

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift

Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet

(Proceedings from the Annual Transport Conference
at Aalborg University)

ISSN 1603-9696

www.trafikdage.dk/artikelarkiv

Brug af lavfrekvent GPS data og OpenStreetMap til beregning af køretider

Ove Andersen Benjamin B. Krogh* Harry Lahrmann* Kristian Torp**

**Institut for Datalogi, Aalborg Universitet*

{xcalibur, bkrogh, torp}@cs.aau.dk

**Trafikforskningsgruppen, Aalborg Universitet*

lahrmann@plan.aau.dk

Abstrakt

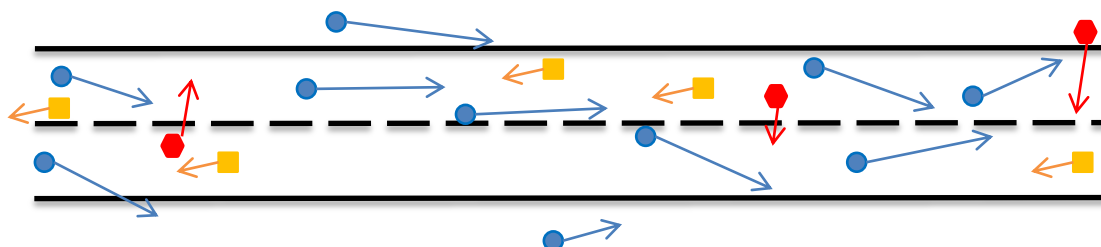
Nøjagtig estimering af køretider er relevant for en lang række transportvirksomheder for at udnytte køretøjerne bedst muligt. I denne artikel beskrives det, hvorledes de store mængder lavfrekvent GPS data, der allerede opsamles kan anvendes til at højne nøjagtigheden af de estimerede køretider. Til dette formål anvendes OpenStreetMap, som er et digitalt kort, der omkostningsfrit kan distribueres. Artiklen lister detaljerne for hvor map-matchingen er implementeret. Resultaterne viser, at det er væsentligt at tage kørselsretningen med i betragtning når køretider skal estimeres. Dette er specielt vigtigt i centrum af de større byer, hvor der kan være 20-40 % forskel i køretiderne på den samme strækning i forskellig retning.

Introduktion

Der opsamles i dag store mængder af GPS målinger med forholdsvis lav frekvens dvs. med typisk 15 til 60 sekunders mellemrum for GPS målinger fra det samme køretøj. En anden datakilde, der er i kraftig udvikling, er OpenStreetMap (OSM) kortet (Open-Street Map). Dette kort må modificeres og distribueres gratis. Kombinationen af store mængder GPS data og et godt og gratis digitalt kort er interessant at anvende som data grundlag for at beregne køretider på vejene. Disse køretider er i dag ikke tilgængeligt i et elektronisk format, der frit må anvendes. Et sådan kort kan anvendes til at beregne køretider mellem to punkter meget nøjagtigt eller til at studere trængsel.

Hovedideen, der præsenteres i denne artikel, er vis på vejsegmentet i Figur 1. I figuren er de ti blå cirkler GPS målinger fra ti forskellige køretøjer, der har kørt fra venstre mod højre (kompasretning er angivet med de blå pile). De fem gule firekanter er GPS målinger fra køretøjer, der er kørt fra højre mod venstre. De tre røde sekskanter er GPS målinger, der må sorteres fra fordi det ud fra kompasretning ikke kan afgøres i hvilken retning køretøjet har bevæget sig. Det antages, at GPS målinger er opsamlet med en så lav frekvens, at det ikke giver mening at beregne bevægelsesretningen ud fra to på hinanden følgende GPS målinger fra det samme køretøj.

Hastighederne i Figur 1 er forskellig fra højre mod venstre end omvendt. Dette er illustreret ved længden på pilene, som angiver hastigheden for den enkelte GPS måling. Det ses således, at hastighederne i Figur 1 generelt er højere fra venstre mod højre. I praksis kan der være betydelige forskelle på med hvilke hastighed, der køres i de to mulige retninger på et segment. Det er derfor vigtigt at opdele GPS målinger



Figur 1: GPS målinger med retning

knyttet til et givet segment i de to mulige kørselsretninger på segmentet, og dermed også at frasortere GPS målinger hvor der er tvivl om retningen de røde GPS målinger i Figur 1 fra, da kørselsretning ikke med sikkerhed kan bestemmes på disse. Artiklen giver detaljer for, hvordan disse GPS målinger sorteres fra.

Artiklen vil herefter beskrive, hvorledes lavfrekvent GPS målinger fra forskellige GPS dataleverandører er brugt til at skabe et digitalt kort med køretider for hele Danmark.

Artikel er opbygget som følger: I det næste kapitel beskrives de udfordringer, der er til map-matching algoritmen når kørselsretning skal tage i betragtning. Det efterfølgende kapitel forklarer herefter i detaljer, hvorledes map-matchingen er implementeret. Det næste skridt er at beskrive data grundlaget, dette er hhv. det digitale OSM kortet og de GPS målinger, der er til rådighed. Herefter listes resultaterne med et fokus på Københavns området. Dette efterfølges af en diskussion af resultaterne og en konklusion.

Beregning af køreretninger

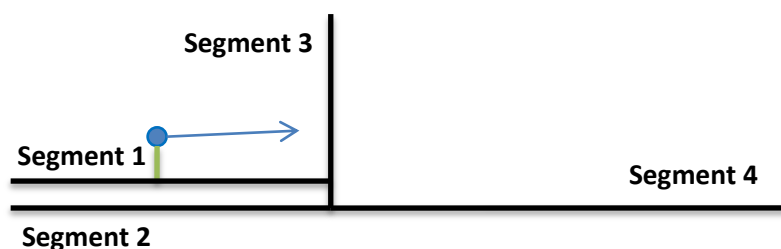
I dette afsnit beskrives første en række udfordringer, der er ved at map-matche GPS målinger til et kort, når retning på GPS målingen skal tages i betragtning. Herefter vises det, hvordan GPS målinger frasorteres, hvis kompasretningen på GPS målingen ikke stemmer overens med retningerne på de segmenter, som målingen er i nærheden af.

Map-matching udfordringer

Når en GPS måling skal map-matches til et segment på et digital kort, kan den simple ide med at tage det nærmeste segment ikke anvendes, dette uddybes først i dette afsnit. Herefter vises det, at det er nødvendigt at se på den spatiale udformning af det enkelte segment for at opnå en korrekt map-matching.

Uden hensyn til færdselsretning

Hvis det i første omgang antages, at det er lovligt, at køre i begge retninger på alle vejsegmenter, så kan GPS målinger map-matches til kortet ved at finde det nærmeste vejsegment. Figur 2 viser map-matchingen af en GPS måling til et vejnetværk, hvor GPS målingen er markeret med en blå plet og kompasretning for målingen er indikeret med den blå pil. Det kan ses, at det nærmeste vejsegment er *Segment 1*. Den blå pil viser tydeligt, at køretøjet har kørt fra højre mod venstre.

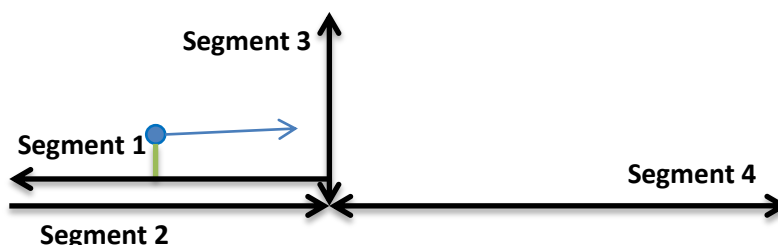


Figur 2: Nærmeste segment til en GPS måling

Bemærk at der i denne artikel er anvendes GPS målingerne optaget med så lav en frekvens at GPS målingerne før og efter antages ikke kunne anvendes i map-matchingen.

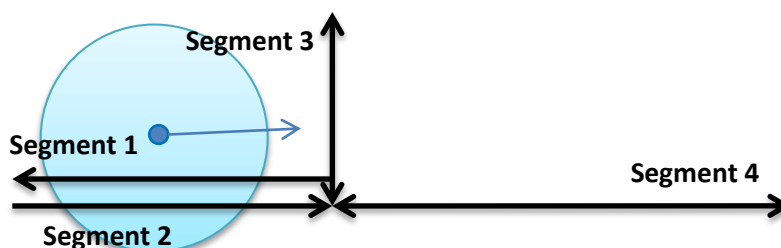
Med hensyn til færdselsretning

Hvis vejsegmenter kan være ensrettede, opstår der pludselig problemer med den med tilgangsvinklen til map-matching illustreret i Figur 2. I Figur 3 er vist et kortudsnit hvor de tilladte kørselsretninger er angivet med de sorte pile.



Figur 3: Nærmeste segment, med retning, til en GPS måling

Hvis GPS målingen i Figur 3 map-matches til det nærmeste segment, vil målingen bliver map-matched til *Segment 1*. Men da det kun er tilladt at køre fra højre mod venstre på dette segment er denne map-matching forkert, da GPS retningen er modsat den lovlige færdselsretning. Denne fejl i map-matching kan rettes, ved at i stedet for at map-matche til det nærmeste segment så at map-matche til alle segmenter i et område, og dernæst vurdere hvilket segment er nærmest med en korrekt tilladt færdselsretning. Denne ide er vist i Figur 4.

