev dog forsøgt at anvende de tre indikatorer til en form for dataoptimering, hvor de værste tilfælde blev frasorteret. Det viste sig dog, at det ingen betydning havde for modellens evne til at beregne kørselsafgifterne.

4.3. Afprøvning af model

4.3.1. Forsøgsopstillinger

100 tilfældige ture fra 68 forskellige biler i AKTA-forsøget blev anvendt til at afprøve modellen. Turene blev kørt igennem modellen, der beregnede en pris for hver enkelt tur i henhold til takststrukturen. Efterføl-

gende blev priserne sammenlignet med de korrekte priser, der blev bestemt manuelt ved visuel inspektion af logningerne i ArcGIS.

Først viste det sig, at der var stor sammenhæng mellem den relative prisafvigelse og den relative distanceafvigelse. Med andre ord skyldtes en forkert beregnet pris ofte, at turens længde som følge af udfald og fejl ikke kunne opmåles præcist ud fra GPS-positionerne. For at efterligne et system, hvor distancen kan beregnes ved hjælp af et odometer i bilen, blev der foretaget en "distancekorrektion" af prisen (ved at dividere den beregnede pris med den beregnede distance og multiplicere med den korrekte distance).

Der blev foretaget en række afprøvninger med forskellig opsætning.

Blandt andet blev forskellige former for takstfiltrering afprøvet. Takstfiltrering er den tid eller distance, der skal køres i en ny takstzone, før at taksten reelt skifter. Dette blev indført i modellen for at udgå, at taksten skulle skifte blot ved krydsning af en vej med en anden takst.

To forskellige takststrukturer blev også afprøvet. En, hvor takstinterval-lerne var lige store (figur 28), og en, hvor taksten steg progressivt (figur 29).

Figur 28. Type 1 takststruktur, hvor kilometertaksten springer med 15 øre mellem hvert trin.

| Type 1 | Land | By | Tæt by |
|----------------|------|----|--------|
| Primære veje | 15 | 30 | 45 |
| Sekundære veje | 30 | 45 | 60 |
| Lokale veje | 45 | 60 | 75 |

Figur 29. Type 2 takststruktur, hvor kilometertaksten springer med 15 øre mellem de to nederste trin og med 30 øre mellem de to øverste trin.

| Type 2 | Land | By | Tæt by |
|----------------|------|----|--------|
| Primære veje | 10 | 25 | 55 |
| Sekundære veje | 25 | 40 | 70 |
| Lokale veje | 55 | 70 | 100 |

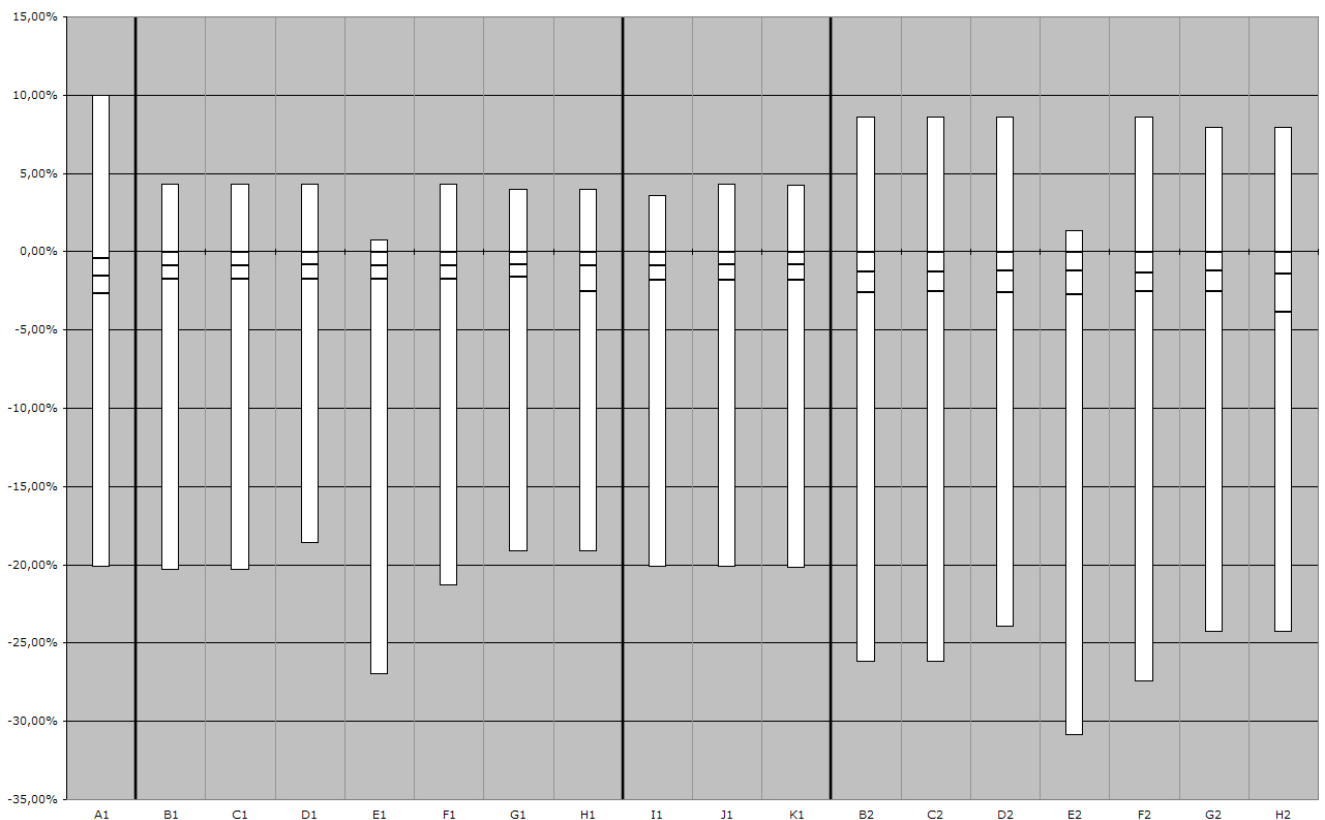
4.3.2. Resultater af afprøvninger

På figur 30 ses sammenfatningen af resultaterne for de 18 prøver, som blev udført. Blokkene illustrerer minimum og maksimum samt de tre kvartiler for hver prøve. Tallet i prøvenummeret angiver hvilken type takststruktur, der er afprøvet. A er en basisprøve uden korrektion for distanceafvigelse. B er basisprøver med korrektion for distanceafvigelse. C-H med forskellige takstfiltreringer. I-K er med frasortering af fejllog-

ninger ved hjælp af de tre forskellige metoder; hastighed, acceleration og retningsændring.

Det fremgår af figuren, at der er større spredning på prisafvigelserne i prøver med type 2 takststruktur end med type 1. De største afvigelser er generelt større og de mindste afvigelser er generelt mindre.

Dette er helt i overensstemmelse med, at der er større relative forskelle mellem takstniveauerne i type 2 end i type 1. Det betyder, at når takstsystemet beregner en forkert takst, så har det størst konsekvens i type 2.



Af figur 30 fremgår det ligeledes, at inden for hver takststrukturtype ligger de tre kvartiler næsten identisk for hver prøve. Kun H-prøverne skiller sig ud i denne sammenhæng ved at have en lavere 1. kvartil end de øvrige prøver. Det antyder, at H-prøvernes takstfiltrering på 200 meter ikke fungerer lige så godt som 100 og 50 meter.

Figur 30. Minimum og maksimum samt de tre kvartiler af den procentvise prisafvigelse for grundprøverne.

De ses endvidere på figuren, at prøve D1 har den mindste spredning på afvigelserne, men at prøve E1 har den mindste maksimale afvigelse. D1 har takstfiltrering på 10 logninger og E1 har takstfiltrering på 20 logninger – hvad der er bedst, er svært at sige med så lille et datagrundlag. Alt i alt er resultaterne så ens, at det med datagrundlagets størrelse taget i

betragtning ikke er muligt at sige, om der er nogen form for takstfiltrering, der er bedre end andre.

Prøverne I-K viser, at der som nævnt tidligere ikke er nogen effekt ved at frasortere fejllogninger ved søgning efter ekstrem hastighed, acceleration eller vinkelændring.

4.4. Konklusion

I et takstsystem med lige store takstintervaller (takststruktur type 1) ligger op til 81 % af de beregnede priser inden for +/- 2 % af den korrekte pris, og højst 2 % af de beregnede priser er mellem 2 % og 5 % højere end den korrekte pris. Samtidig er det muligt at holde spredningen så forholdsvist lav, at kun op til 6 % af de beregnede priser er mellem 10 % og 30 % mindre end den korrekte pris.

I et takstsystem med progressivt stigende takster (takststruktur type 2) ligger op til 67 % af de beregnede priser inden for +/- 2 % af den korrekte pris, og højst 3 % af de beregnede priser er mellem 2 % og 9 % højere end den korrekte pris. Samtidig er det muligt at holde spredningen så forholdsvist lav, at kun op til 8 % af de beregnede priser er mellem 10 % og 30 % mindre end den korrekte pris.

5. Problemanalyse

I problemanalysen diskuteres behovet for nøjagtighed i et kørselsafgiftssystem, og der opstilles scenarier for hvilke funktioner, der er nødvendige ved forskellige grader af nøjagtighed.

5.1. Grundlæggende problemstillinger

Det initierende problem er beskrevet i indledningen og handler om, hvor nøjagtigt et satellitbaseret vej- og distanceafhængigt kørselsafgiftssystem kan laves. Dette er dog ikke muligt at undersøge, hvis der ikke er taget stilling til problemets kontekst. Derfor må det fastlægges, hvilke overordnede målsætninger, afgiftssystemet skal opfylde, samt hvordan det skal fungere i praksis. I den forbindelse er det nødvendigt også at diskutere kravene til systemets nøjagtighed – altså hvor store fejlberegninger i kørselsafgiften, der kan accepteres.

5.1.1. Overordnede målsætninger

Ifølge almindelig økonomisk og trafikteknisk teori kan der lægges afgifter på et trafiksystem med et eller flere af følgende hovedmål [Johansson & Mattsson, 1995]:

- Styring af trafikken
- Begrænsning af forurening
- Tilvejebringelse af provenu

Et satellitbaseret vejafhængigt kørselsafgiftssystem kan opfylde alle tre hovedmål på både nationalt og lokalt plan, og det er desuden det eneste system, der er i stand til at opkræve afgifter afhængigt af både tidspunkt, lokalitet (zone og/eller vej) og kørt distance.

Med hensyn til lokalitet kan der arbejdes med zonetakster, så det er dyrest at køre i tætbyområder, og vejnettet kan inddeles i forskellige takstniveauer, så det er dyrest at køre på de små veje, som ikke er bygget til eller har kapacitet til meget trafik. Taksterne kan også gradueres over tid, således at kørsel i myldretid er dyrere end de øvrige tidspunkter. Økonomiske og trafikale modeller skal afgøre, hvordan takstniveauerne skal være for at opnå de ønskede effekter (hovedmål).

Ønsker og krav til opbygning af takststruktur skal holdes op mod funktionalitet og brugervenlighed samt krav til nøjagtighed, som beskrives herunder.

5.1.2. Funktionalitet og brugervenlighed

Hvis et kørselsafgiftssystem skal vinde accept hos bilisterne, skal det være enkelt og simpelt at anvende og forstå.

Det betyder først og fremmest, at der skal være så lidt "arbejde" for bilisten, som muligt. Dette er i høj grad tilfældet i et satellitbaseret system, hvor betaling ikke skal ske under kørslen, men i stedet kan ske automatisk eksempelvis pr. efterkrav eller via PBS.

