Aalborg Universitet
Veje og Trafik: Kandidatspeciale

LiDAR til cykeldetektering

Kandidatspeciale

Forfatter:
Malthe Birkemose Holm

Vejleder:
Harry Lahrmann

Juni 2020

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

10. semester v/ Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet
Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
www.engineering.aau.dk

Titel:

LiDAR til cykeldetektering

Engelsk titel:

LiDAR for bike detection

Semester:

10. semester på Byggeri og Anlæg

Studieretning:

Veje og Trafik

Projekttype

Kandidatspeciale

Projektperiode:

1. februar 2020 - 10. juni 2020

Forfatter:

Malthe Birkemose Holm

Vejleder:

Harry Lahrmann

Hovedrapport: 61 sider
Appendiks: 4 stk. (A-D) 50 sider
Afsluttet: 10-06-2020

Rapportens indhold er frit tilgængeligt

Forord

Denne rapport er udarbejdet af studerende Malthe Birkemose Holm, som kandidatspeciale på 10. semester af kandidatuddannelsen Veje og Trafik ved Aalborg Universitet. Projektperioden, hvori specialet er udarbejdet, strækker sig fra d. 1. februar 2020 til d. 10 juni 2020.

Projektet omhandler brugen af LiDAR til cykeldetektering og herunder detektering af cyklisters antal, position, hastighed og ETA. Resultater i projektet er baseret på egen dataindsamling med HDL-32e LiDAR, databehandling i programmet Pylidartracker, udviklet til brug i projektet, og dataanalyse med selvudviklede Python scripts.

Der skal lyde en særlig stor tak til følgende personer, der igennem projektforløbet har ydet en faglig assistance i forbindelse med udarbejdelsen af projektet:

- Harry Lahrmann, Lektor ved Aalborg Universitet, for kyndig vejledning igennem projektet, på trods af COVID-19 omstændigheder.
- Mihhail Samusev, Forskningsassitent ved Aalborg Universitet, for udvikling af programmet Pylidartracker.
- Rasmus Øhlenschlæger, Forskningsassitent ved Aalborg Universitet, for hjælp med opsætning af udstyr og indsamling af data.
- Morten Juel Skovrup, Ingeniør ved Danfoss, for rapportteknisk korrespondance.
- Kristian Aalling Sørensen, Studerende ved DTU, for hjælp og vejledning i forbindelse med programmering af Python scripts og generel sparring.
- Mads Christiansen, Studerende ved DTU, for hjælp og vejledning med udarbejdelse af plots.

Malthe Birkemose Holm, juni 2020
Aalborg Universitet

Læsevejledning

Kildehenvisninger i rapporten er angivet efter Harvard-metoden, så der refereres til en kilde med [Efternavn, År]. Kilder i rapporten kan findes i litteraturlisten, hvor de fremgår i alfabetisk rækkefølge efter forfatterens efternavn eller institutionnavn.

Figur- og tabelnummerering referer til hvilket kapitel figuren er i, og rækkefølgen de optræder i, i kapitlet, således at første figur i kapitel 3 vil have nummer 3.1. Figurnummerering og -tekst fremgår under figur, og tabelnummerering og -tekst fremgår over tabel. Læses rapporten elektronisk vil alle referencer være klikbare. Figurer og tabeller uden kildeangivelse er udarbejdet af forfatteren af dette projekt.

Abstract

This thesis examines the use of LiDAR for bike detection in traffic. Bike detection has a wide array of applications, including statistics of bike use, traffic adaptive signal control and other applications in ITS (Intelligent Transport Systems). The purpose of this project is to determine the capability of LiDAR in detecting cyclists travelling in close proximity in order to assess the number of cyclists, their positions and to calculate speed and ETA based on this.

Data is collected using a HDL-32e LiDAR mounted on a lamppost for detection of cyclists on a bike path leading up to a signalized intersection in Aalborg, Denmark. Collected data is evaluated using the Pylidartracker program which has been specifically designed for this thesis. Data analysis is done using in-house developed Python scripts.

During the timeframe of data collection, 233 cyclists were observed using a video camera. With the LiDAR-data, Pylidartracker and Python scripts, it was possible to determine the precise position and calculate speed and ETA, to a defined point, for all 233 observed cyclists. In one instance, two cyclists in very close proximity to each other led to an overestimation of the number of cyclists by 1, making the number of detected cyclists 234. The study therefore achieved an overall precision on bike detection with LiDAR of 99.5%.