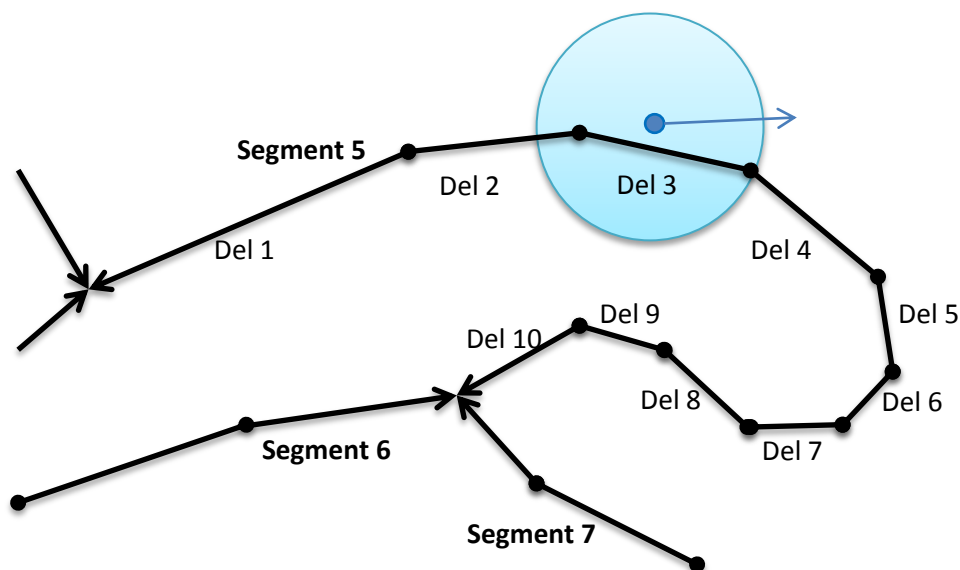


Figur 4: Nærmeste segmenter indenfor område, til en GPS måling

Figur 4 viser, hvordan et område omkring et GPS punkt afsøges for segmenter, der kan map-matches til. Den blå cirkel omkring GPS målingen angiver områdets størrelse og alle segmenter, der er i berøring med dette område tages i betragtning som mulige segmenter. Disse mulige segmenter bliver behandlet et efter et, i rækkefølgen sorteret efter kortest afstanden mellem GPS måling og segment. Altså vil segmenterne her forsøges map-matches i rækkefølgen *Segment 1* og herefter *Segment 2*. Da *Segment 1* ikke kan anvendes pga. forskellen på færdselsretningen og GPS retningen, forsøges *Segment 2* af map-matches. Her er der overensstemmelse mellem GPS retningen og segment retningen, og derfor udpeges *Segment 2* som det korrekte at map-match GPS målingen til. Når et brugbart segment er fundet, søges der ikke efter eventuelt andre mulige segmenter, da disse segmenter er længere væk fra GPS målingen end *Segment 2*.

Med hensyn til sammensatte segmenter

Segmenter er i praksis ikke så simpelt opbygget som vist i Figur 2, Figur 3 og Figur 4. Et segment kan være opbygget af mindre delsegment med hver deres retning. Derfor er det nødvendigt at anvende disse delsegmenter i map-matching af GPS målinger. Dette er illustreret i Figur 5, hvor *Segment 5* består af 10 delsegmenter, fordi *Segment 5* har en kompleks udformning (det er ikke en ret linje).



Figur 5: Nærmeste del-segment til en GPS måling

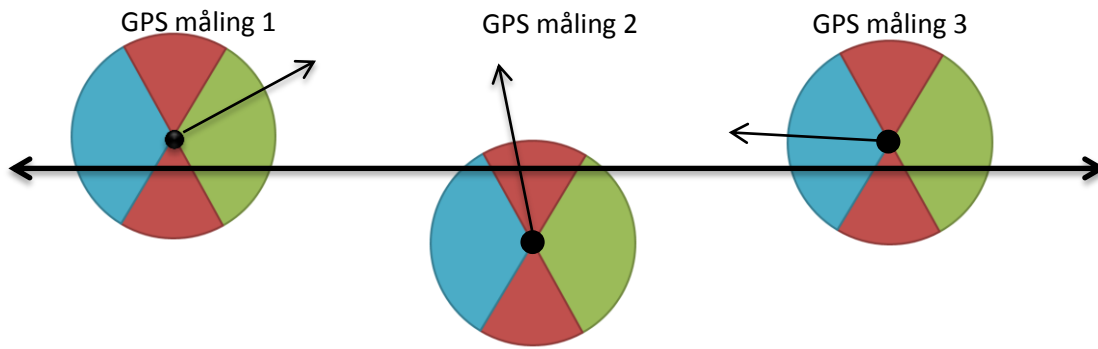
Figur 5 viser, hvordan at *Segment 5* er fundet som det nærmeste segment til en GPS måling. *Segment 5* er som omtalt opbygget af 10 delsegmenter, hvor hvert delsegment er adskilt af en sort cirkel. Segmentet snor sig kraftigt og begge ender af segmentet slutter mod venstre, derfor kan det ikke siges at bilen kører fra en retning mod en anden på dette segment.

Det er derfor nødvendigt at finde det delsegment, der er nærmest GPS målingen (i artiklen anvendes den Euklidiske afstand). Det nærmeste delsegment er her *Del 3* og derfor sammenlignes GPS målingens kompas retning med retningen på dette delsegment. Med denne map-matching kan det siges, at køretøjet er på *Del 3* af *Segment 5* og kører fra venstre mod højre.

Er kompasretningen fra GPS målingen ikke overensstemmende med det nærmeste delsegment, vil segmentet ikke blive taget i betragtning længere, og det næste segment GPS målingen vil blive testet som vist i Figur 4.

Grænser for sammenligning af retninger

For at vurdere kørselsretningen for en GPS måling på et segment, sammenlignes GPS målingens kompasretning med retningen på nærmest (del) segment. Et problem er at kompasretningen fra GPS målingen kan være upræcis f.eks. hvis køretøjet holder stille i et lyskryds. Der er derfor i hver kørselsretning en buffervinkel, der bestemmer hvor meget en GPS målings kompasretning må afvige fra segmentet kørselsretning, for at blive vurderet som værende i overensstemmelse. Denne buffervinkel kan varieres, og eksperimenter vil senere vise betydningen af denne.

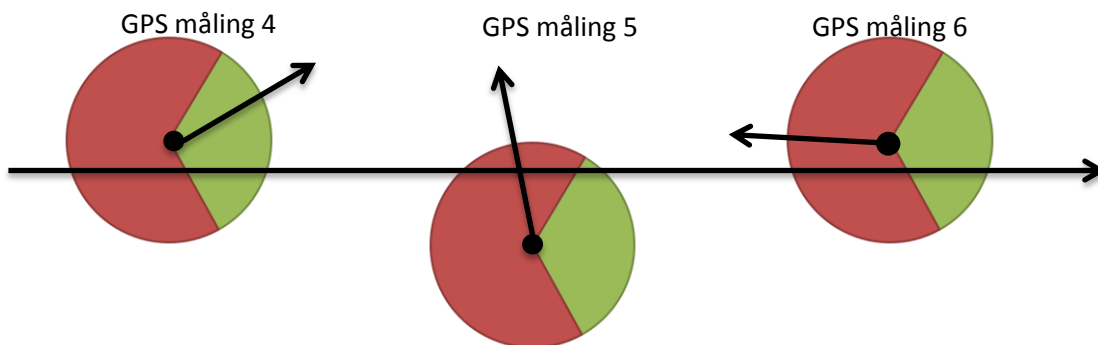


Figur 6: Eksempel på 3 GPS målinger på et segment med tilladt færdsel i begge retninger

Figur 6 viser et segment, hvor der er tilladt at køre i begge retninger. Tre GPS målinger er vist som sorte cirkler, med deres kompasretning vist med sorte pile. Omkring hver GPS måling er buffervinklerne vist, som er defineret ud fra retningen af segmentet. Tre farver definerer områderne for GPS målingens retning sammenlignet med segmentets retning:

- **Blå:** Hvis GPS retningen er indenfor det blå område, betyder det at køretøjet er matched til at køre fra højre mod venstre på segmentet.
- **Grøn:** Hvis GPS målingen er indenfor det grønne område betyder det, at køretøjet er matched til at køre fra venstre mod højre på segmentet.
- **Rød:** Er GPS målingens kompas retning indenfor et af de røde områder, da er usikkerheden omkring retningen for stor, og GPS målingen kan ikke map-matches.

Det kan ses fra Figur 6, at *GPS måling 1* vil blive accepteret som kørende fra venstre mod højre, da pilen peger ud i det grønne område. *GPS måling 2* vil blive afvist, da dens retning, sammenlignet med segmentets, er udenfor de to sikre områder. *GPS måling 3* bliver matched til at køre fra højre mod venstre.



Figur 7: Eksempel på 3 GPS målinger på et segment med kun tilladt færdsel fra venstre mod højre

Hvis et segment er ensrettet som f.eks. på motorvejen da er området for hvor kompasretningen for en GPS målingen kan accepteres som gyldigt kraftigt reduceret. Dette er vist på Figur 7, Det blå område er nu ikke en mulighed og er derfor blevet rødt i stedet. Derfor er det kun *GPS måling 4* der kan map-matches. *GPS måling 5* og *6* kan ikke map-matches, da forskellen mellem kørselsretningen for kompasretningen fra GPS målingerne er for stor.