Dernæst betyder det, at det takststrukturen skal være let gennemskuelig, så bilisterne nemt kan finde ud af hvor og hvornår, der er hvilken taksering. Jævnfør studiet fra University of Leeds [Bonsall et al., 2006] (se afsnit 3.6) er dette også nødvendigt for at afgiftssystemet kan fungere efter hensigten. I modsat kan eller vil bilisterne nemlig ikke sætte sig ind i hvilken rute, det er billigst og smartest at køre ad, og så opfyldes hovedmålet om trafikstyring ikke.

Det kan være vanskeligt at finde den rette balance mellem (optimal) trafikstyring og gennemskuelighed. For at styre trafikken bedst muligt, skulle taksterne i teorien tilpasses trinløst til hver enkelt vej, men det vil ikke fungere i praksis, da bilisterne ikke vil kunne rumme så mange oplysninger og derfor ikke vil kunne handle rationelt derefter.



Figur 31. Displayets konstante visning af takst (nederst) og akkumuleret afgift (øverst) var i Seattle med til at minde bilisterne om, at deres kørsel kostede dem penge.

Foto: [PSRC, 2006]

For at opnå styring af trafikken er det også vigtigt, at bilisternes erkendelse af kørselsafgifterne stimuleres. Ved forsøget i Seattle [PSRC, 2006] (se afsnit 3.2) fortalte deltagerne, at displayets konstante oplysninger om takst og akkumuleret afgift (figur 31), som hele tiden mindede om, at kørslen kostede penge, var meget vigtig for påvirkning af transportvænerne.

5.1.3. Krav til nøjagtighed

Nøjagtigheden kan måles både absolut og relativt, og desuden er det ikke uden betydning, om en afvigelse er positiv eller negativ. Der er altså allerede her en række grænseværdier, der skal overvejes.

Hvis det antages, at prisafvigelse for et antal ture varierer tilfældigt og er lige meget over og under den korrekte pris, udligner prisafvigelse hinanden. En sådan form for afvigelse vil være acceptabel, men det kræver, at bilisten ikke har mulighed for at kontrollere prisen for den enkelte tur.

Selvom en vis unøjagtighed muligvis kan accepteres, er det imidlertid meget vigtigt, at prisen for given en tur altid er den samme. I modsat

fald vil det medføre undren og mistillid over for systemet. Et kørselsafgiftssystem skal fungere i en kontekst, hvor folk ofte kører den samme tur hver dag, og det vil derfor hurtigt blive opdaget, hvis der er udsving på afgifterne. Nøjagtighed er således også et spørgsmål om kongruens.

5.2. Scenarier

Man kan forestille sig forskellige måder, hvorpå et kørselsafgiftssystem skal fungere og fremstå i forhold til bilisten. Herunder hvilket udstyr, der skal installeres i bilerne.

5.2.1. Display

Ved at tilkoble display til bilens OBU gives mulighed for at vise takst for den pågældende vej og zone, samt at vise den akkumulerede afgift for turen og eventuelt for en længere periode.

Man kan forestille sig at oplysningerne om takst og afgift kan kobles til bilens eventuelle GPS-navigatør, hvorved ruteplanen kan beregnes med hensyntagen til afgifterne. Det vil så også være muligt at anføre taksterne på det digitale vejkort, så bilisten kan se hvilke veje, han bør undgå.

Denne aktive kommunikation har de fordele, at bilistens rutevalg og kørevaner i højere grad end ellers påvirkes af kørselsafgifterne.

Ulempen med den løbende visning af taksten er, at det "afslører" små unøjagtigheder i afgiftsberegning. Visning af positionen på GPS-navigatøren har desuden den ulempe, at det "afslører" ubetydelige fejl i positioneringen, som ikke har nogen eller kun ringe betydning for takseringen. Endvidere umuliggør løbende visning af taksten kontrolberegning af rute/afgift efter endt tur, og det besværliggør løbende bagudrettet kontrolberegning.

Desuden kan bilisten kan blive distraheret, så opmærksomheden fjernes fra trafikken (dette er dog også tilfældet for GPS-navigatører i øvrigt).

5.2.2. Højtaler

Displayet kan erstattes af en højtaler for nogle af funktionernes vedkommende. Fordelen ved dette er, at bilisten ikke distraheres af at kigge på displayet.

De oplysninger, der med fordel kan formidles auditivt, er takst og akkumuleret afgift. Taksten kan eksempelvis oplyses, når den ændres, og

efter ønske også med jævne mellemrum samt når kørslen afsluttes. Den akkumulerede afgift kan oplyses for hver hele krone eller for hver fem kroner alt efter behov. Denne måde at oplyse om afgiften på er hensigtsmæssig, hvis der er unøjagtigheder i beregningen, da det ikke hele tiden er muligt at kontrollere beløbet.

En højtaler er mere pågående end et display, og vil derfor muligvis være bedre til at påvirke bilistens kørevaner.

6. Problemformulering

I problemformuleringen opstilles en overordnet problemstilling, og der opsættes målsætninger og krav i forhold til problemløsningen.

6.1. Overordnet problemstilling

Det skal undersøges, om nye dataindsamlingsværktøjer (OBU'er, GPS-modtagere) er så meget mere nøjagtige og pålidelige, at der kan opbygges et kørselsafgiftssystem, der i udgangspunktet er mere nøjagtigt end den model, der blev udviklet på 9. semester.

6.2. Metode

Problemstillingen løses i udgangspunktet på samme måde som i 9. semester-projektet, hvilket betyder, at der opbygges en model af et kørselsafgiftssystem, som efterfølgende afprøves.

Der skal dog indsamles nye data med forhåbentligt bedre og mere nøjagtigt udstyr, og der skal være adgang til bilernes odometer, så et af 9. semester-projektets store mangler udbedres.

6.3. Kravspecifikation

Da det i henhold til studiet fra University of Leeds er erfaringen, at folk ikke kan forstå og reagere rationelt på komplekse kørselsafgiftssystemer, slækkes imidlertid på kravene til afgiftsnuancering i forhold til 9. semester-projektet.

Der skal således kun være to vejklasser, som skal fremstå logiske og let forståelige for bilisterne. Dette vil givetvis betyde, at afgiftssystemet vil kunne laves mere nøjagtigt.

Systemet skal kunne fungere sådan, at der løbende kan oplyses en akkumuleret afgift i enten display eller højttaler. Afgiften skal afrundes til hele kroner, hvilket betyder, at en prisnøjagtighed på 50 øre er acceptabel.

7. Model af kørselsafgiftssystem

I dette kapitel redegøres for opbygning og afprøvning af modellen af et kørselsafgiftssystem, som er beskrevet i problemformuleringen. Desuden er der analyser af de anvendte data.

7.1. Konfiguration af takststruktur

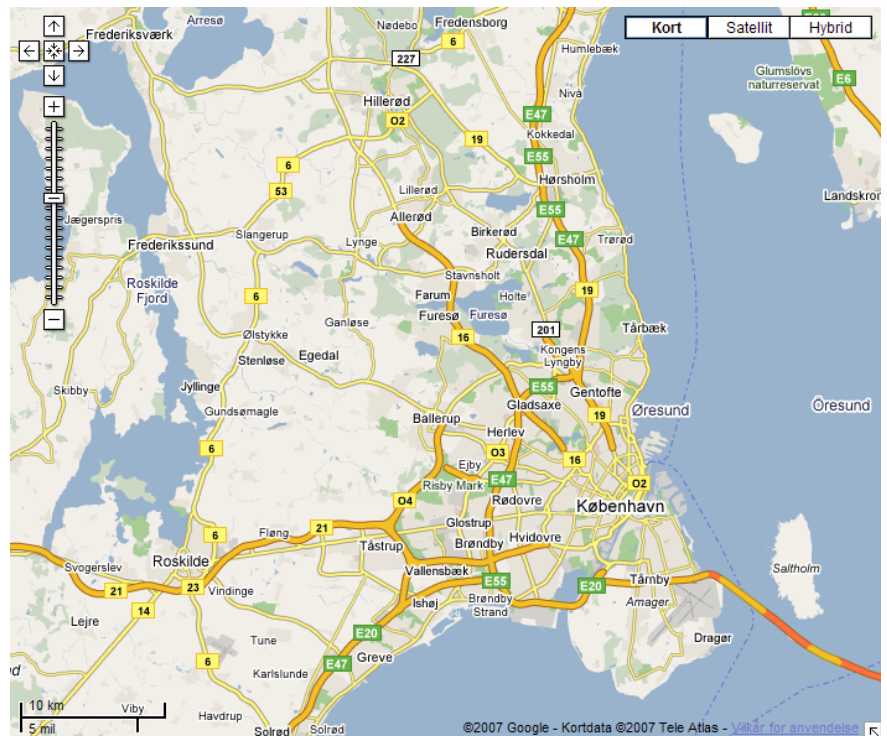
7.1.1. Vejklassifikation

Til modellens vejtakster benyttes vejtemaet fra Dansk Adresse- og Vej-database 2004 (DAV2004), som ajourføres af blandt andre COWI. Vejtemaet består af et kort og en database over alle landets veje. Databasen indeholder blandt andet oplysninger om vejklassifikationer, og vejklasserne er som følger [DAV, 2007]:

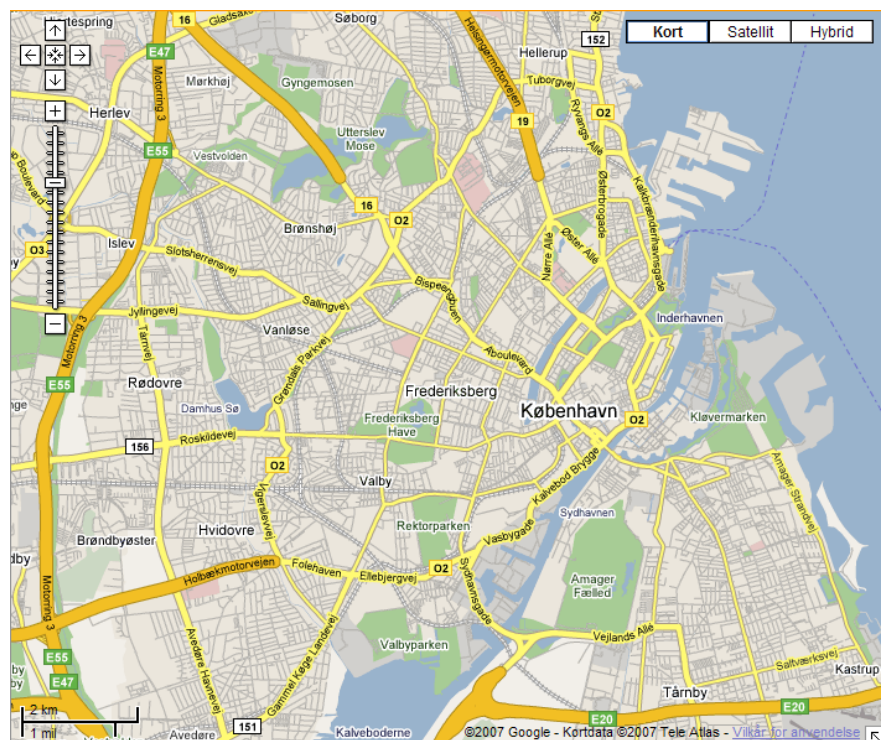
1. Motorveje
2. Motortrafikveje
3. Primærruter bredere end 6 m
4. Sekundærruter bredere end 6 m
5. Veje mellem 3 og 6 m
6. Anden vej

DAV2004 er nogle år ældre end de indsamlede logdata, og der vil således være forskel mellem DAV2004 og det vejnet, som taxaerne har kørt på. De mest problematiske tilfælde vil være, når der er logninger på en vej, som ikke er med på DAV2004, for her vil det ikke være muligt at knytte kørslen til en vejstrækning.