This study has some limitations, as it was only possible to achieve the reported accuracy within a 12 meter range of the LiDAR. Furthermore, the data collection was done during COVID-19 restrictions, which may have affected the number of cyclists as well as their proximity to each other.

This study concludes that LiDAR is highly capable of detecting individual cyclists within a range of 12 meters, but that further studies are needed to determine the capability of LiDAR in detecting cyclists travelling in close proximity in groups. This study includes proposals for designs of future studies to avoid the limitations faced in this study.

Synopsis

Dette kandidatspeciale undersøger brugen af LiDAR til cykeldetektering i trafikken. Cykeldetektering har en bred vifte af anvendelsesområder, herunder statistik af cyklisme, trafikstyrede signalanlæg og andre anvendelser i ITS (intelligente transportsystemer). Formålet med projektet er at fastlægge antallet af cyklister og deres position, hastighed og ETA, når disse bevæger sig i grupper.

Til indsamling af data er HDL-32e LiDAR anvendt. Denne er monteret på en mast og detekterer cyklister på en cykelsti, der tilkører et signalreguleret kryds i Aalborg. Indsamlet data er evalueret med programmet Pylidartracker, som er udviklet til brug i projektet. Data er analyseret ved brug af selvudviklede Python scripts.

I tidsrammen for dataindsamlingen er 233 cyklister observeret ved hjælp af video. Ud fra LiDAR-data, Pylidartracker og Python scripts var det muligt at fastlægge position og beregne hastighed og ETA til et specifikt punkt, for alle 233 observerede cyklister. I ét tilfælde er to cyklister der bevæger sig meget tæt, fejldetekteret, hvilket fører til en overestimering af antallet af cyklister med 1. Det totale antal detekterede cyklister er derfor 234. Studiet har derfor opnået en overordnet præcision for cykeldetektering med LiDAR på 99.5%.

Studiet har visse begrænsninger, da det kun var muligt at opnå den opgivede præcision inden for 12 meters afstand af LiDAR. Yderligere blev dataindsamlingen foretaget under COVID-19 restriktioner, hvilket kan have påvirket både antallet af cyklister og deres indbyrdes afstand.

Studiet konkluderer, at LiDAR i høj grad er i stand til at detektere individuelle cyklister inden for 12 meters afstand, men at yderligere studier er nødvendige for at bestemme cykeldetektering med LiDAR for cyklister, der bevæger sig tæt i grupper. I studiet inkluderes forslag til fremtidige studier der ville kunne håndtere begrænsningerne påpeget i dette studie.

Ordforklaring

AGD	Above Ground Detection. Detekteringsteknologier der ikke kræver installering i vejopbygning, så som spoler. Above Ground Detectors anvendes til detektering af trafikanter til brug i trafikstyrede signalanlæg. Above Ground Detection omfatter kamerateknologier, Radar, LiDAR med flere. Fælles for disse er at de anvender objektbaseret teknologi til detektering af trafikanter.
ETA	Estimeret tid til ankomst. Beregnes ved realtids hastighedsmåling og afstand til kryds, og bruges til styret nedlukning af grøntid.
FOV	Field of View. Synsfeltet hvori detektor indsamler data og observerer objekter.
Frame	Ét enkelt billede eller ét enkelt sæt datapunkter.
FPS	Frames per second. Antal billeder/datapunkter per sekund
ITS	Intelligente transportsystemer. En fællesbetegnelse for tekniske løsninger, der gør trafikken mere effektiv, miljørigtig og sikker ved at tilpasse sig den aktuelle trafik. ITS omfatter trafikstyrede signalanlæg der anvender detekteringsteknologier.
LiDAR	Light Detection And Ranging. Laserbaseret teknologi til registrering af omgivelserne ved hjælp af reflektionstid af udsendt laser.
Radar	RAdio Detection And Ranging. Radarbaseret teknologi til registering af omgivelserne ved hjælp af reflektionstid af udsent radar.
RPM	Revolutions per minute. Omdrejninger per minut.
Sensor fusion	Kombinering af flere sensorformer til detektering. Anvendes til at højne pålideligheden og styrke datagrundlaget af detekteringen.
ÅDT	Årsdøgnstrafik. Antallet af passerende trafikanter på et givent punkt

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Projektbaggrund **1**
1.1 Problemformulering 4