Map-Matching Algoritmen

I dette afsnit præsenteres den algoritme, der bruges til at finde det segment en GPS måling antages at tilhøre og den retning køretøjets GPS målingen har. Før algoritmen kan præsenteres er det nødvendigt at beskrive hovedideen i hvordan de enkelte segmenter i et digitalt kort er opbygget.

Kortgrundlaget

Der tages udgangspunkt i et OpenStreetMap digitalt kort, der er hentet og behandlet med værktøjet osm2po (Moeller). Dette værktøj omdanner et OpenStreetMap kort til et kort, der er specielt velegnet til map-matching, hvor lange segmenter splittes i mindre baseret på hvor de lange segmenter overlapper og hvor det er muligt at skifte segment f.eks. dreje til højre eller venstre. Kortet indeholder, udover et id og en spatial beskrivelse af segmentet også de tilladte færdselsretninger for hvert segment.

Den spatiale beskrivelse er defineret ud fra OGC specifikationen (Open Geospatial Consortium, 2011), som indeholder datatypen en *LineString*. En *LineString* er en sammensætning af punkter, hvor der er en lige linje mellem hvert fortløbende punkt. Disse punkter danner tilsammen en kurve, med lige linjer imellem. Et eksempel på en *LineString* kan ses nedenfor. Hvert enkelt punkt består af et x og et y koordinat (eller breddegrad og længdegrad) og er adskilt af mellemrum. Hvert punkt i en *LineString* er adskilt med et komma.

```
LineString(punkt1, punkt2, punkt3)
LineString(punkt1-x punkt1-y, punkt2-x punkt2-y, punkt3-x punkt3-y)
```

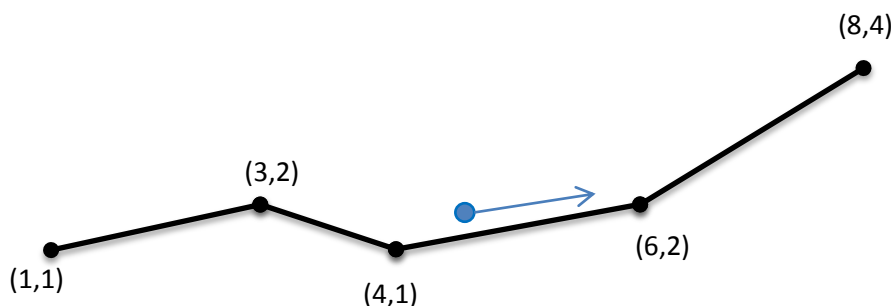
Liste 1 Opbygning af LineString i OGC Format

Eksemplet ovenfor viser i øverste linje en *LineString* med tre punkter, punkt1, punkt2 og punkt3. Den nederste linje viser opbygningen af en *LineString*, når punkternes koordinater er indsat, hvor det ses at hvert punkt er adskilt med et komma, og hvert koordinat i et punkt er adskilt af mellemrum.

Færdselsretningen for et segment kan være tre mulige værdier:

- Fremad: Det er muligt at køre fremad på segmentet.
- Tilbage: Det er muligt at køre tilbage på segmentet.
- Begge: Det er muligt at køre begge retninger på segmentet.

Hvilken retning der er fremad og tilbage på segmentet, afhængigt af hvordan segmentet er opbygget.



Figur 8: Eksempel på opbygningen af et segment

```
LineString(1 1, 3 2, 4 1, 6 2, 8 4)
```

Liste 2 LineString med retning fra venstre mod højre

Figur 8 viser et eksempel på, hvordan et segment kan være opbygget, samt et eksempel på et køretøj med en retning. Færdselsretningen kan ikke ses ud fra figuren, men ved at kigge på opbygningen af segmentet kan denne udledes.

Er segmentet f.eks. opbygget som vist i Liste 2, vil færdselsretningen starte i punktet (1,1), og løbe fra venstre mod højre. Altså vil køretøjet blive defineret som værende kørende **fremad** på segmentet. Er segmentet der imod opbygget som vist i Liste 3, vil færdselsretningen starte i punktet (8,4), og løbe fra højre mod venstre. Altså vil køretøjet blive defineret som værende kørende **tilbage** på segmentet.

```
LineString(8 4, 6 2, 4 1, 3 2, 1 1)
```

Liste 3 LineString med retning fra højre mod venstre

Algoritme

Dette afsnit beskriver selve map-matching algoritmen. I denne algoritme bruges to formler til beregning af et segment og vinkelforskellen mellem et segment og en GPS målingen. For at kunne forstå selve algoritmen præsenteres de to formler først.

Vinkelforskel mellem segment og GPS måling

Vinkelforskellen mellem en GPS måling og et segment definerer, i hvilken retning der er kørt på segmentet, og om GPS målingen overhovedet kan matches til segmentets retning.

Vinkelforskellen er i grader og kan være mellem 0° og 180°, hvor 0° betyder, at GPS målingens kompasretning er præcis samme retning som segmentets retning og 180° betyder, at GPS målingens kompasretning er stik modsat segmentets retning. Vinkelforskellen findes med følgende udtryk, hvor $vinkel_{gps}$ er kompasretning fra GPS målingen og $vinkel_{seg}$ er retning på segmentet.

$$vinkelforskel = \begin{cases} |vinkel_{gps} - vinkel_{seg}| & \text{hvis } |vinkel_{gps} - vinkel_{seg}| < 180 \\ 360 - |vinkel_{gps} - vinkel_{seg}| & \text{ellers} \end{cases}$$

Først findes den numeriske værdi af forskellen mellem de to vinkler. Derefter er det nødvendigt at trække vinkelforskellen fra 360, hvis vinkelforskellen er over 180°. Dette skyldes, at 180° er det meste to vinkler kan være fra hinanden, og når forskellen stiger over 180° kommer vinklerne faktisk tættere på hinanden igen. For eksempel er forskellen på værdierne af vinklerne 359° og 1° lig med 358°, men i praksis er de kun 2° fra hinanden.

Finde bedste segment

Ud fra de tidligere definerede udtryk er det nu muligt at udtrykke hvordan map-matching af lavfrekvent GPS data til et (del)segment forgår. Dette er udtrykt i følgende såkaldte pseudo-kode der er listet herunder. Bemærk referencerne til figurerne og formlerne, der tidligere er introduceret.

1. *gps* er en GPS måling
2. *gps_{retning}* er kompasretningen i *gps*
3. *R* er radius for søgning af segmenter, se Figur 4
4. *buffer* er vinkelbufferen, se Figur 6
5. *segmentliste* er liste af segmenter indenfor radius *R* fra *gps* sorteret efter korteste afstand, se Figur 4
6. for hvert *segment* i *segmentliste* indtil en *vinkelforskel* er enten i grønt eller blå område
 - a. find delsegment der er tættest på *gps*, se Figur 5
 - b. beregn *segmentvinkel*, brug formel ovenfor
 - c. beregn *vinkelforskel* mellem *segmentvinkel* og *gps_{retning}*, brug formel ovenfor
 - d. hvis *vinkelforskel* er i grønt område se Figur 6
 - i. *kørselsretningen* er fremad
 - e. hvis *vinkelforskel* er i blå område se Figur 6
 - i. *kørselsretningen* er bagud
 - f. ellers (*vinkelforskel* er i et rødt område se Figur 6)
 - i. *gps* kan ikke map-matches
7. hvis *gps* kan map-matches
 - a. gem *segment* og *kørselsretning* for *gps*
8. ellers
 - a. marker, at *gps* ikke kan map-matched

Hovedideen med map-matching koden er, at der for hver GPS måling skal findes det segment målingen passer bedst på. Herudover skal bestemmes, hvilken retning køretøjet har kørt. Begge værdier findes ved at fastlægge en radius *R* som de map-matched segmenter skal være indenfor og en vinkelbuffer kaldet *buffer* som er den maksimale vinkel kompasretningen fra GPS målingen må være fra den beregnede retningen på segmentet. Herefter findes de segmenter, der ligger maksimum *R* i afstand fra GPS målingen. Disse segmenter sorteres i afstand fra GPS målingen. Næste skridt er at løbe igennem de segmenter, der er fundet. Hvis GPS målingen kan map-matches gemmes det segment og den retning, der er kørt sammen med GPS målingen. Eller gemmes det, at GPS målingen ikke kan map-matches.

Data grundlag

Dette afsnit præsenterer data grundlaget. Dette er opdelt i en præsentation af det digitale kort og de GPS målinger der er til rådighed.

Digitalt Kort

Kortet er et OpenStreetMap (OSM) kort, hentet fra Geofabrik (Geofabrik GmbH Karlsruhe) og transformeret med værktøjet osm2po (Moeller). OpenStreetMap kortet er i løbende udvikling, og kortet bliver dagligt opdateret hos Geofabrik. Dette kan ses af Tabel 1, hvor det er vist hvor mange segmenter, der er for OpenStreetMap kortet over Danmark. Tabellen viser, at antallet af segmenter vokser støt. Dette er et udtryk for at OSM kortet bliver mere og mere nøjagtigt. Det OSM kort af 2012-07-05 er anvendt i denne artiklen.

Dato	Antal segmenter
2012-04-19	580.478
2012-06-22	602.901
2012-07-05	606.049

Tabel 1: Udvikling af segmenter i OpenStreetMap for Danmark

Kategorier

OpenStreetMap kortet er inddelt i vej kategorier, og disse kategorier er oversat til Id'er af osm2po værktøjet.