Det er vurderet, at vejklassifikationen i DAV2004 ikke afspejler vejenes reelle status og benyttelse, og derfor ikke er særlig anvendelig i forhold til differentiering af vejtakster. Der er i stedet oprettet to nye takstklasser i DAV2004-temaet med udgangspunkt i vejnettet fra Google Maps (figur 32 og figur 33). De overordnede veje herfra (orange og gule veje) anvendes til den billige takstklasse 1, mens de øvrige veje anvendes til den dyrere takstklasse 2.



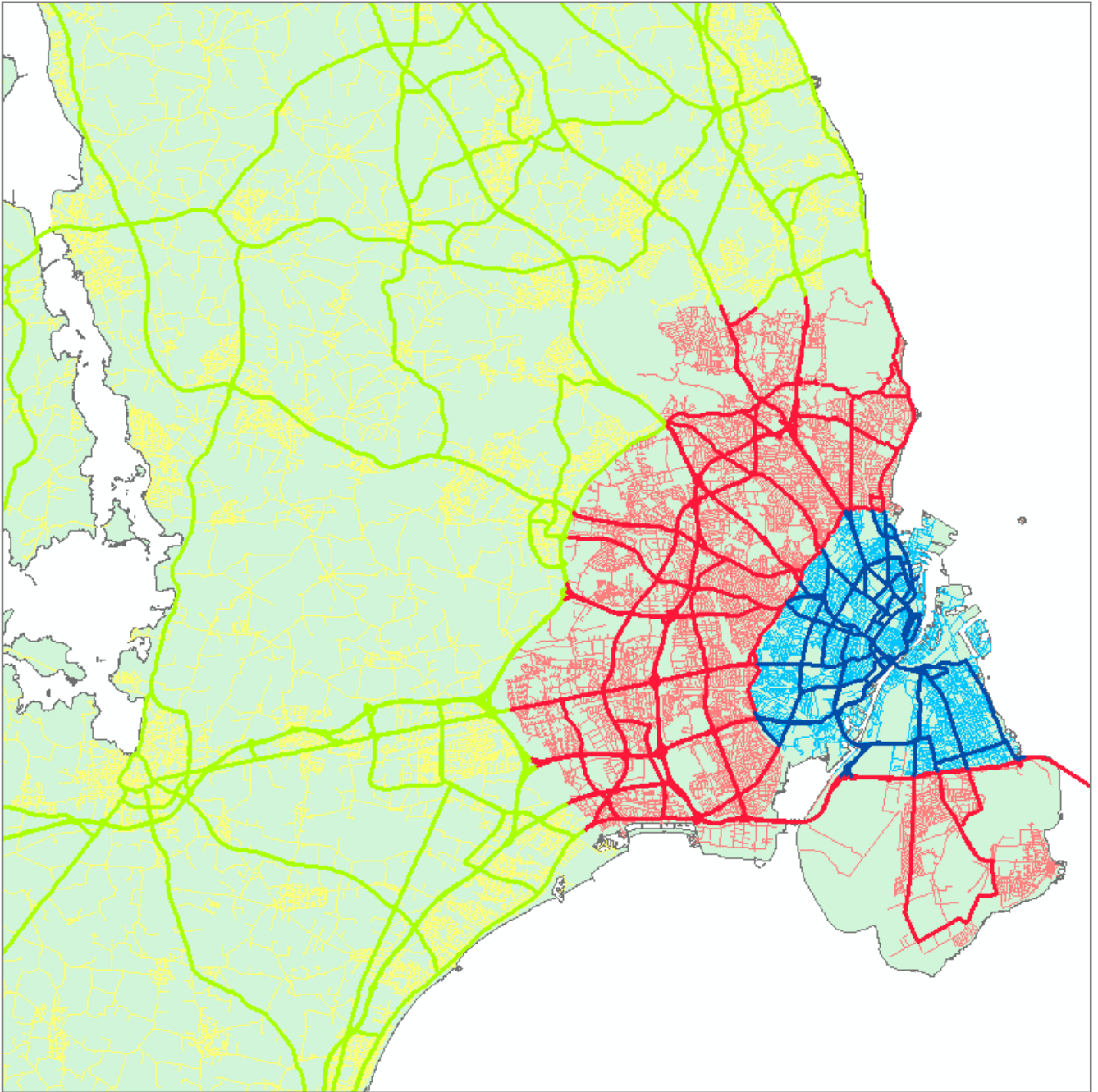
Figur 32. Kortudsnit fra Google Maps som viser de primære ruter i hovedstadsområdet, som er benyttet til takstklasse 1.



Figur 33. Kort udsnit fra Google Maps som viser de primære ruter i København, som er benyttet til takstklasse 1.

7.1.2. Zoneinddeling

Københavnsområdet inddeles desuden i tre cirkelringzoner med forskellig takst, hvor den dyre tætbyzone i store træk dækker området inden for Ring 2, og den mellemdyre byzone i store træk dækker området mellem Ring 2 og Motorring 4, mens landzonen dækker det øvrige sjælland (figur 34).



Zonegrænserne ligger så vidt muligt langs hovedfærdselsårer på den østlige side, således at bilisterne har størst mulig incitament til at søge væk fra centrum.

Zoneinddelingen er her i modellen ikke videre gennemtænkt, da det ikke har nogen større betydning for afprøvning af modellen. I et virkeligt system vil det eksempelvis kunne blive aktuelt at lægge mindre byer i byzoner med mellemhøj takst.

Figur 34. Zoneinddeling med tætby, by og land. Desuden fremgår takstklasserne også af kortet.

7.1.3. Takstniveau

Takstniveauet skal optimalt set tilpasses efter bilisternes vilje til at betale for kørslen, og dette kan bedst gøres ved at afprøve et kørselsafgiftssystem på en gruppe forsøgspersoner, ligesom det blev gjort i AKTA-forsøget og i forsøget i Seattle (se afsnit 3.2).

I modellen anvendes et takstniveau, som ligger i samme størrelsesorden som takstniveauet i AKTA-forsøget. Takstskemaet ser ud som følger:

| Øre pr. km. | Primær vej | Sekundær vej |
|-------------|------------|--------------|
| Land | 20 | 40 |
| By | 50 | 70 |
| Tætby | 80 | 100 |

Til sammenligning kan prisen for en bil, der kører 15 kilometer pr. liter benzin til en pris á 10 kr. pr. liter, omregnes til 67 øre pr. kilometer.

7.2. Logdata

7.2.1. Dataindsamling

I samarbejde med Københavns Kommune, TAXA 4x35, Ishøi's Autoelektronik og M-tec er der til dette projekt blevet indsamlet logdata fra fem taxaer i København. Taxaerne har i forskellige perioder mellem august og november 2007 været udstyret med hver en OBU, som har registreret kørslen og en række parametre.

De anvendte OBU'er er udviklet af M-tec i Pandrup i samarbejde med Trafikforskningsgruppen på Aalborg Universitet, hvor de benyttes i forskningsprojektet Spar På Farten. OBU'erne er derfor tilpasset specifikt til forskningsprojektet, og der er således en række funktioner, som ikke er benyttet i forbindelse i dette projekt.

OBU'erne er udstyret med et GPS-modul, som har 12 kanaler og derfor kan låse sig til 12 satellitter på samme tid (12 er også det maksimale antal synlige satellitter på samme sted på Jorden). Modtageren har en opgivet nøjagtighed på 1,2 meter (CEP95), og i tilfælde af at GPS-signalet mistes, er modtageren i stand til at finde det igen på cirka 100 millisekunder. Afhængig af om en tur har en såkaldt "hot start" eller "kold start", tager det typisk mellem 4 og 36 sekunder at estimere turens første position. [Fastrax, 2007]

Til GPS-modulet hører en ekstern antenne, som har været monteret indvendig i forruden for optimal satellitforbindelse.

OBU'erne fungerer på den måde, at den hvert sekund logger blandt andet tidspunkt, GPS-position, kørselsretning, GPS-hastighed og odometer-hastighed samt HDOP-værdi og antallet af tilgængelige satellitter.

Ved utilstrækkelig satellitforbindelse kan OBU'en af gode grunde ikke logge position og GPS-hastighed, men den logger odometer-hastigheden, hvilket er af stor betydning for dette projekt. Det muliggør nemlig en beregning af den kørte distance selv under signaludfald.

OBU'erne har ikke været tilgængelige for chaufførerne og har i øvrigt fungeret automatisk uden betjening. Hver nat er de indsamlede data blevet sendt fra OBU'erne til en server via en indbygget GSM-enhed.

7.2.2. Databehandling

Efter at logningerne er blevet sendt fra taxaerne til serveren i komprimerede logfiler, er alle data blevet indsat i en Oracle-database i tabellen "GPS1S". Her er de første dele af den videre databehandling foretaget.

Frasortering af data

Når OBU'erne er installeret i taxaerne, skal de bruge noget tid på at kalibrere odometer-hastigheden. Indtil dette sker, logges den mere upræcise GPS-hastighed som odometer-hastighed. For at undgå fejlagtige hastigheder i analyserne og i afprøvningen af modellen er alle logninger før kalibreringen frasorteret.

Derefter er en stor del af logningerne blevet frasorteret, fordi de er blevet indsamlet, mens taxaerne har holdt stille og ventet på kunder. Frasorteringen er sket ved at slette alle logninger med en odometer-hastighed på 0 km/t. Herved slettes også logninger, hvor taxaerne har holdt stille af trafikale årsager, men det drejer sig om relativt få logninger i sammenligning med de logninger, som sker mens taxaerne holder og venter på kunder. Denne frasortering er foretaget for dels at minimere datamængden, så den nemmere kan håndteres, og for dels at undgå at analyser af datakvaliteten påvirkes af de ligegyldige logninger, der er indsamlet ved stilstand.

I datasættet forekommer der med jævne mellemrum logninger, som indeholder ugyldige data. Fejlene er sket under logningen i OBU'erne, og der er derfor ikke andet at gøre end at frasortere disse logninger. Alle pågældende logninger har forkert årstal i angivelsen af logningstidspunkt og/eller GPS-position (0,0), og er dermed lette at finde og slette.

Der er desuden en mængde helt tomme datarækker, som ved indsætning i databasen end ikke er blevet tilknyttet et taxa-id. Disse rækker er naturligvis også frasortet.

I næste afsnit om dataanalyser bliver blandt andet forekomsten af ugyldige logninger og tomme datarækker analyseret nærmere.

Hele proceduren og de anvendte SQL-forespørgsler kan ses i på CD-bilaget.

Inddeling i ture

Normalvis vil man kunne inddele logningerne i ture ved at se på, hvornår der er ophold i logningssekvensen, men da taxaernes sjældent er blevet slukket mellem to ture, er logningen fortsat kontinuerligt over flere ture og har således ingen ophold.

Derfor er logningerne blevet inddelt i ture efter at logninger med en odometer-hastighed på 0 km/t er blevet frasortet. Idet også logninger, hvor taxaerne har holdt stille af trafikale årsager (eksempelvis for rødt lys), er blevet frasortet, anses en periode uden logninger (altså uden logninger med en odometer-hastighed større end 0 km/t) på 120 sekunder som et turskift.

Da taxaerne ofte holder i taxakø, mens de venter på kunder, forekommer det ofte, at taxaerne holder helt stille i en periode, kører en smule frem og derefter holder stille igen. Dette bevirker, at den ovenfor beskrevne metode til turinddeling giver mange meget små ture, som reelt ikke er ture. Derfor benyttes kun ture over 300 sekunder til analyserne og til modellen.