Kapitel 2 Litteraturstudie **5**
2.1 Litteratursøgning 5
2.2 Udviklingen i cykeltrafikken 6
2.2.1 Danmark er cykelland nummer 2 i Europa [Nielsen et al., 2015] . . . 6
2.2.2 Faktaark om cykeltrafik i Danmark [DTU Transport, 2018] 6
2.2.3 Udvikling i cykeltrafikken på landsplan og i de fire største byer . . . 7
2.3 Cykelprioritering i trafikken 7
2.3.1 Making Cycling Irresistible: Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany [Pucher og Buehler, 2008] 7
2.3.2 Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling [Jacobsen, 2015] 7
2.3.3 Network design, built and natural environments, and bicycle commuting: Evidence from British cities and towns [Cervero et al., 2019] 8
2.3.4 Effect of Street Network Design on Walking and Biking [Marshall og Garrick, 2010] 8
2.3.5 Promoting cycling: changes to expect [European Commission, 2020] 8
2.3.6 Effekter af cykling [DI Transport, 2018] 8
2.3.7 Cyklister er guld værd for byerne [Celis og Nielsen, 2016] 9
2.3.8 Urban mobility on a human scale - Promoting and Facilitating active travel in cities [Quee og Bijlsma, 2018] 9
2.3.9 ITS solutions for cyclists [Weinreich og Vestergaard, 2019] 10
2.4 Cykeldetektering 11
2.4.1 Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister [Jacobsen og Knudsen, 2013] 11
2.4.2 Registering af cykeltrafik [Nissen, 2016] 12
2.4.3 Styring af trafiksignalanlæg ved brug af Above Ground Detection (AGD) [Vejregelrådet, 2019] 12
2.4.4 Cycle Safe Intersections - An Evaluation of Radar Bicycle Detectors in Dublin [Devilly et al., 2019] 13
2.4.5 LiDAR i selvkørende biler 14
2.4.6 Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors [Zhao et al., 2019] 14
2.5 Sammenfatning af litteraturen 14

Kapitel 3 Metode **17**
3.1 Besigtelse 17

3.2 Undersøgelsesdesign 20
3.2.1 Fastlæggelse af undersøgelse 21
3.2.2 Opsætning af sensor 22
3.2.3 Dataindsamling 23
3.2.4 Databehandling 23
3.2.5 Dataanalyse 27

Kapitel 4 Resultater **33**
4.1 Dataindsamling 33
4.2 Databehandling 34
4.3 Datanalyse 34
4.3.1 Antal cyklister 34
4.3.2 Position af cyklister 35
4.3.3 Hastighed af cyklister 36
4.3.4 ETA af cyklister 36
4.3.5 Sammenfatning af resultat 37

Kapitel 5 Analyse **39**
5.1 Analyse af fejldetektering 39
5.1.1 Effekt af fejldetektering for fastlagt position 41
5.1.2 Effekt af fejldetektering på gennemsnitshastighed og ETA 42
5.1.3 Analyse af støj i start af trajektorier 42
5.1.4 Analyse af udstrækning af ETA kurveforløb 43

Kapitel 6 Diskussion **45**
6.1 Anvendelsesformål af cykeldetektering 45
6.1.1 Tiltag til detektering af antal cyklister 47
6.2 Sammenligning med andre sensorteknologier 50
6.2.1 Detektering af ventende cyklister 50
6.2.2 Detektering af cyklisters ETA 50
6.2.3 Detektering af udvikling i cykeltrafikken 51
6.3 Effekt af COVID-19 for dataindsamlingen 51