Tabel 2 viser de kategorier af veje, der eksisterer i OpenStreetMap kortet for Danmark (OpenStreetMap). At ferry (færge) er med skyldes, at visse veje omkring færgelejer kan være defineret som ferry. At pedestrian (gågade) er med skyldes, at her er det også tilladt at køre for taxi og varekørsel. Kortet der benyttes er delt i to typer: Hovedfærdselsnettet og hele vejnettet over Danmark.

Id	OSM navn	Beskrivelse	Seg.	Dobbelt rettede seg.	Dobbelt rettede seg. med data	Del af hoved-færdselsnettet	Gns. Længde (meter)
1	ferry	Færgerute el. vej ved færge	73	73	40	Nej	10.444
11	motorway	Motorvej	2.068	8	5	Ja	1.083
12	motorway_link	Tilkørsel til motorvej	1.591	21	19	Ja	357
13	trunk	Hovedvej	728	425	418	Ja	544
14	trunk_link	Tilkørsel til hovedvej	225	36	32	Ja	263
15	primary	Større veje	11.184	7732	7.343	Ja	259
16	primary_link	Tilkørsel til større vej	192	48	43	Ja	173
21	secondary	Almindelig vej	24.936	20.036	18.698	Ja	255
22	secondary_link	Tilkørsel til almindelig vej	122	26	23	Ja	99
31	tertiary	Mindre vej	35.536	29.608	26.404	Nej	192
32	residential	Byvej	288.866	283.521	106.802	Nej	114
41	road	Uklassificeret vej	2.600	2.597	403	Nej	292
42	unclassified	Små landeveje	115.294	113.184	56.664	Nej	361
51	service	Små veje f.eks. i parker og på kirkegårde	118.073	115.678	16.387	Nej	145
62	pedestrian	Gågade	2.545	2.450	832	Nej	60
63	living_street	Trafiksaneret vej	2.016	1.975	381	Nej	82

Tabel 2: Beskrivelse af OpenStreetMap kategorierne

Der er i Tabel 2 også vist, hvor mange segmenter der er i hver kategori, hvor mange segmenter der har tilladt trafik i begge retninger, samt hvor mange af disse segmenter der faktisk er målinger for.

Type	Segmenter	Dobbelt rettede segmenter	Dobbelt rettede segmenter med data	Gennemsnitlig længde
Hovedfærdselsnettet	41.046	28.332	26.581	306 meter
Hele vejnettet	606.049	577.418	234.494	186 meter

Tabel 3: Beskrivelse af OpenStreetMap opdeling

Tabel 3 viser, at når hovedfærdselsnettet benyttes, består dette af 41.046 segmenter, hvor kategorierne er som vist i Tabel 2, med en gennemsnitlig længde på 306 meter. Kun 28.332 segmenter på hovedfærdselsnettet har trafik tilladt i begge retninger, hvilket skyldes, at f.eks. modsatrettede spor på

motorveje er delt i to separate segmenter, som hver er ensrettede. Hele vejnetværket består af 606.049 segmenter og her er den gennemsnitlige længde på 186 meter. Mange segmenter i hele vejnettet er lokale veje, såsom villaveje, sommerhusveje og små landeveje. For hele vejnettet er der kun GPS målinger for knap halvdelen af vejsegmenterne, hvilket primært skyldes dårlig dækning på små lokale vejstrækninger.

GPS data

Der er modtaget GPS data fra forskellige kilder og der er i alt 1.279.043.294 GPS målinger til rådighed. Dette afsnit beskriver først kravene til disse GPS målinger. Herefter vises hvorledes de valide GPS målinger er fordelt i Danmark. Slutteligt vurderes det om kompasretningen for GPS målinger er god, da netop kompasretningen er meget væsentligt for at beregning af retningsbestemt hastighed.

Krav til GPS data

For at GPS data overhovedet kan benyttes til at map-matches, er der opstillet nogle krav for, at data kan siges at være valide. Disse krav er følgende.

- **Duplikater:** Hvis en GPS målinger findes mere end to gange (samme tidspunkt for samme køretøj) vil kun første måling blive benyttet.
- **Hastighed og retning:** Hvis et køretøj ikke rapporterer hastighed og kompasretning bliver GPS målingerne fra disse køretøjer fjernet
- **Parkeret:** Hvis køretøjet holder stille i længere tid samme sted, bliver GPS målingerne fjernet, da køretøjet siges at være parkeret. Et køretøj er bestemt til at være parkeret, hvis det ikke flytter sig mere end 50 meter indenfor 120 sekunder samt der er minimum 3 målinger tilgængelige.
- **Korrekt tidspunkt:** Hvis tidspunktet ikke ser ud til at være korrekt (ude i fremtiden eller langt tilbage i fortiden) sorteres målingerne fra.

Kravene er fundet efter meget grundige studier og diskussion med en række private og offentlige virksomheder indenfor transportbranchen.

Kravene til GPS data betyder, at ud af de godt 1,2 milliarder målinger, er 622.786.685 GPS målinger brugbare og kan benyttes til map-matching og bestemmelse af kørselsretning.

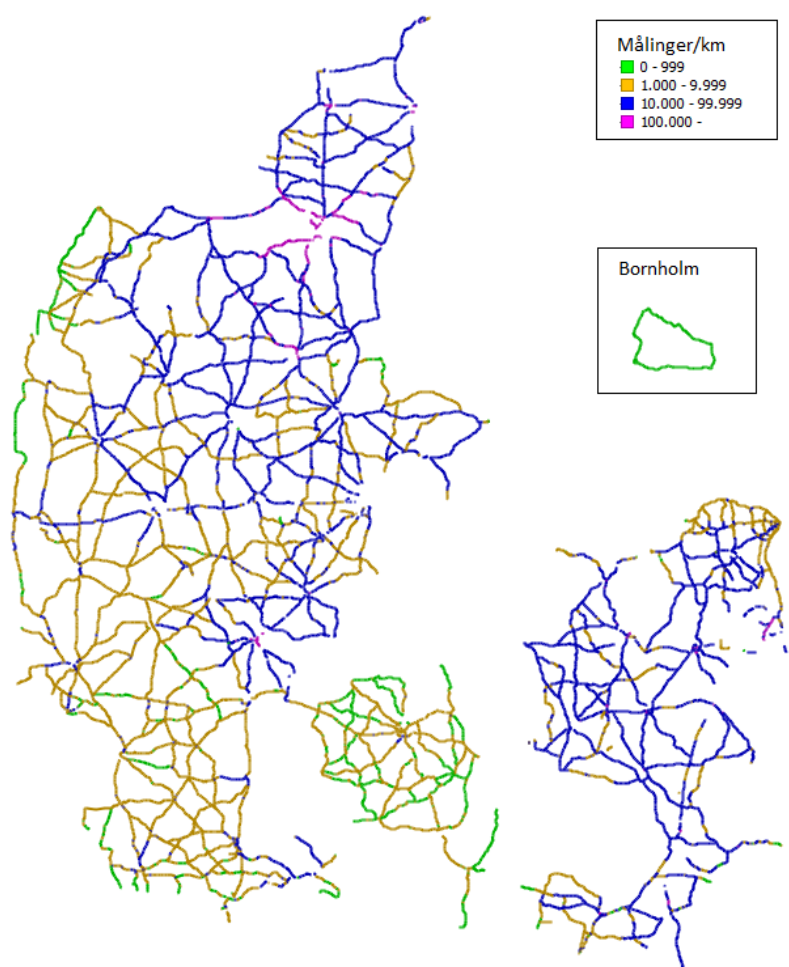
Når der i det efterfølgende siges, at et segment f.eks. har 500 målinger betyder det, at der er registreret, at 500 køretøjer har passeret dette segment. Jo længere et segment er, desto større chance er der for at en måling afsættes på et segment, især ved lavfrekvente data. Ved højfrekvente data (f.eks. 1 sekund logs), vil der generelt blive afsat målinger på både korte og lange segmenter.

Når antallet af observationer skal findes, bliver dette angivet i målinger pr. km. Hvis et køretøj har afsat tre målinger ved passagen af et segment, tæller dette som tre målinger. Det totale antal målinger på et segment deles med segmentet længde i km, hvorved *målinger/km* findes.

Når gennemsnits hastigheden for et segment skal findes, bliver antallet af målinger afsat af ét køretøj ved én passage aggregeret til et gennemsnit, for at en passage kun skal vægte en gang. Derved vil højfrekvent og lavfrekvent data vægte ens. Hvis et køretøj afsætter f.eks. 10 målinger ved en passage af et segment, tæller dette kun som en måling fordi gennemsnittet af de 10 målinger anvendes.

Antal målinger for Danmark

Mængden af målinger tilgængelig er en vigtig faktor, når det kommer til valideringen af resultaterne. Herunder vil dækningsgraden af Danmark blive beskrevet.



Figur 9: Antal målinger pr. segment på hovedfærdselsnettet (med færdsel i begge retninger)

Figur 9 viser dækningen på hovedfærdselsnettet i Danmark. Her er kun vist vejsegmenter med tilladt færdselsretning i begge retninger, altså er motorvejsnettet ikke med. For hvert segment er det udregnet, hvor mange målinger der er pr. km, så hvis et segment er 3 km langt og har 300 målinger betyder det, at segmentet har 100 målinger pr. km. Det kan ses, at Nord-, Midt- og Østjylland, samt det meste af Sjælland er dækket godt ind, med over 10.000 målinger/km, og visse steder over 100.000 målinger/km. Bornholm er ikke særligt godt dækket, og ligeledes er Fyn og Vest- samt Sønderjylland også mindre godt dækket end resten af hovedfærdselsnettet. Den geografiske forskel i dækningen skyldes, at data leverandørerne har uens dækning af Danmark.