Geokodning

Alle logninger indeholder en GPS-position (UTM 32N WGS84), som kan knytte dem til deres geografiske logningssted. Dette er benyttet til at tilføje oplysninger om takstzone og vejtakstklasse, allerede mens data ligger i databasen. Dette er mindre tidskrævende end at hente alle data ud af databasen og lægge dem ind i ArcGIS for at foretage koblingen dér.

Først er GIS-temaet med de tre takstzoner, som er beskrevet i afsnit 7.1.2, importeret i databasen i tabellen "takst_zoner". Her er der oprettet et såkaldt *Spatial Index* over polygonerne, som gør det muligt at udføre GIS-forespørgsler i databasen.

Dernæst er de veje fra DAV2004, som i afsnit 7.1.1 er udvalgt til takstklasse 1, importeret i databasen i tabellen "dav2004_takstklasse1", hvorefter der også over disse data er oprettet et *Spatial Index*.

Koblingen mellem logninger, takstzoner og vejtakstklasser er herefter sket i forbindelse med udtrækning af logningerne ved hjælp af en databaseforespørgsel.

Hele proceduren og de anvendte SQL-forespørgsler kan ses på CD-bilag.

7.2.3. Dataanalyse

Frasortering af data

I tabellen med samtlige logninger, "GPS1S", er der i alt 13.222.917 data-rækker. Som beskrevet ovenfor er en del logninger blevet frasorteret af på grund af ugyldige eller tomme data.

Tomme data, hvor selv taxa-id mangler, udgøres af 113.691 datarækker svarende til 0,86 %.

Ugyldige data, hvor logningstidspunkt og/eller GPS-position er ugyldige, udgøres af 69.632 datarækker svarende til 0,53 %.

Der er således 13.039.594 gyldige logninger tilbage fordelt på de fem taxaer, hvilket svarer til 98,61 %.

Der er som tidligere beskrevet også blevet frasorteret logninger, som er logget før kalibrering af odometer-hastigheden. Disse logninger beløber sig til 54.749 svarende til 0,42 % af de gyldige logninger.

Frasorteringen af logninger med en odometer-hastighed på 0 km/t er noget mere omfattende, da der som nævnt er tale om, at taxaerne holder med tænding på bilen, mens de venter på kunder. Således er der frasorteret 4.278.751 logninger på denne måde, hvilket svarer til 32,81 % af de gyldige logninger.

26.978 logninger kvalificerede sig til frasortering både ved at være logget før kalibrering af odometer og ved at have en odometer-hastighed på 0 km/t. Som grundlag for de øvrige dataanalyser af GPS-kvalitet og til brug ved udarbejdelse og afprøvning af modellen er der således 8.733.072 logninger tilbage. Det svarer til uafbrudt kørsel i 101 døgn.

Nedenstående tabel giver en oversigt over frasorterede data.

| | Alle logninger | | Ugyldige logninger | | Gyldige logninger | | Frasorterede logninger | | Tilbageværende logn. | |
|---------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|-------------------|----------------|------------------------|----------------|----------------------|----------------|
| | Antal | Andel | Antal | Andel | Antal | Andel | Antal | Andel | Antal | Andel |
| Ingen taxa-id | 113.691 | 0,86% | | | | | | | | |
| Taxa 1 | 1.556.424 | 11,77% | 1.807 | 2,60% | 1.554.617 | 11,92% | 606.202 | 14,08% | 948.415 | 10,86% |
| Taxa 2 | 2.820.887 | 21,33% | 6.315 | 9,07% | 2.814.572 | 21,58% | 922.407 | 21,42% | 1.892.165 | 21,67% |
| Taxa 3 | 1.849.275 | 13,99% | 6.600 | 9,48% | 1.842.675 | 14,13% | 743.247 | 17,26% | 1.099.428 | 12,59% |
| Taxa 4 | 2.779.164 | 21,02% | 3.057 | 4,39% | 2.776.107 | 21,29% | 989.348 | 22,97% | 1.786.759 | 20,46% |
| Taxa 5 | 4.103.476 | 31,03% | 51.853 | 74,47% | 4.051.623 | 31,07% | 1.045.318 | 24,27% | 3.006.305 | 34,42% |
| I alt | 13.222.917 | 100,00% | 69.632 | 100,00% | 13.039.594 | 100,00% | 4.306.522 | 100,00% | 8.733.072 | 100,00% |

GPS-kvalitet

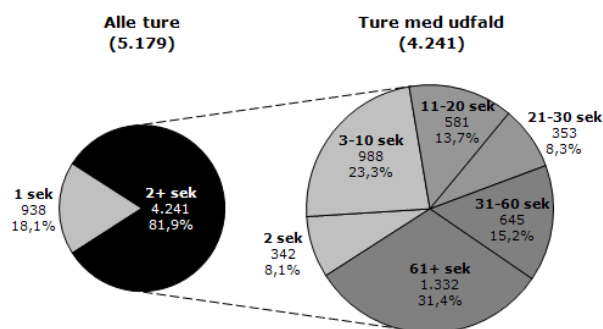
For de 8.733.072 logninger er der gennemsnitligt 6,49 tilgængelige satellitter og en gennemsnitlig HDOP-værdi på 2,52.

Der foreligger ikke sammenlignelige gennemsnitsværdier fra AKTA-forsøget, men at dømme efter graferne over tilgængelige satellitter (se side 42) og HDOP-værdier (se side 43) fra Martina Zabic' afgangsprøve [Zabic, 2004], så var gennemsnitsværdierne dengang i samme størrelsesorden.

Udfald

Efter inddeling af logningerne i ture og frasortering af de ture, der er kortere end 300 sekunder, er der 5.179 ture med 8.521.792 logninger tilbage. Af disse ture er 84 % længere end 10 minutter og 17 % længere end en time.

Blandt de 5.189 ture har 4.241 ture svarende til 81,9 % større eller mindre satellitudfald, hvor kun odometer-hastighed kan logges (figur 35). I 31,4 % af turene er der udfald i højst 10 sekunder, mens der i andre 31,4 % af turene er udfald i mere end 60 sekunder.



Figur 35. Antal og andel af ture med varighed af udfald. 81,9 % af turene har udfald.

Bemærk at disse værdier ikke kan sammenlignes direkte med værdierne fra den tilsvarende analyse fra 9. semester-projektet. Det skyldes, at

værdierne fra dengang oplyser om det største udfald på en tur - ikke de samlede udfald på en tur.

7.3. Opbygning af model

7.3.1. Systemdesign

Der er i forhold til kørselsafgiftssystemet ikke nogen grund til at knytte de enkelte logninger til en konkret vejstrækning. Derfor er der ikke anvendt noget avanceret map matching-program. I stedet er takstsystemet opbygget som et buffersystem, hvor der omkring hver enkelt vej dannes en takstzone. Der anvendes en buffer på 30 meter, da dette er den teoretiske usikkerhed på GPS-målinger.

Kravet om ikke at snyde bilisterne er meget vigtigt. Derfor er systemet indrettet på en sådan måde, at der selv ved den mindste tvivl om takstniveau vælges den laveste takst. I praksis betyder det, at hvis en logning ligger inden for mere end én takstbuffer, så vælges den laveste takst. Det kan illustreres på den måde, at de billige veje og de tilhørende buffer ligger oven på de dyre veje, og dermed har de første prioritet. Denne udformning af buffersystemet vil givetvis snyde afgiftsopkræveren, da bufferne flere steder overlapper hinanden.

For at øge afgiftsberegningens nøjagtighed er der i takstsystemet indbygget et filter, som minimerer risikoen for, at der benyttes forkerte takstniveauer som beskrevet ovenfor. Filteret fungerer ved, at der først skiftes takst, når der er kørt over 50 meter med et nyt takstniveau.

Takstsystemet er ikke designet til at indkalkulere kørselstidspunkt, men det vurderes, at det vil være forholdsvist let at tilføje dette element, så systemet også kan operere med myldretidstakst.

7.3.2. Beregningsalgoritmer

I afgiftsberegningen er der to beregningsprocedurer for hver enkelt logning. Den ene procedure beregner prisen for at køre på den pågældende vej, og den anden procedure beregner prisen for at køre i den pågældende zone. Til sidst summeres de to priser. De to beregningsprocedurer har samme opbygning og ser ud som følger:

- Find vej og zone
- Filtrer logninger og fastlæg takst
- Beregn og summer pris

I beregningerne bruges kun oplysninger fra den foregående logning, hvilket gør det muligt at overføre algoritmerne til et system med realtidsvisning af prisen. Dog forsinker filteret beregningerne en smule, indtil der er kørt 50 meter i en ny zone.

Se beregningerne i Excel-regnearket på CD-bilaget.

7.4. Afprøvning af model

Når prisen for en tur er beregnet af modellen som beskrevet ovenfor, skal den sammenlignes med den korrekte pris. Den korrekte pris bestemmes ved manuelt at udpege hver enkelt rute på et vejkort i ArcGIS og herefter multiplicere distance med takst for hver zone og vejklasse.

I praksis fungerer det sådan, at der laves en visuel inspektion af turene i ArcGIS. De vejsegmenter, som det kan ses, at den enkelte tur er gået ad, markeres. Herefter eksporteres den markerede del af vejtemaets attribut-tabel til en kommasepareret fil (*.csv), som importeres i Excel. Dette gøres for hver tur.

I Excel haves altså en række filer med en liste over alle de vejsegmenter, som hver enkelt tur har gået ad, og for hvert segment er der oplysninger om vejklasse og zone samt om segmentets længde. Herefter er det ingen sag at beregne den korrekte pris.

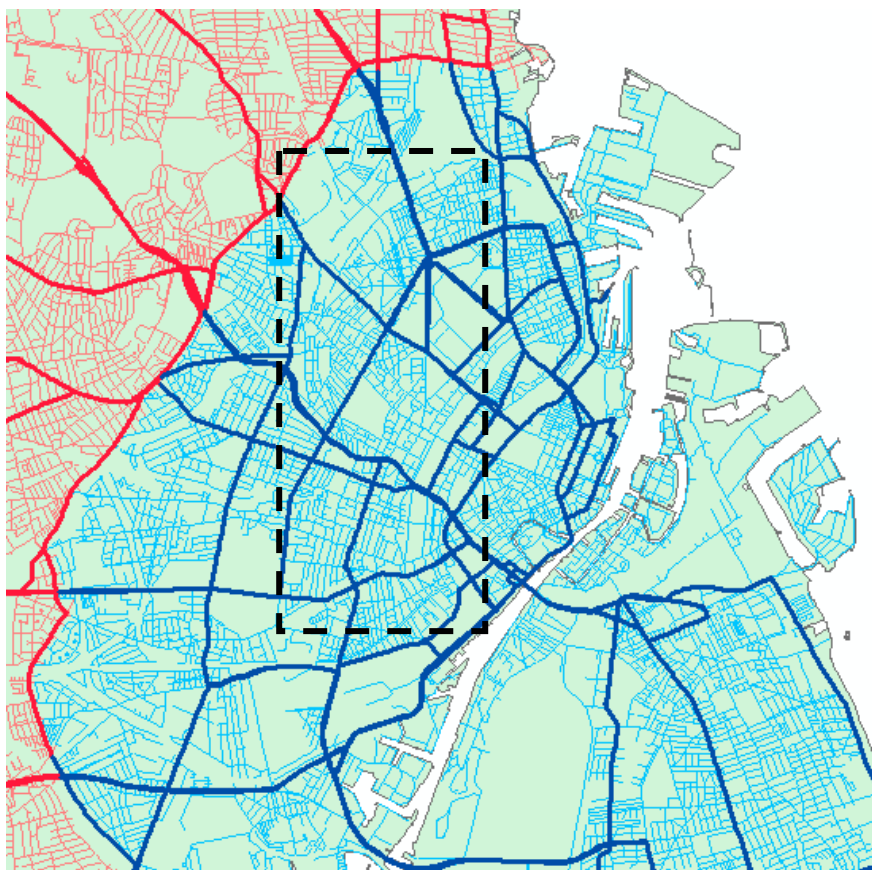
Resultaterne fremgår af næste kapitel.