Kapitel 7 Konklusion **53**

Kapitel 8 Perspektivering **55**

Litteratur **57**

Appendiks A Erfaringer og brugerønsker til cykeldetektering **65**

Appendiks B Trajektorier **71**

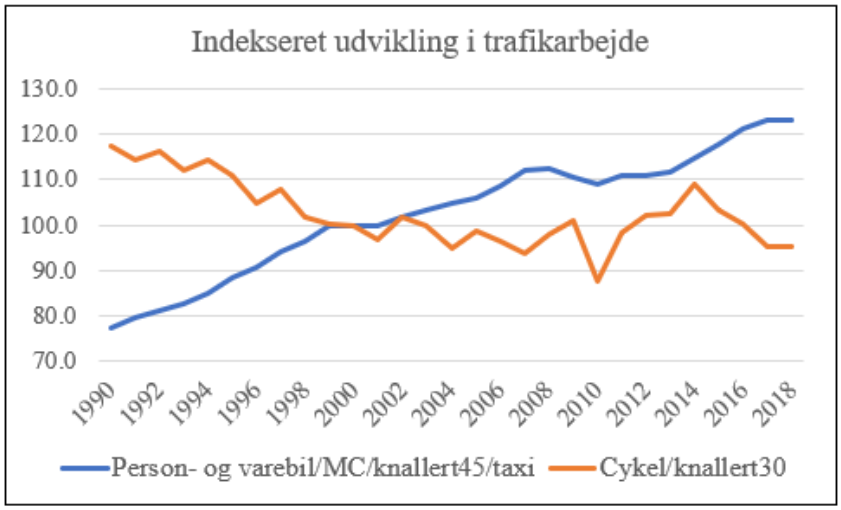
Appendiks C Hastigheder **83**

Appendiks D ETA **95**

1 Projektbaggrund

Danmark er den andenstørste cykelnation i Europa [Nielsen et al., 2015], i København står cyklen for 49% af ture til arbejde og uddannelse [Københavns Kommune, 2019] og i Aarhus, Odense og Aalborg foregår 40% af alle ture i centrum på cykel [Celis og Nielsen, 2016]. De senere år har cykeltrafikken i Danmark dog været faldende [Vejdirektoratet, 2019]. Der er mange årsager til faldet i cykeltrafikken så som flytning, børn eller nyt job [Vejdirektoratet, 2017]. Disse livsændringer medfører typisk tilvalget af bilen og tendensen er, at når cyklen først fravælges så holdes den helt op med at blive brugt [Vejdirektoratet, 2017].

På figur 1.1 ses udviklingen i bil- og cykeltrafikindeksen siden år 1990, med år 2000 sat til indeks 100.



Figur 1.1. Udviklingen i trafikarbejde fra år 1990 til år 2018 [Vejdirektoratet, 2018]

Af figuren ses et fald i cykeltrafikken i perioden fra 1990 til 2010, derefter en stigning frem til 2014 og sidenhen falder udviklingen frem til år 2018. I samme periode er biltrafikken støt stigende. Denne udvikling går imod politiske ønsker om mere cyklisme på nationalt plan, som det ses i cykelfremmende kampagner så som *Danmark - Op på cyklen* [Transportministeriet, 2014].

I dette projekt undersøges anvendelsen af AGD (above ground detection) til cykeldetektering, med henblik på at fastlægge position, hastighed, ETA (estimeret tid til ankomst) og antal cyklister. Dette undersøges fordi at detektering og registrering af cyklister er vigtigt for at måle effekten af cykelfremmende tiltag [Nissen, 2016] og fordi trafikstyring, til at prioritere og fremme cyklisme, afhænger af dette [Jacobsen og Knudsen, 2013] [Zhao et al., 2019].

Der er mange gevinster ved at fremme cyklisme. Cyklen forurener ikke, støjer mindre end andre transportmidler, mindsker trængslen på vejnettet og har en stor samfundsøkonomisk sundhedsgevinst [DI Transport, 2018]. Investeringer i cykelfremmende infrastruktur er desuden ofte billigere end investeringer i bilfremmende infrastruktur [Vestergaard og Bunton, 2019].

I ind- og udland er der god sammenhæng imellem prioritering af cyklisme og cyklens anvendelse [Quee og Bijlsma, 2018] samt imellem tilstedeværelsen af cykelinfrastruktur og antallet af ture der foretages på cykel [Cervero et al., 2019] [Marshall og Garrick, 2010].

Et af de nyeste områder der undersøges for at prioritere og fremme cyklisme i Danmark, er anvendelsen af ITS (intelligente transportsystemer). Et tiltag her er prioritering af cyklister i trafikstyrede signalanlæg, for eksempel ved minimering af antal start og stop og lave grønne bølger [Weinreich og Vestergaard, 2019]. Forudsætningen for at gøre dette er cykeldetektering [Jacobsen og Knudsen, 2013] [Zhao et al., 2019].