Tabel 4 viser i tal, hvor stor dækningen er for hhv. hovedfærdselsnettet og hele det danske vejnetværk. At ca. 60 % af hovedfærdselsnettet er dækket af mindst 1.000 målinger/km er ganske tilfredsstillende, og 90 % af hovedfærdselsnettet er dækket af mindst 100 målinger.

Målinger pr. segment	Hovedfærdselsnettet		Hele vejnettet	
0 – 9	572	2,0 %	223.141	38,6 %
10 – 99	2.369	8,4 %	160.907	27,9 %
100 – 999	8.323	29,4 %	131.075	22,7 %
1.000 – 9.999	12.871	45,4 %	54.443	9,4 %
10.000 – 99.999	4.106	14,5 %	7.724	1,3 %
100.000 -	91	0,3 %	128	0,0 %

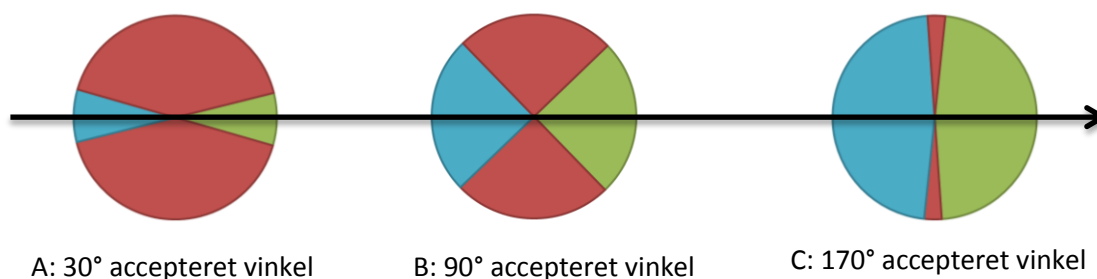
Tabel 4: Målinger pr. km i Danmark

For hele vejnettet gælder det, at over 38 % af vejnettet har under 10 målinger. Disse vejsegmenter tilhører primært vej kategorier for små veje, f.eks. by veje, sommerhusveje og grusveje. Disse veje findes der rigtig mange af, og det er sjældent, at andre end personer med tilknytning til disse veje passerer disse. Alligevel er ca. en tredjedel af det komplette vejnetværk dækket af mindst 100 målinger og knap to tredjedele er dækket af mindst 10 målinger.

Forskellige vinkler for retningsbestemmelse

For at vurdere, hvilken retning et køretøj kører på et vejsegment, sammenlignes GPS kompasretning med retningen for det nærmeste vejsegment. Hvis kompasretning er indenfor en acceptabel afvigelse fra segments retning, siger det at køretøjet følger segmentet i enten fremad eller tilbage retningen på segmentet.

Figur 10 viser et segment, hvor segmentretningen går fra venstre mod højre. Det vil sige, at køretøjer der kører fra venstre mod højre kører fremad på segmentet og køretøjer, der kører fra højre mod venstre kører tilbage på segmentet.



Figur 10: Forskel på accepterede vinkler for et segment

For at vurdere om køretøjet kører fremad eller tilbage, eller om usikkerheden er for stor til at bestemme kørselsretningen findes vinkelforskellen mellem segmentretningen og kompasretningen. Er disse indenfor en acceptabel tolerance kan retningen bestemmes, ellers er usikkerheden for stor og retningen ubestemt. Vinklen der bestemmer, hvor stor tolerancen er, kan varieres. På Figur 10 vises tre eksempler på forskellige accepterede vinkler, hvor de blå områder betyder, at hvis køretøjets retning er indenfor dette område kører køretøjet tilbage på segmentet, og er køretøjets retning indenfor de grønne områder, kører køretøjet fremad.

Eksempel A i Figur 10 viser, at kompasretningen skal være forholdsvis korrekt i forhold til segmentets retning (indenfor 15° afvigelse på hver side af segmentet). Afviger køretøjets retning ud i de røde felter, vil kørselsretningen blive defineret som ukendt. Eksempel B viser en accept af alle, der er indenfor 45° afvigelse til hver side af et segment, dvs. en total accept vinkel på 90°. Eksempel C viser derimod stor tolerance for, hvor meget køretøjets retning må afvige fra segmentets retning, og stadig blive vurderet som kørende fremad eller tilbage, her en total vinkel på 170°.

Accepteret vinkel	% af cirkel accepteret	Antal retning genkendt	% retning genkendt
30°	17 %	533.331.372	85,6 %
50°	28 %	575.380.188	92,4 %
90°	50 %	598.707.174	96,1 %
140°	78 %	612.865.431	98,4 %
170°	94 %	620.170.776	99,6 %

Tabel 5: Eksperiments med forskellige størrelser af accepterede vinkler

Tabel 5 viser, hvor stor en andel af målingerne, hvor retningen kan accepteres, ud fra forskellige krav til accepterede vinkler. Værdierne i kolonnen *Accepteret vinkel* viser størrelsen af vinklerne hvor data accepteres, både i fremad og tilbage retning på segmentet. Ved en accepteret vinkel på 30° er det grønne område på Figur 10 30° og det blå område også 30°. Kolonnen *% af cirkel accepteret* viser hvor stort et område af cirklen der accepteres som gyldigt område for at finde fremad og tilbage for en GPS retning, altså det grønne og blå område sammenlignet med de røde områder. *Antal retning genkendt* viser, hvor mange GPS målinger der får retning genkendt korrekt og *% retning genkendt* viser, hvor mange procent af de tilgængelige data der blev genkendt som havende en korrekt retning.

Det kan ses ud fra Tabel 5, at GPS målingernes kompasretning er ganske korrekte. Selv ved en forholdsvis snæver vinkel på 30° genkendes over 85 % af GPS målingerne. Øges den accepterede vinkel til 50° stiger tallet til over 92 %. Dette er ganske tilfredsstillende fordi GPS udstyr er kendt at kan have problemer med at vedholde kompasretningen, især hvis køretøjer holder stille. I resultaterne er en vinkel på 90° brugt.

Resultater

Dette afsnit præsenterer resultaterne af at beregne køretiderne på de enkelte segmenter med hensyntagen til, at der på mange segmenter kan køres i begge retninger.

Segmenter med forskellig hastighed

I introduktion blev det påpeget, at det er vigtigt at skelne mellem de to retninger på et segment, fordi der af mange grunde kan være store forskelle i hastigheden mellem de to retninger. Dette afsnit illustrerer dette først for det overordnede vejnet i hele Danmark og herefter med specielt fokus på Hovedstadsområdet.

Der benyttes tre former for tidsperioder i resultatafsnittet, nemlig morgen, eftermiddag og anden. Disse er defineret således:

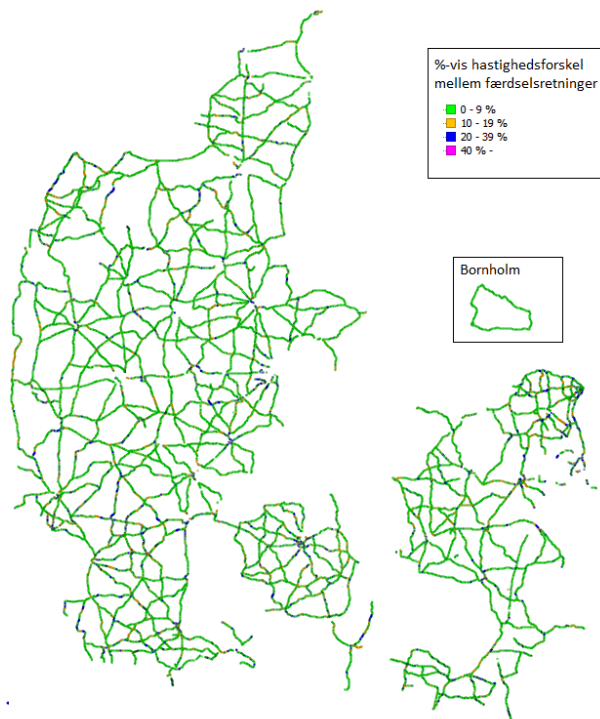
- **Morgen:** Mandage til fredage mellem 07:30 og 08:15
- **Eftermiddag:** Mandage til fredage mellem 15:00 og 16:30
- **Alle perioder:** Alle ugedage mellem 00:00 og 23:59.

Disse perioder er fundet efter grundige studier og diskussion med en række private og offentlige virksomheder indenfor transportbranchen.