8. Resultater

I dette kapitel præsenteres resultaterne af den afprøvning af modellen, som er beskrevet i forrige kapitel.

8.1. Afprøvningsdata

Der er anvendt 50 tilfældige ture, som ligger fuldstændigt inden for en zone, som går fra Kalvebod Brygge i syd til Helsingørmotorvejens begyndelse i nord og fra Frederiksberg Have i vest til Rådhuspladsen i øst (figur 36).



Figur 36. Udsnit af København hvor fra 50 ture er tilfældigt udvalgt.

Området er valgt af den årsag, at der her skal være særligt dårlig satellitdækning og dermed særligt dårlig GPS-kvalitet.

Størstedelen af turene udgangs- eller endepunkt ved Hovedbanegården på Bernstorffsvej. Turene varierer i længde mellem 400 og 11.000 meter.

For de 50 ture er der en gennemsnitlig HDOP-værdi på 3,30 og gennemsnitligt 5,35 tilgængelige satellitter.

39 af turene har udfald, men heraf har 28 kun udfald i op til 20 sekunder. Kun en tur har udfald mere end 60 sekunder.

I sammenligning med alle indsamlede logdata kan de 50 tilfældigt udvalgte ture ikke siges at være repræsentative. HDOP er højere og tilgængelige satellitter er lavere. Omvendt er der ikke så lange udfald.

8.2. Prisafvigelser

Der er store afvigelser mellem de beregnede priser og de korrekte priser i den første prøve. Ligesom i modellen på 9. semester er der imidlertid stor sammenhæng mellem prisafvigelser og distanceafvigelser. Enten er løsningen med at beregne kørt distance ved hjælp af odometer ikke god nok, eller også er turene svære at fastlægge ved visuel inspektion i ArcGIS.

Derfor er der gennemført endnu en prøve, hvor priserne blevet distancekorrigeret ved at dividere med den beregnede distance og multiplicere med den korrekte distance. Herved bliver resultaterne meget bedre.

8.2.1. Prøve 1 - uden distancekorrektion

Afvigelserne for de 50 ture i prøve 1 uden distancekorrektion fremgår af figur 37, mens frekvensdiagram ses på figur 38.

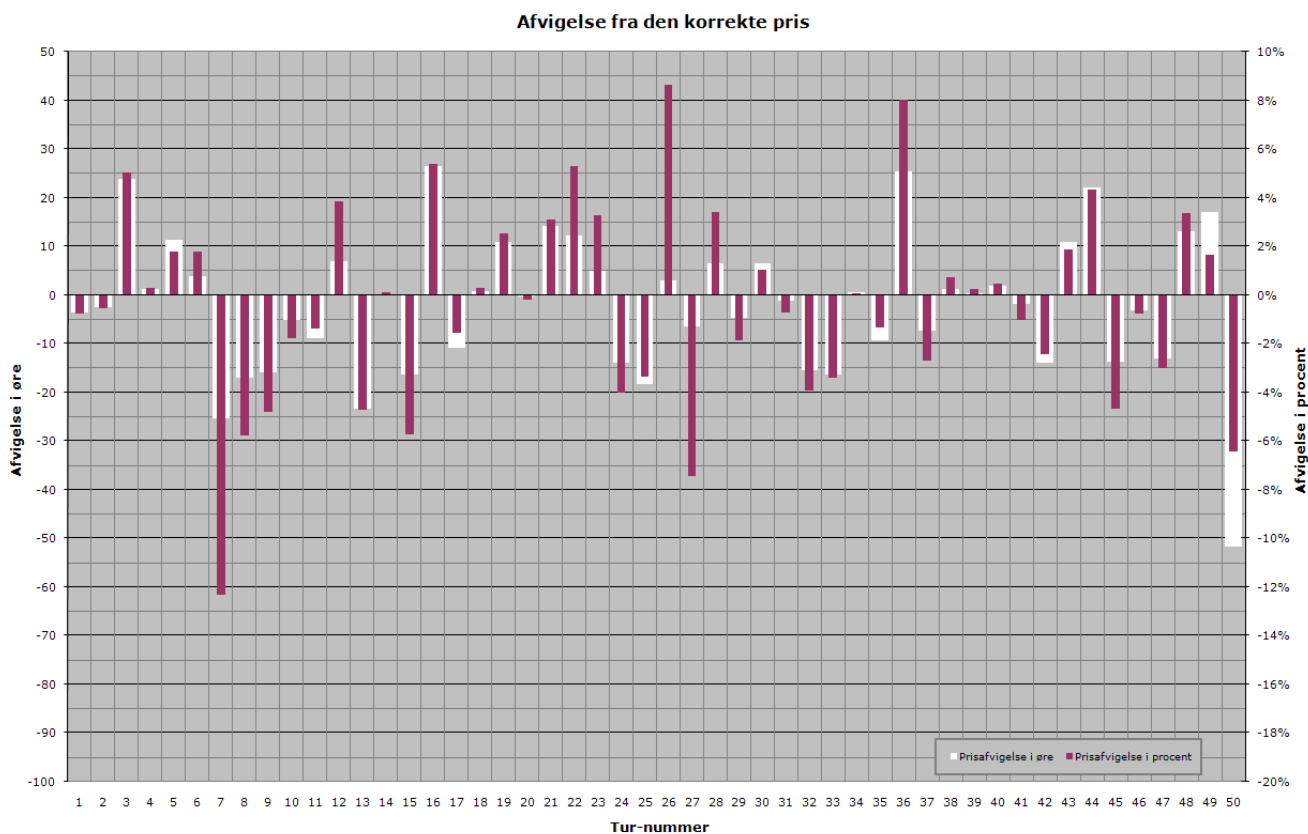
Afvigelserne er store - både relativt (i procent) og absolut (i øre).

Største absolutte nedre afvigelse er -51,69 øre og største nedre relative afvigelse er -12,33 %.

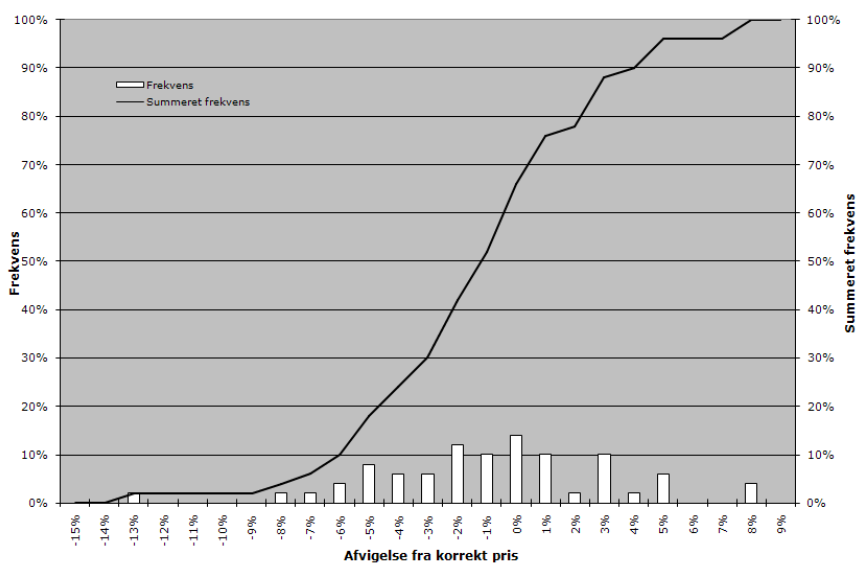
Største absolutte øvre afvigelse er 26,57 øre og største relative øvre afvigelse er 8,62 %.

Kvartilerne for absolutte afvigelser ligger på -12,44 øre, -0,74 øre og 6,60 øre.

Kvartilerne for relative afvigelser ligger på -2,92 %, -0,46 % og 1,84 %.



Figur 37 (ovenfor). Der er store afvigelser i den ikke-distancekorrigerede model.

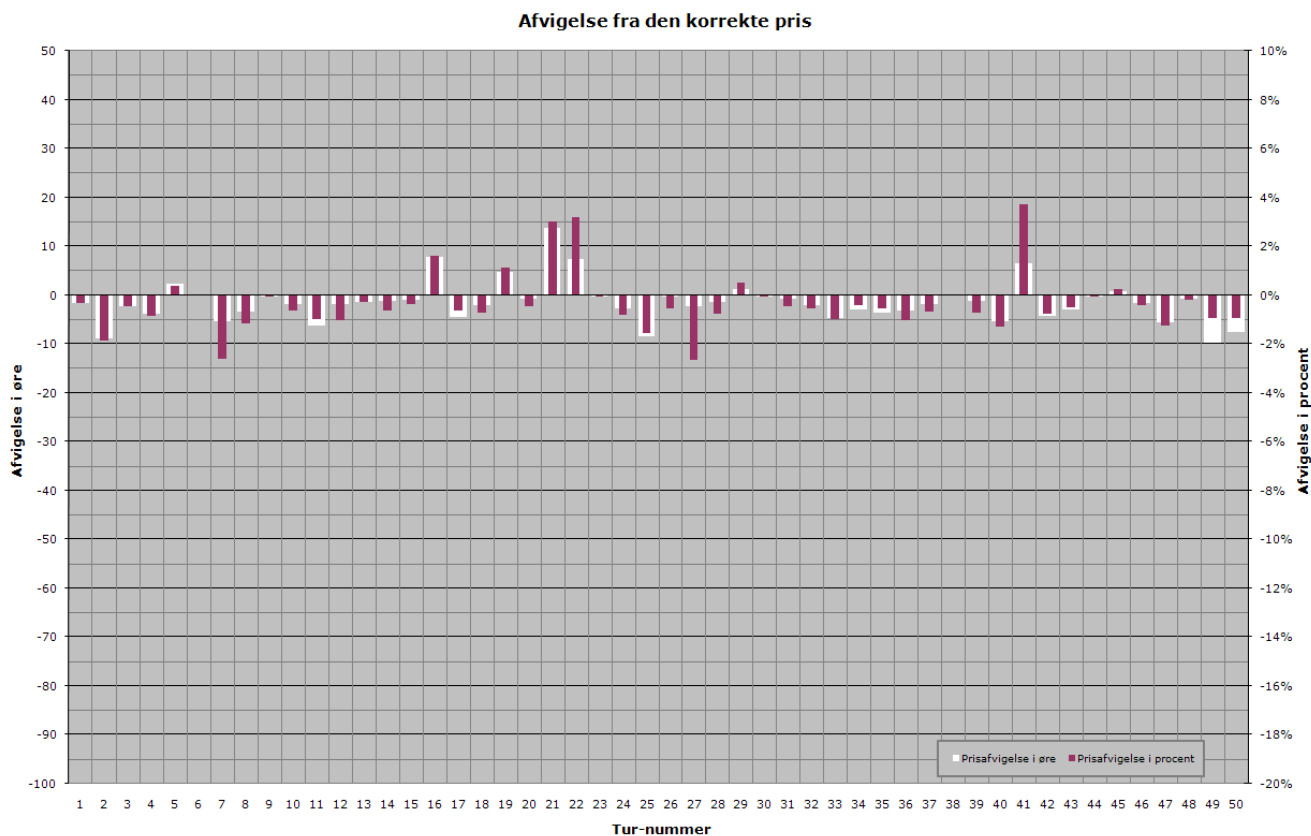


Figur 38. De ses af frekvensdiagrammet, at der er stor spredning på afvigelserne i den ikke-distancekorrigerede model.