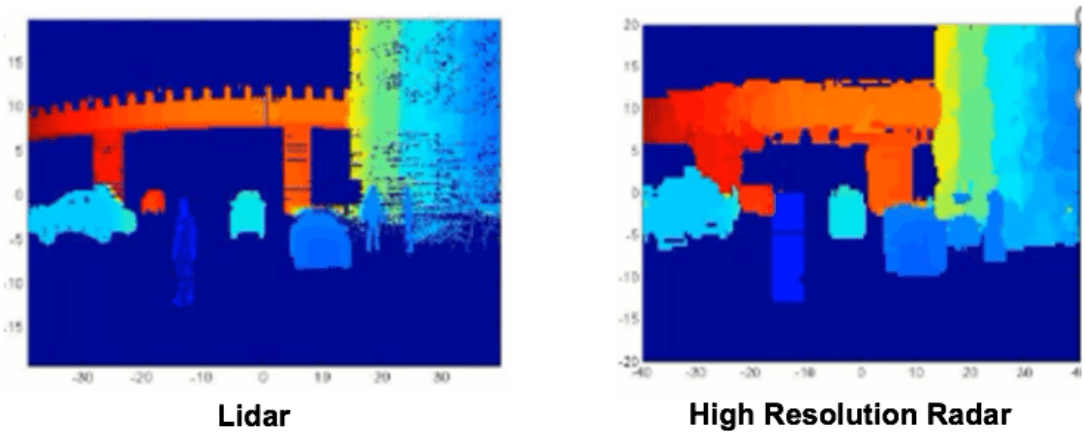
Traditionelt anvendes induktionsspoler placeret i vejbanen til detektering af cyklister. Denne fungerer ved at registrere tilstedeværelsen af metal ved hjælp af elektromagnetisme [Vejregelrådet, 2019]. Der er en række svagheder ved denne teknologi. Den detekterer ofte forkert, ved enten ikke at registrere forbipasserende cyklister, eller ved at spolen aktiveres af andre trafikantgrupper [Devilly et al., 2019]. Derudover kan induktionsspolen ikke foretage korrekt detektering af cyklister der bevæger sig i grupper, da spolen ikke kan adskille cyklisterne fra hinanden [Nissen, 2016]. Spoleteknologien er også forbundet med høje drift- og vedligeholdsomkostninger, da den er sårbar overfor slidtage af vejen samt grave- og asfalt arbejde [Jacobsen og Knudsen, 2013] [Nissen, 2016] [Vejregelrådet, 2019].

AGD-teknologier har ikke samme ulemper vedrørende vedligehold som induktionspolen og derudover kan AGD foretage kontinuerlige målinger af objekter til ETA baseret på realtid [Jacobsen og Knudsen, 2013] [Seerup og Westhausen, 2017] [Zhao et al., 2019]. Der er derfor fokus på anvendelsen af AGD som til detektering i fremtiden [Nissen, 2016].

En af de mest anvendte AGD-teknologier er radar (RAdio Detection And Ranging). Radaren udsender radiobølger og detekterer objekter baseret på reflektionen. Studier med radar viser gode detekteringsevner af både biler [Jacobsen og Knudsen, 2013] og cyklister [Devilly et al., 2019]. En anden AGD-teknologi er LiDAR (Light Detection And Ranging), denne fungerer ved at udsende laser og måle reflektionstiden. På baggrund af dette kan den danne en 3D gengivelse af omgivelserne og detektere objekter som følge af ændringer i reflektionstiden over tid.

I trafiksektoren undersøges LiDAR i flere studier i forbindelse med selvkørende biler. I disse studier fungerer LiDAR som bilens "øjne", enten som enkeltstående sensor [Choi et al., 2013] [Domínguez et al., 2011] [Han et al., 2012], eller i sensor fusion med blandt andet radar [Lee et al., 2019] eller videokamera [Asvadi et al., 2018] [Caltagirone et al., 2019] [Gao et al., 2018]. LiDAR anvendes blandt andet i den føreløse bus i Aalborg Øst [Vestergaard et al., 2018]. Udover anvendelsesområder inden for føreløs teknologi, viser et studie at LiDAR også kan anvendes til detektering og registrering af fodgængere og køretøjer med høj nøjagtighed [Zhao et al., 2019].

Laser har kortere bølgelængde end radar, dette gør LiDAR i stand til at detektere objekter i højere opløsning end radar [Rosique et al., 2019]. På figur 1.2 ses LiDARs evne til at detektere i højere oplysning.