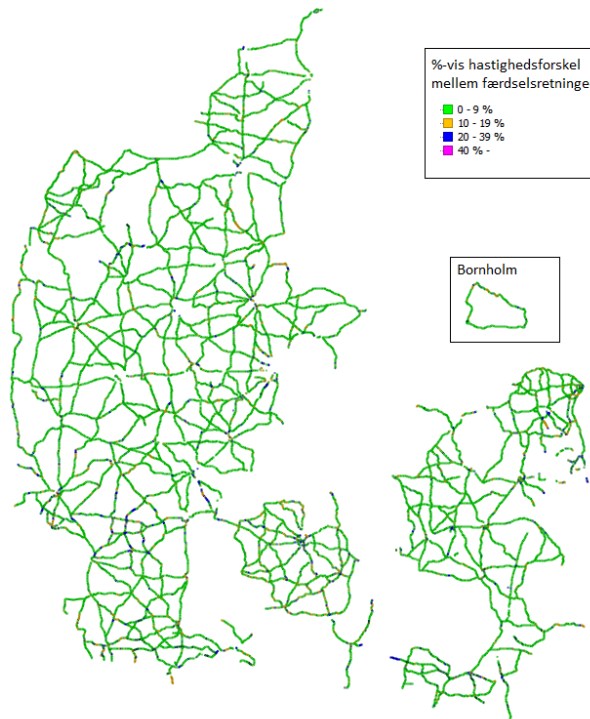
Danmark

Figur 11 og Figur 12 viser to kort over hovedfærdselsnettet i Danmark. Kortene viser kun segmenter, hvor færdsel er tilladt i begge retninger, dvs. motorveje og veje med opdelt segmenter vises ikke.

Figur 11 viser den procentvise hastighedsforskel mellem retninger for morgentrafik og Figur 12 viser ditto for eftermiddagstrafik.



Figur 11: Hastighedsforskelle på hovedfærdselsnettets færdselsretninger for Danmark, for morgen trafik



Figur 12: Hastighedsforskelle på hovedfærdselsnettets færdselsretninger for Danmark, for eftermiddag trafik

Vejsegmenterne er farvet efter, hvor stor procentvis forskel der er på hastigheden mellem de to færdselsretninger. Den procentvise forskel er beregnet ud fra, hvor meget hurtigere der køres i den hurtigste retning sammenlignet med den langsomste, for hvert segment.

Det kan ud fra Figur 11 ses, at på størstedelen af hovedfærdselsnettet er hastighedsforskellen om morgenen under 10 % mellem retningerne. Dog findes der større udsving omkring byer og på meget trafikerede strækninger. Figur 12 viser, at det samme gør sig gældende om eftermiddagen, og det ofte er på de samme strækninger.

Tabel 6 viser det procentvise antal målinger, som hver gruppering indeholder. Dette er vist i tre kolonner, hvor den første viser fordelingen for alle ugedage og tidspunkter. Disse data er de som er vist på Figur 11, blot hvor 0 – 9 % er delt ind i to grupper, hhv. 0 – 4 % og 5 – 9 %. De to næste kolonner viser kun målinger for hhv. morgen- og eftermiddagstrafik. Bemærk at morgen trafikken kun er en periode på 45 minutter hvor eftermiddagstrafikken er 90 minutter lang. Kun segmenter, med observationer i begge retninger er medregnet i disse forskels procenter.

Forskel på hastigheder i segment retninger	Alle perioder	Morgen	Eftermiddag
0 – 4 %	59 %	40 %	49 %
5 – 9 %	17 %	20 %	20 %
10 – 19 %	11 %	17 %	14 %
20 -39 %	7 %	12 %	9 %
40 % -	6 %	11 %	8 %

Tabel 6: Forskel på hastigheder af vejsegmenters retninger i forskellige perioder for hovedfærdselsnettet

Det er højere hastighedsforskel om morgenen og eftermiddagen mellem retningerne på segmenter end generelt. Dette er ikke overraskende, da der er større trængsel på disse tidspunkter, og trængslen eksisterer ofte kun i en retning på et segment.

Det er interessant, at generelt er det kun halvdelen af segmenterne, der har tæt på ens hastighed i begge retninger, dvs. det er væsentligt at tage højde for forskellige hastigheder i forskellige retninger på segmenter.

Tager man udgangspunkt i alle segmenter i kortet, med målinger tilgængeligt ser det anderledes ud. Dette er vist i Tabel 7, som viser i procent, hvor mange segmenter der er i hver gruppe af hastighedsforskelle, når alle segmenter med tovejs færdsel er med.

Forskel på hastigheder i segment retninger	Alle perioder	Morgen	Eftermiddag
0 – 4 %	22 %	19 %	21 %
5 – 9 %	14 %	15 %	14 %
10 – 19 %	18 %	17 %	17 %
20 -39 %	17 %	18 %	18 %
40 % -	29 %	31 %	30 %

Tabel 7: Antal segmenter med Forskel på hastigheder af vejsegmenters retninger i forskellige perioder for hele færdselsnettet

Ud fra Tabel 7 kan det ses, at der næsten ikke er nogen forskelle mellem alle perioder, morgentrafik og eftermiddagstrafik. Dette skyldes, at der på mange mindre veje er begrænset trafik og derved er der ikke stor hastighedsforskel mellem trafikretningerne på disse segmenter. Hovedfærdselsnettet består kun af 12,6 % af hele færdselsnettet og derfor drukner de forskelle, der eksisterer på hovedfærdselsnettet (Tabel 6) i data fra alle de mindre segmenter.

Hovedstadsområdet

For at vise forskellen mellem morgen- og eftermiddagstrafik, vises her to udsnit af hovedfærdselsnettet for hovedstadsområdet. Bemærk venligst, at udover hovedfærdselsnettet er her også vist OSM vej kategorierne mindre vej (31).



Figur 13: Hastighedsforskelle på hovedfærdselsnettets færdselsretninger for hovedstadsområdet om morgenen

Figur 13 viser hovedfærdselsnettet i Københavnsområdet for morgentrafik. Det kan ses, at jo tættere man kommer mod Københavns midtby, jo større bliver forskellen mellem hastighederne i retningerne på segmenter. Ofte er der op til mere end 40 % forskel mellem færdselsretningerne. Dette viser ikke nødvendigvis, at der er trængsel.



Figur 14: Hastighedsforskelle på hovedfærdselsnettets færdselsretninger for hovedstadsområdet om eftermiddagen

Figur 14 viser, at det samme mønster gør sig gældende når man ser på eftermiddagstrafikken om eftermiddagen. Igen er det jo tættere man kommer på Københavns midtby at hastigheden på trafikken differentieres i færdselsretningerne. Sammenligner man

Figur 13 med Figur 14 ses det, at det ofte er de samme segmenter, der har forskellig hastighed i færdselsretningerne, både om morgenen og om eftermiddagen. Dette kan umiddelbart skyldes faktorer så som:

- Trafikanter benytter ofte samme rute til og fra arbejde, derfor er belastningen på samme segmenter om morgenen og om eftermiddagen.
- Segmenter med udformning der har indflydelse på kørsels hastigheden, f.eks. indsnævringer, vigepligter, sammenfletninger, venstresvingskryds og lignende, der kan påvirke hastigheden, er faste dele af vejen og findes både om morgenen og om eftermiddagen for en retning. Derfor vil f.eks. en chikane give ens fartnedsættelse om morgenen og om eftermiddagen.



Figur 15: Sammenligning af retninger for morgen- og eftermiddagstrafik på hverdage.

Figur 15 viser hvorvidt trafikken flyder hurtigst i samme eller forskellig retning når man sammenligner morgen og eftermiddag.

- Blå betyder, at den hurtigste retning morgen og eftermiddags er **forskellig**.
- Grøn betyder, at den hurtigste retning morgen og eftermiddags er **den samme**.
- Gul betyder, at der **ikke er nogen** forskel på hastighederne for morgen og eftermiddag.

Det kan ses, at det overvejende er i samme retning trafikken flyder hurtigst om morgenen og om eftermiddagen. Dvs. det åbner op for, at det ikke kun er trafikken der flyder hhv. til og fra arbejde men muligvis også noget med vejens forløb der gør, at hastigheden er lavere i samme retning både morgen og eftermiddag.

	Hovedfærdselsnettet	Hele vejnettet
Forskellig retning hurtigst	38 %	40 %
Samme retning hurtigst	60 %	58 %
Ingen hurtigere	2 %	2 %

Tabel 8: Mængde af segmenter, der har forskellig eller samme retning hurtigste hastighed, morgen og eftermiddag sammenlignet