8.2.2. Prøve 2 - med distancekorrektion

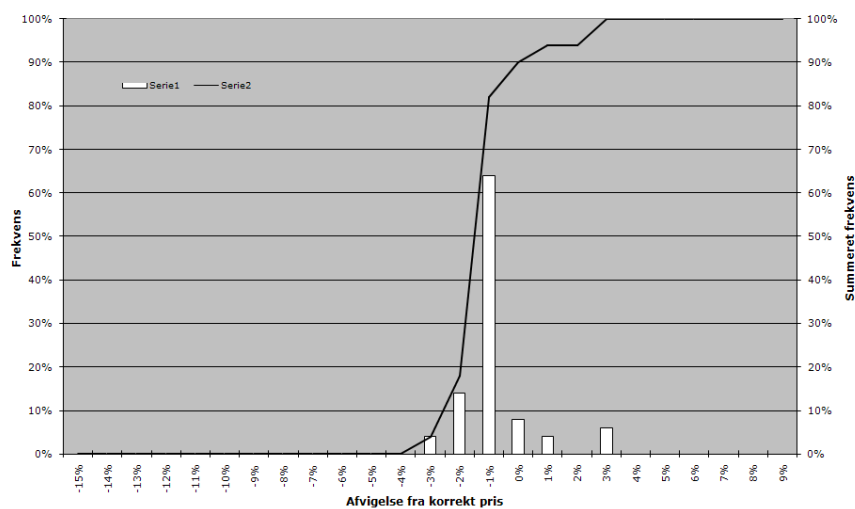
Afvigelserne for de 50 ture i prøve 2 med distancekorrektion fremgår af figur 39, mens frekvensdiagram ses på figur 40.

Afvigelserne er nu meget små og ubetydelige.



Figur 39 (ovenfor). Når priserne er distancekorrigerede, er afvigelserne minimale.

Figur 40. I den distancekorrigerede model er prisafvigelserne koncentreret omkring nul.



Største absolutte nedre afvigelse er -9,67 øre og største nedre relative afvigelse er -2,63 %.

Største absolutte øvre afvigelse er 13,66 øre og største relative øvre afvigelse er 3,74 %.

Kvartilerne for absolutte afvigelser er -3,63 øre, -1,75 øre og -0,20 øre.

Kvartilerne for relative afvigelser ligger på -0,91 %, -0,54 % og -0,05 %.

9. Vurdering

I dette kapitel gives en vurdering af resultaterne i forhold til problemformuleringen.

9.1. Opfyldelse af målsætninger

Målsætningerne i problemformuleringen gik ud på, at der skulle indsamles data og opbygges en model af et kørselsafgiftssystem, som skulle være mere nøjagtig end den model, der blev udviklet på 9. semester. Dette er lykkedes.

Tilsyneladende er de indsamlede data ikke af bedre kvalitet end data fra AKTA-forsøget, men der er væsentlig forskel, som givetvis har været den vigtigste årsag til at resultaterne er blevet bedre end i 9. semesterprojektet: Logning af odometerimpulser. Dette har givet mulighed for en meget mere præcis distancebestemmelse end den, der er mulig ud fra GPS-positioner. Desuden har det gjort det muligt at bestemme distancen, selv når der ikke er satellitforbindelse.

Dog skal det bemærkes, at det i modellen var nødvendigt at anvende distancekorrektion, for at få prisafvigelse ned på et acceptabelt niveau, selvom der var anvendt odometer. Om unøjagtighederne skyldes, at odometermetoden ikke er god nok, eller om de skyldes, at den visuelle inspektion og beregning af de "korrekte" priser i ArcGIS ikke er tilstrækkelig nøjagtig er ikke klarlagt.

9.2. Acceptable afvigelser

Med distancekorrektion kommer afvigelse ned og ligger lige omkring nul med en lille overvægt under nul. Tilmed er spredningen på afvigelserne meget lille. Dette vurderes at være fuldt tilfredsstillende.

I hvert fald er afvigelse så små, at ikke vil blive bemærket i et system, hvor bilisten løbende bliver oplyst om den akkumulerede afgift i hele kroner.

10. Konklusion

I konklusionen fremhæves rapportens vigtigste pointer og resultater.

10.1. Om rapporten

Denne rapport har taget udgangspunkt i et 9. semester-projekt, hvor der blev redegjort for fordelene ved at satellitbaseret kørselsafgiftssystem. Der har derfor i denne rapport indledningsvist været fokus på at beskrive eksisterende systemer og gennemførte projekter vedrørende denne systemtype.

Efterfølgende er en model af et vejafhængigt kørselsafgiftssystem baseret på satellitpositionering blevet opbygget og afprøvet.

10.2. Vigtige pointer

Rundt om i verden arbejdes der mange steder med udvikling og undersøgelser af satellitbaserede kørselsafgiftssystemer. I Tyskland er man nået længst, og selvom det blot er et system for lastbiler og kun på motorvejene, så virker systemet, og det virker som inspirationskilde for andre lande.

I Seattle har man således haft "lånt" det tyske system, for at undersøge hvordan afgifter påvirkede de amerikanske bilisters kørevaner. Resultaterne var gode, og der bliver arbejdet videre med idéerne om et kørselsafgiftssystem i det nordvestamerikanske.

I England og i særdeleshed London er der meget fokus på kørselsafgifter. Det nuværende system fungerer udmærket, men man vil gerne have et endnu bedre system, som muligvis også kan dække hele landet. I den forbindelse er det umuligt at undgå at tænke på satellitpositionering. Englænderne mener dog ikke, at teknologien endnu er pålidelig og nøjagtig nok til at bære et kørselsafgiftssystem i byområder.

I forbindelse de engelske undersøgelser af teknologien er det også blevet undersøgt, hvordan folk reagerer på kørselsafgifter - altså om de gør, som de skal, og lader bilen stå eller vælger andre ruter. Denne ønskede effekt er i høj grad afhængig af, om folk forstår og kan gennemskue kompleksiteten i systemet. Derfor er det blandt andet vigtigt at lave afgiftsstrukturen et kørselsafgiftssystem meget enkle og simple.

I det danske AKTA-forsøg blev det for nogle år siden konkluderet, at afgifterne havde en positiv effekt på forsøgsdeltagernes kørevaner. Man fandt også ud af, at satellitpositionering ikke var præcis nok til et system i byområder, og samme konklusion var der på et afgangsprøveprojekt fra DTU i 2004.

10.3. Vigtige resultater

En analyse af de indsamlede data, som er blevet benyttet til afprøvning i dette projekt, viser, at de ikke er af betydelig hverken bedre eller dårligere kvalitet end data fra AKTA-forsøget. Det var ellers ventet at fire-fem års teknologiudvikling havde forbedret kvaliteten betydeligt.

Alligevel er resultaterne fra afprøvningen af modellen af et kørselsafgiftssystem væsentlig bedre end et tilsvarende system, hvor AKTA-data blev anvendt. Dette skyldes formodentlig, at der i de nyindsamlede data er logget information fra bilernes odometer, hvilket har muliggjort en bedre beregning af den kørte distance.

Med distancekorrektion kommer prisafvigelserne ned at ligge med tæt omkring nul. Kvartilerne for relative afvigelser ligger således på -0,91 %, -0,54 % og -0,05 %, mens minimum og maksimum er henholdsvis -2,63 % og 3,74 %.

Litteraturliste

Mange af de benyttede kilder kan findes på Internettet. I så fald angives hjemmesideadressen. Alle kilder, såvel faglitteratur, rapporter, avisartikler som hjemmesider, er opført sammen i alfabetisk orden.

[Bonsall et al., 2006]

Titel: Responses to complex pricing signals: Theory, evidence and implications for road pricing
Forfattere: Bonsall, P. ; Shires, J. ; Maule, J. ; Matthews, B. ; Beale, J.
Udgiver: Elsevier Ltd.
År: 2006
Findes på: <http://www.sciencedirect.com> (login påkrævet)
Hentet: 19-09-2007

[BMVBS, 2006]

Titel: Heavy goods vehicle tolls in Germany
Udgiver: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)
Webseite: <http://www.bmvbs.de/en/Transport/Roads-,2075/HGV-toll.htm>
Opdateret: 26-10-2006
Besøgt: 17-10-2007

[COWI, 2004]

Titel: Bilkøer giver forsinkelser på 100.000 timer per døgn
Udgiver: COWI A/S
Webseite: <http://www.cowi.dk/cowi/da/menu/news/newsarchive/2004/bilkoergiverforsinkelserpa100000timerperdoegny.htm>
Opdateret: 06-09-2004
Besøgt: 24-02-2007

[CTT, 2004]

Titel: Trængselsprojektet
Forfattere: Nielsen, O. A. ; Hansen, C. O. ; Landex, A. ; Würtz, C.
Udgiver: Center for Trafik og Transport (CTT)
År: 2004
Findes på: http://www1.ctt.dtu.dk/downloads/pdfs/2004/Congestion_Project/Congestion_Overview_part1.pdf
Hentet: 09-01-2007

[CTT, 2005]

Titel: GPS & Roadpricing (Powerpoint-fremvisning)
Forfattere: Zabic, M.
Udgiver: Center for Trafik og Transport (CTT), Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
År: 2005
Findes på: www.itsindenmark.org/download/Netvaerksarrangementer/AKTA_GPS.ppt
Hentet: 06-11-2006

[Danmarks Rumcenter, 2005]

Titel: Satellitnavigation
Udgiver: Danmarks Rumcenter
Webseite: <http://www.rummet.dk/230000c>
Opdateret: 21-11-2002 - 29-08-2005
Besøgt: 08-01-2007

[Dansk Selskab for Rumfartsforskning, 2004]

Titel: Satellitnavigation - GPS og Galileo
Udgiver: Dansk Selskab for Rumfartsforskning
Webseite: <http://www.rumfart.dk/vis.asp?id=457>
Opdateret: 24-10-2004
Besøgt: 08-01-2007

[DAV, 2007]

Titel: Dansk Adresse- og Vejdatabase
Udgiver: COWI A/S m.fl.
Webseite: <http://www.davdata.dk>
Opdateret: Ikke oplyst
Besøgt: 15-11-2007

[DR P4, 2006]

Titel: Om luftforurening
Udgiver: DR P4 København
Webseite: <http://www.dr.dk/Regioner/Kbh/Nyheder/Politik/2006/11/08/061646.htm>
Opdateret: 08-11-2006
Besøgt: 13-01-2007

[Dueholm, Laurentzius & Jensen, 2005]

Titel: GPS
Forfattere: Dueholm, K. ; Laurentzius, M. ; Jensen, A. B. O.
Udgiver: Nyt Teknisk Forlag
År: 3. udgave, 1. oplag 2005

[EU, 2004]

Titel: Direktiv 2004/52/EF om interoperabilitet mellem elektroniske bompengesystemer
Udgiver: Europa-Parlamentet
Dato: 29-04-2004
Findes på: <http://www.eu-oplysningen.dk/dokumenter/retsakter/direktiv/alle/32004L0052/>
Hentet: 07-02-2007

[Fastrax, 2007]

Titel: iTrax03-02 - OEM GPS Receiver Module - Datasheet 1/2007
Udgiver: Fastrax ltd.
År: 2007
Findes på: <http://www.fastrax.fi/showfile.cfm?guid=869295d8-0873-46d4-8434-adc7584905eb>
Hentet: 28-11-2007

[Fyens Stiftstidende, 2006]

Titel: Trængsel koster milliarder
Udgiver: Fyens Stiftstidende
Webseite: <http://www.fyens.dk/article/701754>
Opdateret: 08-10-2006
Besøgt: 14-01-2007

[Heide, 2001]

Titel: AKTA Roadpricing Computer - OBU - Løsningsbeskrivelse (med bilag)
Forfattere: Heide, P.
Udgiver: M-tec A/S
År: 2001