Figur 1.2. Forskel i opløsning på radar og LiDAR detektering [Lapedus, 2017]

Der er fordele og ulemper ved både LiDAR og radar. Radar er billigere end LiDAR [Feldhan, 2017] og radaren påvirkes ikke af regn, sne og tåge [Kalburge, 2017]. Detektering med LiDAR er følsom over for ændringer i lysforhold og dens detekteringsevner forringes i regn, sne og tåge [Rosique et al., 2019]. LiDAR kan detektere i 360 grader, hvorimod radarens detektering er begrænset af dens orientering [Rosique et al., 2019]. Valget af AGD-teknologi afhænger derfor af formålet med detekteringen.

I projektet ønskes blandt andet detektering af antal cyklister med AGD, hvilket kan være en udfordring når cyklister bevæger sig i grupper, og det derfor er svært at adskille de enkelte cyklister. På grund af LiDARs evne til at detektere i høj opløsning undersøges anvendelsen af denne til cykeldetektering i projektet.

I undersøgelsen indsamles data med Velodyne HDL-32e LiDAR på udvalgt lokation i Aalborg. På figur 1.3 ses Velodyne HDL-32e LiDAR.

Figur 1.3. Velodyne HDL-32e LiDAR.

Indsamlet data evalueres for at fastlægge cyklisters antal, position, hastighed og ETA. Til at gøre dette anvendes baggrundsfiltrering, punktskyanalyse og objektgenkendelse og tracking i databehandlingen. I dataanalysen verificeres antal detekterede cyklister i LiDAR-data med videooptagelse og position, hastighed og ETA af hver enkelt cyklist fastlægges.

1.1 Problemformulering

Ud fra projektbaggrunden opstilles følgende problemformulering:

"Kan LiDAR anvendes til nøjagtig detektering af cyklister, når disse bevæger sig i grupper?"

For at besvare problemformuleringen søges der svar på følgende underspørgsmål:

- Kan LiDAR fastlægge antallet af cyklister?
- Kan LiDAR fastlægge cyklisters position?
- Kan LiDAR fastlægge cyklisters hastighed?
- Kan LiDAR fastlægge cyklisters ETA?
- Hvor tæt kan cyklister bevæge sig og stadig detekteres som unikke trafikanter med LiDAR?
- Kan en algoritme estimere antal cyklister, når disse cykler for tæt?

Afgrænsning

Der afgrænses fra undersøgelse af sensor fusion med LiDAR til cykeldetektering.

Litteraturstudie 2

Litteraturstudiet har til formål at finde eksisterende litteratur inden for udviklingen i cykeltrafikken, prioritering af cyklisme og effekten af dette samt detektering af cyklister ved brug af spoler og AGD. Der søges litteratur med erfaringer fra Danmark og udlandet.

Kapitlet er opdelt i et afsnit der beskriver litteratursøgningsprocessen og derefter tre afsnit hvor litteratur inden for udvikling i cykeltrafikken, cykelprioritering og cykeldetektering præsenteres. Til sidst sammenfattes den udvalgte litteratur.

Litteraturstudiet foretages med henblik på at opnå vidensgrundlag til at belyse problemformulering.

2.1 Litteratursøgning

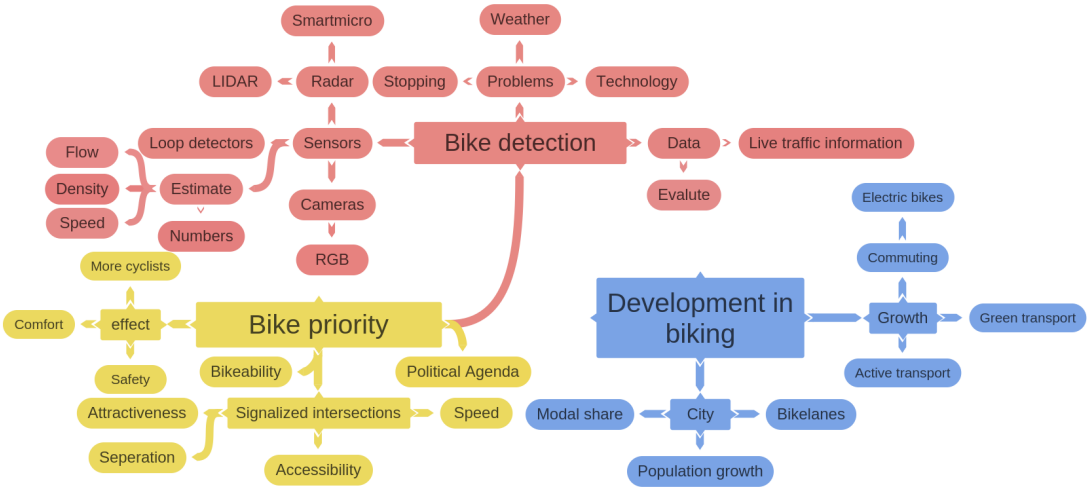
I litteratursøgningen anvendes relevante databaser. Dette gøres for at sikre et højt videnskabligt niveau. Databaser der anvendes i projektet er:

- Science Direct
- Google Scholar
- TRID (Transport Research International Documentation)
- Primo (AAU's biblioteks søgemaskine)
- Vejdirektoratets Vejregelportal
- Trafik & Veje
- Trafikdage

Science Direct, Google Scholar, TRID og Primo anvendes til primære søgninger efter litteratur. Trafik & Veje, Trafikdage og Vejdirektoratets Vejregelportal anvendes til direkte søgninger tilhørende bestemte problemstillinger der er relaterer sig til danske forhold.

For at fastlægge søgeord til litteraturstudiet udarbejdes et Mindmap med søgeord der anvendes i litteratursøgningen. Dette gøres for at finde relevant litteratur med en systematisk og struktureret metode.

Mindmappet har hovedordene i midten og søgeord der bruges i forlængelse af disse udenom. Inden for hvert emne er søgeordene brugt i forskellige kombinationer med hinanden. Mindmappet er på engelsk, men i litteratursøgningen anvendes også danske termer. Mindmappet ses af figur 2.1.



Figur 2.1. Mindmap med søgeord til litteratursøgning.

Udover anvendelsen af Mindmap til søgeord brugt i databaser så findes der litteratur ved hjælp af kædesøgning af litteraturlister i fundet litteratur. Litteraturen vælges på baggrund af abstracts og relevans for projektet. I litteraturstudiet indgår 30 kilder.

2.2 Udviklingen i cykeltrafikken

I dette afsnit præsenteres litteratur og statistik der vedrører sig cykeltrafikkens udvikling.

2.2.1 Danmark er cykelland nummer 2 i Europa [Nielsen et al., 2015]

I denne artikel gennemgås cykelvaner i forskellige europæiske lande, og her fastlægges det at Holland er det mest cyklende land med Danmark som nummer 2. I Holland bruger 63% af befolkningen cyklen flere gange om ugen, mens dette gør sig gældende for 48% af danskerne. I den anden ende af cykelstatistikken er lande som Malta, Cypern, Nord Irland og Storbritannien som de mindst cyklende europæiske lande. I Malta er brugen af cykel nærmest ikke eksisterende, og under 10% bruger cyklen på ugelig basis i Cypern, Nord Irland og Storbritannien.

I studiet sammenlignes cykelvaner i Holland og Danmark og der fastlås at hollændere cykler 850 km om året, mens en dansker cykler 530 km, og at forskellen i tilbagelagt afstand på cykel skyldes at hollænderne i langt større omfang benytter cyklen til de mellemlange (2 - 5 km) og lange ture (over 5 km) end danskerne. Andelen af korte ture (under 2km) er stort set ens i de to lande. Der konkluderes at hvis danskernes brug af cykel skal op på det hollandske niveau skal danskerne tage flere mellemlange og lange ture på cyklen.

2.2.2 Faktaark om cykeltrafik i Danmark [DTU Transport, 2018]

I denne artikel undersøges de statiske forhold for cykeltrafikken i Danmark. Her fastlægges det, at danskere i aldersgruppen 10 til 84 år i gennemsnit i benytter cyklen til 0,46 ture pr. dag, og at en gennemsnitligt cykeltur har en længde på 3,46 km. De fleste cykelture er pendlerture til og fra arbejde eller uddannelse, som står for 44% af cykelturene, efterfulgt

af transport til fritidsaktiviteter, som står for 39% af cykelturene. Undersøgelsen viser at cykling i Danmark er sæsonbestemt, hvor der cykles mest i sommerhalvåret, eksklusiv juli måned, og at det er unge i aldersgruppen 20 til 30 år der cykler mest, og derefter falder cykelarbejdet med alderen. Der er desuden sammenhæng i mellem uddannelsesniveau og brug af cyklen. Her er tendensen at personer med længere uddannelser cykler mere end personer med kortere uddannelser. I studiet konstateres der at der er en kraftig vækst i andelen af elcykler i perioden 2014 til 2017, men at ture på elcykler stadig kun udgør lidt under 4% af det samlede antal ture.