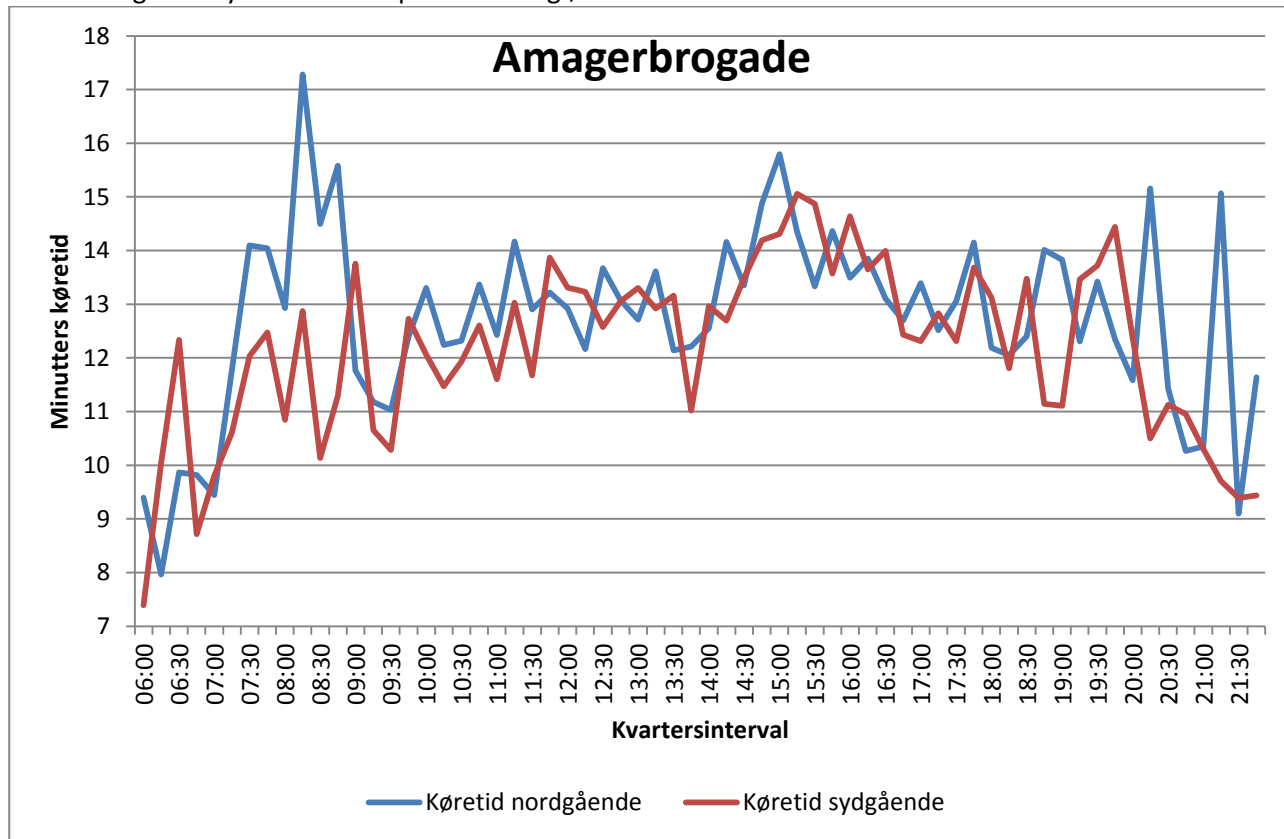
Tabel 8 viser, hvor mange segmenter der har samme eller forskellig retning hurtigste hastighed på hhv. hovedfærdselsnettet og hele vejnettet. Det kan ses, at generelt er det op mod 60 % af segmenterne hvor den hurtigste retning er den samme om morgenen og eftermiddagen. Dette er gældende både for hovedfærdselsnettet og hele vejnettet.

Analyse af længere vejstrækninger

I det følgende vises det hvad forskellige hastigheder betyder for længere strækning for tre veje i København hvor, det er muligt at køre i begge retninger.

Amagerbrogade i København

Amagerbrogade er en vejstrækning på Amager med en længde på 3,4 km. Denne vejstrækning går fra centrum og mod syd mod Kastrup Lufthavn og Øresundsbroen.

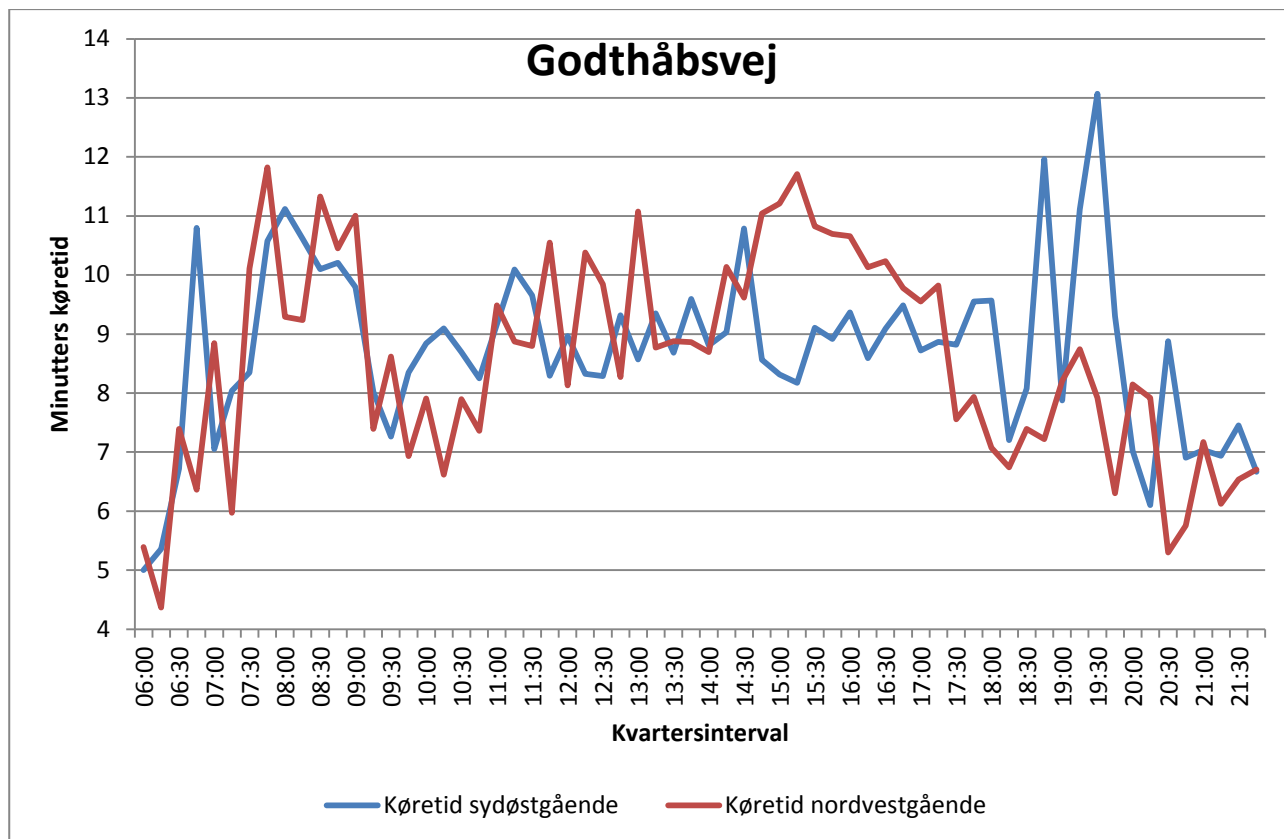


Figur 16: Køretid for Amagerbrogade på kvartersinterval i hverdagen

Figur 16 viser, hvor lang tid det tager at passere Amagerbrogade på hverdage mellem 06:00 og 22:00, opdelt på kvartersintervaller. Den blå graf viser, hvor lang tid det tager køre fra nord mod syd over hele Amagerbrogades længde, mens den røde graf viser, hvor lang tid det tager at køre fra syd mod nord. Det kan ses, at der er udsving i køretiden hen over dagen, især om morgenen tager det længere tid at køre mod nord (ind mod centrum), hvilket ikke er overraskende. F.eks. mellem 8:15 og 8:30 tager det 4½ minut længere at passere hele Amagerbrogade i nordgående retning frem for sydgående. Resten af dagen følges køretiderne for de to retninger ganske pænt hinanden. At der er nogle store udsving om aftenen kan skyldes, at datagrundlaget ikke er så stort for disse kvartersintervaller og derved bliver der større usikkerhed.

Godthåbsgade i København

Godthåbsgade i København er en vejstrækning på 2,1 km som går fra ringvej 2 i nordvest og ind mod centrum i sydøst.