[Ingeniøren, 2007 a]

Titel: Regeringen hamrer bommen ned for roadpricing
Udgiver: Mediehuset Ingeniøren A/S
Webseite: <http://ing.dk/artikel/81042>
Opdateret: 05-09-2007
Besøgt: 05-09-2007

[Johansson & Mattsson, 1995]

Titel: Road Pricing: Theory, Emperical Assessment and Policy
Forfattere: Johansson, B. ; Mattsson, L.-G.
Udgiver: Kluwer Academic Publishers
År: 1995

[KeyResearch, 2006]

Titel: Vejafgifter
Forfatter: Kristensen, J. P.
Udgiver: KeyResearch
Webside: <http://www.vejafgifter.dk/>
Opdateret: 08-11-2006
Besøgt: 14-01-2007

[Kittchen & Wieck, 2006]

Titel: Puget Sound GPS-Based Pilot Pricing Project: Traffic Choices Study Results
Artikel fra ITS World Congress 2006 i London (Paper 1095)
Forfattere: Kittchen, M. ; Wieck, M.
Udgiver: Puget Sound Regional Council & Siemens ITS
År: 2004

[Københavns Kommune, 2005 b]

Titel: Befolkningens holdning til kørselsafgifter i Storkøbenhavn
Forfattere: Sulkjær, P. ; Bonnevie, N. ; Nielsen, O. A. ; Kristensen, J. P. ; Meiner, M. L.
Udgiver: Københavns Kommune – Bygge- og Teknikforvaltningen, Vej & Park
År: 2005
Findes på: http://www.vejpark2.kk.dk/publikationer/pdf/74_AKTA_Befolkningens_holdning_til_kørselsafgifter_i_København.pdf
Hentet: 18-09-2006

[Københavns Kommune, 2005 c]

Titel: Forsøgsdeltagernes holdning til kørselsafgifter
Forfattere: Sulkjær, P. ; Bonnevie, N. ; Nielsen, O. A. ; Kristensen, J. P. ; Meiner, M. L.
Udgiver: Københavns Kommune – Bygge- og Teknikforvaltningen, Vej & Park
År: 2005
Findes på: http://www.vejpark2.kk.dk/publikationer/pdf/74_AKTA_deltageresholdninger.pdf
Hentet: 18-09-2006

[Københavns Kommune, 2005 d]

Titel: Forsøg med kørselsafgifter i København
Forfattere: Sulkjær, P. ; Bonnevie, N. ; Nielsen, O. A. ; Kristensen, J. P. ; Meiner, M. L.
Udgiver: Københavns Kommune – Bygge- og Teknikforvaltningen, Vej & Park
År: 2005
Findes på: http://www.vejpark2.kk.dk/publikationer/pdf/74_AKTA_Forsøg_med_kørselsafgifter_i_København.pdf
Hentet: 18-09-2006

[Lahrmann, 1999]

Titel: Takststruktur og -niveau afhænger af hvilke problemer, der ønskes løst. Trafikdage '99
 Forfatter: Lahrmann, H.
 År: 1999
 Findes på: <http://www.trg.dk/td/papers/papers99/papers/paper/work/road/roadpricing.pdf>
 Hentet: 04-04-2007

[Miljøkontrollen, 2007]

Titel: Om luftforurening
 Udgiver: Københavns Kommune - Miljøkontrollen
 Website: <http://www.miljoe.kk.dk/94ee64db-1a46-4bf3-b585-d57aadc6d9fd.W5Doc>
 Opdateret: Ikke oplyst
 Besøgt: 13-01-2007

[Miljøstyrelsen, 2007]

Titel: Ændring af bilafgifter - Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 3 2007
 Forfattere: Jordal-Jørgensen, J. ; Ohm, A. (begge COWI A/S)
 Udgiver: Miljøstyrelsen (Miljøministeriet)
 År: 2007
 Findes på: <http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2007/978-87-7052-376-9/pdf/978-87-7052-377-6.pdf>
 Hentet: 05-09-2007

[NOAH, 2001]

Titel: Åbent brev til Regeringen med forslag til forandring
 Udgiver: Miljøbevægelsen NOAH
 Website: <http://www.noah.dk/trafik/predictandprevent.htm>
 Opdateret: 21-10-2001
 Besøgt: 09-04-2007

[PC World, 2006]

Titel: Galileo giver baghjul til GPS
 Udgiver: PC World Danmark
 Website: <http://www.pcworld.dk/art/7727>
 Opdateret: 30-06-2006
 Besøgt: 08-01-2007

[PRoGR€SS, 2005]

Titel: PRoGR€SS Project
 Udgiver: PC World Danmark
 Website: <http://www.progress-project.org/>
 Opdateret: 19-04-2005
 Besøgt: 25-01-2007

[PSRC, 2007]

Titel: Traffic Choices Study (Information fra flere undersider er benyttet)
Udgiver: Puget Sound Regional Council (PSRC)
Webseite: <http://www.psrc.org/projects/trafficchoices>
Opdateret: Ukendt
Besøgt: 11-10-2007

[Satellic, 2006]

Titel: Showcase: Toll Collect Road charging drives mobility – the truck toll in Germany
Udgiver: Satellic Traffic Management GmbH
Udgivelse: 2006
Findes på: http://www.satellic.com/images/en/download/showcase_en.pdf
Hentet: 17-10-2007

[SPG Media Limited, 2005]

Titel: LKW-MAUT Electronic Toll Collection System for Heavy Goods Vehicles, Germany
Udgiver: SPG Media Limited (RoadTraffic-technology.com)
Webseite: <http://www.roadtraffic-technology.com/projects/lkw-maut>
Opdateret: 2005
Besøgt: 17-10-2007

[TfL, 2005]

Titel: London Congestion Charging Technology Trials - Stage 1 Report
Forfatter: UKENDT
Udgiver: Transport for London
År: 2005
Findes på: <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/technology-trials.pdf>
Hentet: 11-10-2007

[TfL, 2006 a]

Titel: Distance Based Charging - Report on Transport for London's GPS OBU Trial
Forfatter: UKENDT
Udgiver: Transport for London
År: 2006
Findes på: <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/GPS-OBUs-trials.pdf>
Hentet: 11-10-2007

[TfL, 2006 b]

Titel: Congestion Charging Technology Trials - Stage 2 Final Report
Forfatter: UKENDT
Udgiver: Transport for London
År: 2006
Findes på: <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/congestion-charges-technology-trials-091006.pdf>
Hentet: 11-10-2007

[TfL, 2007]

Titel: Transport for London – Congestion Charging
Udgiver: Transport for London
Webisode: <http://www.cclondon.com>
Opdateret: Løbende opdatering
Besøgt: 11-10-2007

[The Seattle Times, 2006]

Titel: Tolls could cut congestion, test shows
Udgiver: The Seattle Times
Webisode: http://seattletimes.nwsourc.com/html/localnews/2003445293_tolls24m.html
Opdateret: 24-11-2006
Besøgt: 11-10-2007

[Toll Collect, 2007]

Titel: TOLL COLLECT (Information fra flere undersider er benyttet)
Udgiver: Toll Collect GmbH
Webisode: <http://www.toll-collect.de>
Opdateret: Løbende opdatering
Besøgt: 17-10-2007

[Wikipedia, 2007]

Titel: Global Positioning System
Udgiver: Wikipedia
Webisode: http://da.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
Opdateret: 30-12-2006
Besøgt: 08-01-2007

[Zabic, 2004]

Titel: En GIS-analyse af GPS-kvalitet til roadpricing
Forfatter: Zabic, M.
Udgiver: Afgangprojekt på Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
År: 2004
Findes på: http://www1.ctt.dtu.dk/downloads/pdfs/Zabic_Compressed.pdf
Hentet: 09-01-2007

Appendiks 1: Satellitpositionering

At beskrive alt inden for satellitpositionering vil være meget omfattende, så i dette appendiks er kun medtaget de elementer, som er vurderet at være af særlig betydning i relation til et kørselsafgiftssystem.

Kapitlet er baseret på [Dueholm, Laurentzius & Jensen, 2005], [PC World, 2006], [Dansk Selskab for Rumfartsforskning, 2004], [Danmarks Rumcenter, 2004] og [Wikipedia, 2007].

A1.1. Generelt

Et satellitpositioneringssystem består af et antal satellitter i rummet, et antal kontrolcentre på Jorden samt brugernes modtagere.

Systemet fungerer ved at satellitterne hele tiden sender signaler indeholdende position og tid. Disse signaler kan opfanges af en modtager, som benytter oplysningerne til at beregne sin egen tredimensionelle position. Fra kontrolcentrene overvåges og styres satellitterne konstant, således at der opretholdes en meget stor præcision.

Om satellitpositioneringssystemer benyttes den overordnede betegnelse GNSS. Tidligere benyttedes normalt betegnelsen GPS.

Der findes i dag flere GNSS-systemer, men det mest anvendte er det amerikanske NAVSTAR GPS, der består af 24 satellitter, som kredser om jorden i seks baner i cirka 20.180 kilometers højde. Kredsløbene er planlagt således, at der altid er mindst fire satellitter tilgængelige overalt på Jorden. Der er fem kontrolstationer fordelt rundt på kloden omkring Ækvator.

Det russiske system GLONASS har ikke fundet nær så stor anvendelse som det amerikanske, fordi pålideligheden og præcisionen pga. manglende vedligeholdelse ikke er så god. Oprindeligt var der i dette system også 24 satellitter, men kun 14 er nu funktionsdygtige. De kredser om Jorden i tre baner i cirka 19.130 kilometers højde. Der er planer om, at systemet igen skal være fuldt operationsdygtigt i 2010.

Ud over de to ovennævnte systemer er der en række mindre satellitpositioneringssystemer, som ikke er globale og derfor ikke hører under kategorien GNSS.

NAVSTAR og GLONASS virker efter samme principper, men er alligevel forskellige. Derfor kan den samme modtager ikke uden videre anvende

begge systemer. Nogle modtagere er imidlertid designet til at kunne håndtere signaler fra begge systemer. Derved opnås en større dækningsikkerhed og en større præcision.

Både NAVSTAR og GLONASS er militært udviklede og styrede. Det betyder først og fremmest, at der er risiko for, at systemerne i krigstid eller ved anden politisk konflikt gøres utilgængelige for civile. Desuden sender begge systemer to signaler, hvoraf det ene er meget præcist – men kun til militært brug – mens det andet signal til civilt og offentligt brug har en præcision på op til 30 meter.

Disse forhold er årsag til, at der på EU Kommissionens og European Space Agency's (ESA) foranledning udvikles et tilsvarende europæisk positioneringssystem, som skal være tilgængeligt og gratis for alle. Systemet, som kaldes GALILEO, skal efter planen være operationelt i 2010. GALILEO kommer til at bestå af i alt 30 satellitter fordelt i tre baner i en højde af cirka 23.200 kilometer.

A1.2. Teknikken

I det følgende benyttes det amerikanske NAVSTAR GPS til at forklare, hvordan teknikken bag satellitpositionering fungerer. De øvrige systemer anvender som tidligere nævnt nogle tilsvarende principper.

Der findes tre metoder til GPS-positionering, men kun den ene kan benyttes til det formål, der i denne rapport fokuseres på, nemlig kørselsafgifter. Metoden kaldes *Absolut GPS ved kodemåling*. Desuden medtages kun de elementer, der angår det civile signal.

Metodens princip og fejlkilder beskrives i dette afsnit. For en grundig indføring i emnet henvises til den primære kilde for afsnittet: [Dueholm, Laurentzius & Jensen, 2005].

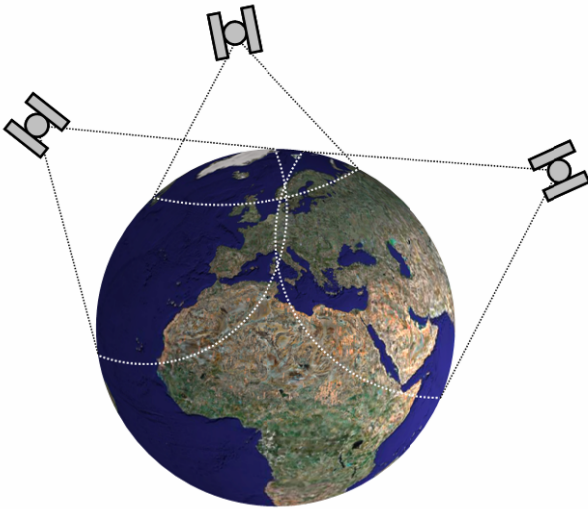
A1.2.1. Grundprincip

Som tidligere nævnt indeholder hvert signal satellittens position i XYZ-koordinater samt det præcise tidspunkt, signalet er udsendt. Oplysningerne er lagret i en kode i signalernes bølger. Koden i det civile system kaldes C/A-koden (Coarse Acquisition).

I GPS-modtageren opfanges signaler fra alle tilgængelige satellitter. Der skal være signaler fra mindst tre satellitter, for at en position kan beregnes.

GPS-modtageren beregner først den såkaldte pseudoafstand til hver enkelt satellit ud fra den tid, som hver enkelt signal har været undervejs.

Pseudoafstandene udspænder hver en cirkel på Jordens overflade, og i cirklernes skæringspunkt befinder modtageren sig (figur 41).



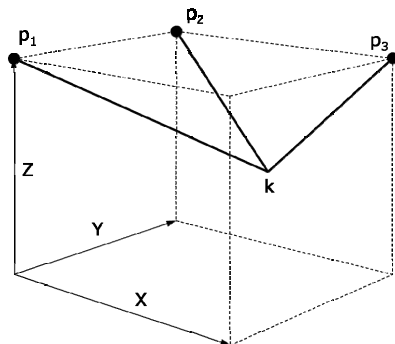
Figur 41. Ved bestemmelse af GPS-modtagerens position benyttes pseudoafstandene til de tilgængelige satellitter. Hver afstand udspænder en cirkel på Jordens overflade, og i cirklernes skæringspunkt befinder modtageren sig.

A1.2.2. Matematiske udtryk

Rent matematisk bestemmes positionen ved hjælp af rumlig indbinding (figur 42). Først beregnes Pseudoafstanden ud fra forskellen mellem signalets afsendelsestidspunkt og modtagelsestidspunkt:

$$r_k^p = c \cdot (T_k - t^p)$$

hvor r_k^p er pseudoafstanden fra satellit p til modtager k , c er lysets hastighed og T_k modtagelsestidspunkt for signalet afsendt fra satellitten til tiden t^p .



Figur 42. Positionen for GPS-modtageren (k) bestemmes ved hjælp af rumlig indbinding fra satellitterne (her p_1 , p_2 og p_3).

Den geometriske afstand ρ_k^p mellem satellit og modtager kan skrives som følgende:

$$\rho_k^p = \sqrt{(X_k - X^p)^2 + (Y_k - Y^p)^2 + (Z_k - Z^p)^2}$$

hvor (X_k, Y_k, Z_k) og (X^p, Y^p, Z^p) er koordinaterne for henholdsvis modtager k og satellit p .

Pseudoafstanden kan nu skrives som følgende:

$$r_k^p = \rho_k^p + c \cdot dT_k$$

hvor der i det andet led medtages den eventuelle unøjagtighed dT_k , der måtte være i modtagerens ur. Hvorfor der ikke medregnes unøjagtigheder i satelliternes ure, forklares i afsnittet om fejl og usikkerheder.

Der er fire ubekendte i ovenstående udtryk, nemlig X_k, Y_k, Z_k og dT_k . Når der er fire tilgængelige satellitter, er der således fire ligninger med fire ubekendte, og den tredimensionelle position kan beregnes. Hvis der er mere end fire tilgængelige satellitter, bestemmes positionen ved en elementudjævning med mindste kvadraters metode.

I tilfælde af at der kun er tre satellitter tilgængelige, kan det antages, at dT_k er nul. Der er dermed tre ligninger med tre ubekendte. Dette giver dog en vis usikkerhed på positionen.

Til brug i et kørselsafgiftssystem er det imidlertid ikke nødvendigt at kende Z-koordinaten på positionen. Derfor er det nok at have tre tilgængelige satellitter, så der er tre ligninger, som kan bestemme X_k, Y_k og dT_k .

A1.2.3. Fejl og usikkerheder

I det følgende beskrives fejlkilderne ved GPS-positionsbestemmelse.

Unøjagtighed i satelliternes ure

I hver satellit er der to Cæsium-ure, som har en stor præcision over længere tidsrum, og to Rubidium-ure, som er meget præcise i korte tidsintervaller. Med i alt fire ure er risikoen for total ursvigt nærmest ikke eksisterende.

Urene kontrolleres i øvrigt flere gange i døgnet, når der er kontakt til en af de fem kontrolstationer på Jorden. Der er dermed så godt som ingen

forskel i urenes gang satellitterne imellem, og der kan derfor ses bort fra denne fejlkilde ved positionsbestemmelse ud fra den beskrevne metode.

Unøjagtighed i modtagerens ur

Der anvendes normalt Quartz-ure i GPS-modtagere, da de til en forholdsvis lav pris har en stor præcision på cirka 10^{-6} sekund. Da signalerne fra satellitterne bevæger sig med lysets hastighed, kan en sådan unøjagtighed give en fejl på cirka 300 meter på pseudoafstanden ($299.792.458 \text{ m/s} \cdot 10^{-6} \text{ s}$). Som anført i forrige afsnit, elimineres denne urfejl ved at måle til et tilstrækkeligt antal satellitter. Uret i modtageren benyttes så kun til at tidsstemple den beregnede position.

Atmosfæriske forstyrrelser

Når signalerne fra satellitterne skal igennem troposfæren og ionosfæren, udsættes de for en forsinkelse, hvis størrelse afhænger af blandt andet tidspunkt på dagen og årstid, den kosmiske stråling og solens ultraviolette stråling samt temperatur, tryk og luftfugtighed.

Forsinkelsen gennem begge sfærer kan beskrives nogenlunde ud fra modeller, som i dag er indbygget i de fleste GPS-modtagere, men der må stadig påregnes en vis unøjagtighed. I ionosfæren kan pseudoafstande således forlænges mellem 5 og 20 meter. I stratosfæren er forlængelsen mellem 0,5 og 1,0 meter, hvis satellitten står i zenit (lodret ovenfor). Forlængelsen kan dog blive adskillige meter ved lave elevationsvinkler under 10° - 15° . I GPS-modtagere indsættes derfor normalt en såkaldt elevationsmaske, som frasorterer de satellitter, der ligger mindre end 15° over horisonten.

I nogle dyre og avancerede GPS-modtagere kan ionosfæreforsinkelsen beregnes med større nøjagtighed, men på grund af prisen er dette ikke umiddelbart relevant i forhold til et GPS-baseret kørselsafgiftssystem.

Multipath

Et ikke uvæsentligt bidrag til unøjagtigheden er multipath, som skyldes, at signalerne fra satellitterne reflekteres af flader i omgivelserne omkring modtageren. Det kan være bygninger eller blot Jordens overflade. Dermed forsinkes signalerne, og pseudoafstandene fejlestimeres op til 5 meter.

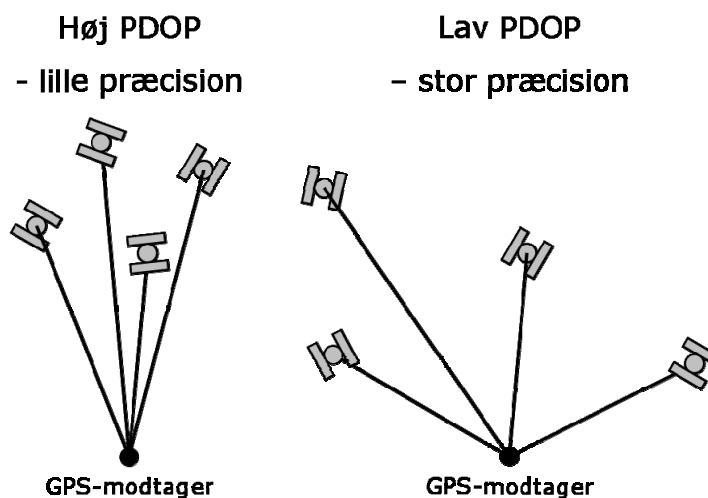
I et kørselsafgiftssystem flytter bilen sig hele tiden med GPS-modtageren, og multipath-effekten er derfor varierende. Det kan give et uensartet logningsforløb.

DOP-begrebet

Udover selve målingerne har også satelliternes konstellation i måletidspunktet betydning for præcisionen. Dette begreb kaldes *Dilution Of Precision* (DOP) og kan således oversættes til at være en forringelse af præcisionen.

Der er defineret en række forskellige DOP-værdier, hvoraf den mest interessante i forhold til kørselsafgiftssystemer er *Horizontal Dilution Of Precision* (HDOP), som beskriver afvigelsen i den beregnede position i det horisontale plan. Tilsvarende findes blandt andet en værdi for den vertikale afvigelse, VDOP, og en værdi for den tredimensionale afvigelse, PDOP.

For at forklare DOP-begrebet tages udgangspunkt i PDOP, som indeholder både HDOP og VDOP. PDOP kan illustreres ved at betragte volumen af den figur, som udspændes mellem satellitterne og modtageren. Hvis satellitterne står langt fra hinanden og udspænder et stort volumen, er konstellationen god, og PDOP-værdien er lav (figur 43). Dog skal satellitterne stadig ligge inden for elevationsmasken.



Figur 43. Satelliternes konstellation har stor betydning for præcisionen af en positionsbestemmelse.

Normalvis ligger HDOP-værdien mellem 1 og 5, og hvis den er under 4, er der gode måleforhold. Dog forøges HDOP-værdien, hvis der er forhindringer i modtagerens omgivelser.

Jordnære fejlkilder

Antallet af tilgængelige satellitter skal jævnfør ovenstående være mindst tre og helst så højt som muligt, da giver bedst mulighed for at eliminere

eller minimere visse måleusikkerheder. Der er dog masser af steder på kloden, hvor dette ikke er muligt eller kun er muligt i dele af døgnet.

I et kørselsafgiftssystem, hvor GPS-modtageren sidder i en bil, som kan bevæge sig overalt, hvor der er vejforbindelse til, vil der relativt ofte forekomme situationer, hvor der ikke er udsigt til et tilstrækkeligt antal satellitter. Det kan være under broer, i tunneller, i parkeringshuse og -kældre, mellem høje bygninger eller i skovområder.

Andre fejlkilder

Ud over de beskrevne fejlkilder kan der være en mindre afvigelse i den bane, som den enkelte satellit kredser om Jorden i. Denne fejl kan forlænge pseudoafstandene op til 2 meter.

Derudover ligger der i selve opbygningen af C/A-koden som nævnt en unøjagtighed, som kan give et fejlbidrag på pseudoafstandene mellem 0,3 og 3,0 meter.

Sammenfatning

Når alle fejlbidrag tages i regning, må der ved måling af pseudoafstande på C/A-koden regnes med en spredning mellem 6 meter og 20 meter.

Således må der selv ved en god satellitkonstellation med en HDOP-værdi på 1,5 regnes med en spredning på 9-30 meter på X- og Y-koordinaterne.