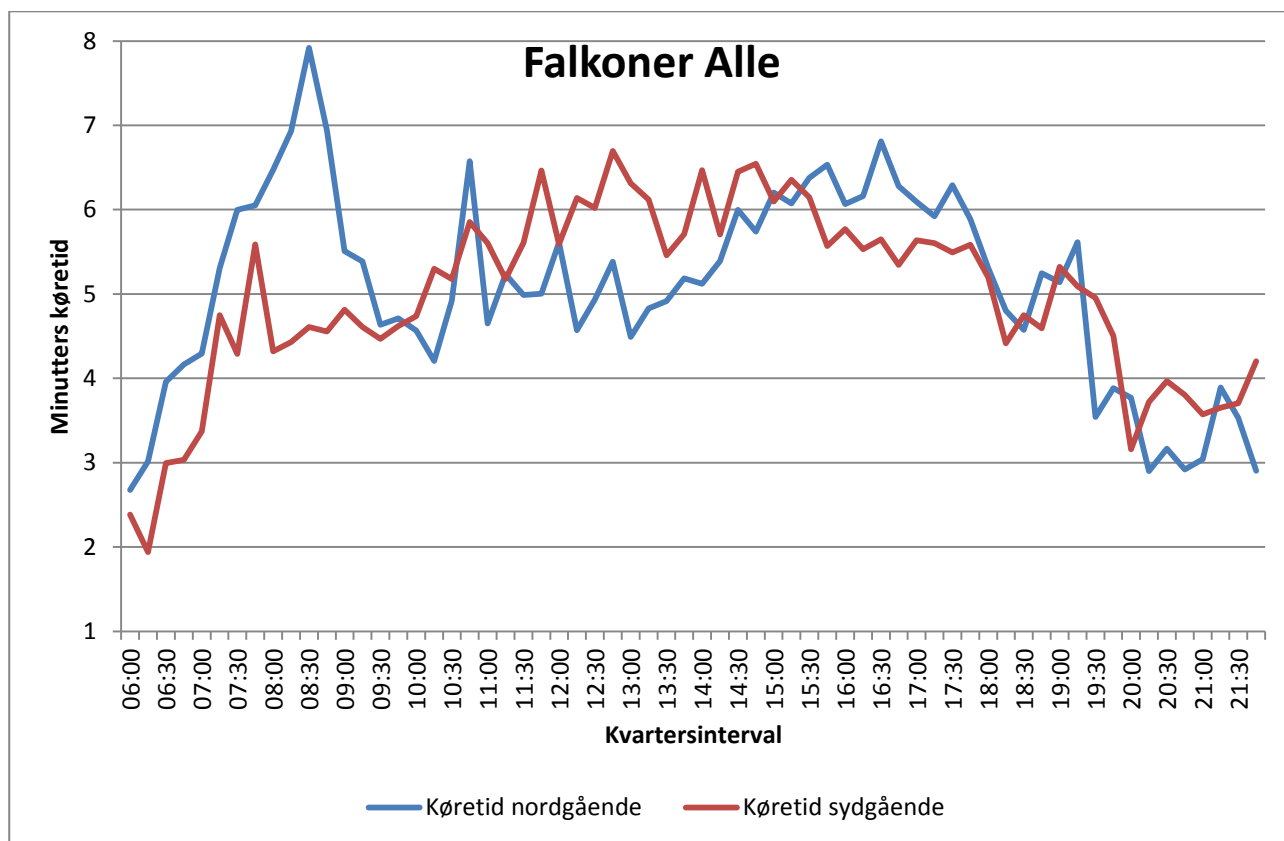


Figur 17: Køretid for Godthåbsvej på kvartersinterval i hverdagen

Figur 17 viser køretiderne for Godthåbsvej. Det kan ses, at i morgentrafikken følges køretiderne for de to retninger ganske pænt ad, mens om formiddagen mellem 9 og 11 er der op til 2 minutters forskel mellem køretiderne i de to retninger. Her er det hurtigst at køre væk fra centrum. Senere på eftermiddagen, mellem 14:45 og 17:30 er det klart hurtigere at køre ind mod centrum frem fra væk fra centrum. Her tager det 3½ minut længere at køre væk fra centrum frem for mod centrum.

Falkoner Alle i København

Falkoner Alle er en vejstrækning på 1,2 km, som går parallelt med centrum af København fra syd mod nord.



Figur 18: Køretid for Falkoner Alle på kvartersinterval i hverdagen

Figur 18 viser køretiderne for Falkoner Alle. Her viser en ganske interessant tendens sig, nemlig at det både om morgenen og om eftermiddagen er hurtigere at køre mod syd end mod nord ad Falkoner Alle. Især om morgenen er det helt op til $3\frac{1}{2}$ minut langsommere at passere Falkoner Alle i nordgående retning end i sydgående.

Diskussion

Resultaterne i det foregående afsnit har vist, at de største forskelle på hastigheden findes i de større byer og dette er hovedsagligt i morgen- og eftermiddagstrafikken. Dette er ikke overraskende, men bidraget i denne artikel er, at det er identificeret, hvor det er der er forskelle og hvor store disse forskelle er.

Et andet væsentligt bidrag af denne artikel er, at det med analysen af vejstrækninger i København er vist, at hvis der skal estimeres nøjagtige køretider så er det vigtigt, at retningen er med. Der kan altså ikke laves gode estimater af køretider, hvis alle målinger på et segment slås sammen og bruges til at lave en estimerede køretid, der skal gælde for begge færdselsretninger. Denne observation leder til den klare konklusion, at når der opsamles GPS data fra køretøjer og dette skal anvendes til estimering af køretider, så skal kompasretningen gemmes. Dette betyder naturligvis, at mere data gemmes, men at det direkte kan føre til markant bedre estimering af køretiderne.

Kompasretningen opsamles i de GPS målinger, der er til rådighed for denne artikel og forsøgene der er opsummeret i Tabel 5 viser at disse retninger generelt er af god kvalitet. Selv når vinklen mellem vejsegment og GPS målingerne skal være mindre end 30° er mere end 85 % af målingerne valide. Dette vurderes derfor, at GPS målingerne kan anvendes til at finde køretider i to færdselsretninger.

I artiklen er Creative-Commons licens kortet OSM anvendt. På dette digitale kort er vej kategorierne ikke så veldefinerede som på et kommerciel kort. Resultaterne i Tabel 6 og Tabel 7, hvor hele vejnettet og det overordnede netværk sammenlignes, viser de forskelle der er forventet. Dette tages som en indikator for at vej kategorierne i OSM kortet generelt er fornuftige. Dette udelukker ikke at der kan være større fejl for mindre dele af vejnettet.

Et emne der kun har været let berørt er hvordan køretider estimeres, hvis der er ingen eller få GPS målinger på et segment. Der eksisterer en række løsningsforslag til dette. I denne artikel har der ikke været fokus på dette fordi det er antaget at de interessante strækninger, har en betydelig trafik, som det også fremgår af afsnittet der beskriver GPS data.

Der er en række begrænsninger ved de køretider der estimeres med tilgangsvinklen, der forslås i denne artikel. Som eksempler er estimerede køretider beregnet på baggrund af gennemsnitlige historiske køretider uden opdeling i forhold til tid på året. Der anvendes i metoden heller ingen live opdatering af data, således at der kan estimeres en køretid, som det forventes det om 5 minutter baseret på den nuværende trafik. Det første vil kræve større datamængder end der i øjeblikket er tilgængeligt og det sidste vil kræve, at der er adgang til realtids data fra et betydeligt antal køretøjer.

Relateret arbejde

Brug af GPS data til at estimere køretider er velbeskrevet i relateret arbejde fra danske konsulent huse og Vejdirektoratet (COWI A/S, 2004) (Holm & Foller, 2008) (Vejdirektoratets GPS database, 2012). Der er også en langt række udenlandske erfaringer med brug af GPS til køretider (Quiroga & Bullock, 1998) og andre formål så som transport mode (Yu, Liu, Wang, & Xie, 2008). Bidraget fra denne artikel er at detaljerne for at estimere køretider mht. kørselsretningen er inkluderet.

Der er i denne artikel anvendt lavfrekvent GPS data, hvor det antages at ruten mellem to efterfølgende GPS målinger ikke kan bestemmes med den map-matching teknologi (Pereira, Costa, & Pereira, 2009), der er til rådighed. Der er andre tilgange til at map-match lavfrekvent data (Lou, Zhang, Zheng, Xie, & Wang, 2009) (Brakatsoulas, Pfoser, Salas, & Carola, 2005), men et computerprogram der understøtter disse teknologier er ikke offentligt tilgængeligt.

Konklusion

Denne artikel har anvendt lavfrekvent GPS data og OpenStreetMap kortet til at estimere køretider. I artiklen er det vist, at når kompasretningen er tilgængelig i GPS målingerne kan køretiden i færdselsretningerne tages i betragtning og at dette er nødvendigt for at kunne lave nøjagtige estimering af køretiderne. At køreretningen må tages i betragtning skyldes, at det generelt kun er halvdelen af segmenterne, der har tæt på ens hastighed i begge retninger.

Resultaterne viser, at forskelle i hastighed i færdselsretningerne hovedsagligt er et fænomen, der opleves i centrum af de større byer og mest udpræget i morgen- og eftermiddagstimerne. Dette er velkendt, så denne artikels bidrag er, at det vises hvor og hvor store disse forskelle er. Herudover anvendes tre konkrete eksempler med længere vejstækninger i København til at påvises at forskellene er så store at disse ikke kan ignoreres.

Acknowledgement

Dette arbejde er støttet af Cassiopeia Innovation, Daisy Innovation samt REDUCTION (www.reduction-project.eu).

Bibliografi

- Vejdirektoratets GPS database. (15. 08 2012). Hentet fra <http://vej06.vd.dk/gpsbase4.0/rapporter/StraekningsUdskrift.html>
- Brakatsoulas, S., Pfoser, D., Salas, R., & Carola, W. (2005). On map-matching vehicle tracking data. *VLDB*.
- COWI A/S. (2004). *Projekt Trængsel*.
- Geofabrik GmbH Karlsruhe. (u.d.). *Download OpenStreetMap Extracts*. Hentede 5. Juli 2012 fra <http://download.geofabrik.de/osm/europe/>
- Holm, J., & Foller, J. (2008). GPS pilotprojekt. *Trafikdage på Aalborg Universitet*.
- Lou, Y., Zhang, C., Zheng, Y., Xie, X., & Wang, W. H. (2009). Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories. *ACM SIGSPATIAL*.
- Moeller, C. (u.d.). *osm2po - openstreetmap converter and routing engine for java*. Hentede 6. Juli 2012 fra <http://osm2po.de/>
- Open Geospatial Consortium. (2011). *OpenGIS® Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture*.
- Open-Street Map. (u.d.). Hentet fra <http://www.openstreetmap.org/>
- OpenStreetMap. (u.d.). *Highway tag usage*. Hentede 11. Juli 2012 fra OpenStreetMap Wiki: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Highway_tag_usage
- Pereira, F., Costa, H., & Pereira, N. (2009). An off-line map-matching algorithm for incomplete map databases. *European Transport Research Review*(3), s. 107-124.
- Quiroga, C. Q., & Bullock, D. (1998). Traveltime studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 6(1-2).
- Yu, Z., Liu, L., Wang, L., & Xie, X. (2008). Learning transportation mode from raw gps data for geographic applications on the web. *Proceedings of the 17th international conference on World Wide Web*.