2.2.3 Udvikling i cykeltrafikken på landsplan og i de fire største byer

På landsplan viser Vejdirektoratets cykeltrafikindeks en stagnering i cykeltrafikken siden 2008, og et decideret fald i perioden 2014-2017 [Vejdirektoratet, 2019]. Blandt de fire største byer i Danmark har København haft en svag stigning på 2% i antal cykelture i perioden 2009-2018 [Københavns Kommune, 2019]. I Aarhus har været en vækst i cykeltrafikken på 20% i perioden fra 2009 til 2017 [Aarhus Kommune, 2017]. I Odense er andelen af ture der foregår på cykel faldet i perioden 2014 til 2018, og det samme er gældende for cykelpendling [DTU Transport, 2019]. I Aalborg er cykeltrafikken i perioden 2014 til 2018 også faldende [Aalborg Kommune, 2018].

2.3 Cykelprioritering i trafikken

I dette afsnit præsenteres litteratur der vedrører sig prioritering af cykler og effekten ved at gøre dette.

2.3.1 Making Cycling Irresistible: Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany [Pucher og Buehler, 2008]

I denne artikel undersøges hvilke forhold der gør at blandt andet Danmark ligger i toppen af cykelstatistikkerne. I studiet undersøges samtlige forhold for cyklens attraktion som transportmiddel. Det konstateres at der er mange faktorer som spiller ind, bl.a. i hvor høj grad landets infrastruktur favoriserer bilismen. Her fastslås det at når arealer og infrastruktur i byen prioriteres til cykel og gang i stedet for til bilen fører det til flere cyklister. Ligeledes konstateres det at separering af cyklister fra motorkøretøjer og en generel prioritering af cyklister i netværket er afgørende faktorer for hvor mange der cykler.

En anden vigtig faktor er sikkerheden associeret ved at cykle. I artiklen konstateres det at det er op til fire gange sikrere at være cyklist i Danmark end i USA og dobbelt så sikkert som i Storbrittanien, når der kigges på dødfald per tilbagelagt cyklet kilometer. Derudover så indikerer artiklen at fænomenet "Safety in numbers"er gældende for cyklister, således at jo flere der cykler jo bedre er trafiksikkerheden for cyklister, da de øvrige trafikanter i højere grad er opmærksomme på cyklister.

2.3.2 Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling [Jacobsen, 2015]

I denne artikel undersøges trafiksikkerheden for cyklister i forskellige lande hvor cyklen anvendes som transportmiddel i forskellig grad. Her konkluderes det at forholdet i mellem

sandsynligheden for at en given cyklist rammes af et motoriseret køretøj er omvendt proportionalt med antallet af cyklister. Således er der direkte proportionalitet i mellem antallet af cyklister og trafiksikkerheden for den enkelte cyklist.

2.3.3 Network design, built and natural environments, and bicycle commuting: Evidence from British cities and towns [Cervero et al., 2019]

I denne artikel undersøges sammenhængen i mellem infrastruktur karakteristika og valg af transportmiddel ved pendling til arbejde.

Studiet bygger på data fra 36 byer i England. I hver af disse byer fastlægges andelen der bruger cyklen som transportmiddel til arbejde samt information om cykelinfrastrukturen. Der indsamles data i hver by på variabler relateret til cykling heriblandt cykelfaciliteter, cykelforbindelser, ratio i mellem transporttid på cykel og offentlig transport, trafikintensitet med mere. Disse variabler anvendes i studiet til modellering af andel der cykler til arbejde og forhold for cyklister. Dette gøres med henblik på at fastlægge hvilke faktorer der er vigtigste for at prioritere og fremme cykelpendling.

Der konkluderes at der ikke er enkelte tiltag der i sig selv signifikant øger andelen der cykler til arbejde, men en kombination af flere. Desuden konkluderes det at let adgang til cykelstier og prioritering af cyklisme i infrastrukturen er vigtige faktorer i at øge andelen der cykler til arbejde.

2.3.4 Effect of Street Network Design on Walking and Biking [Marshall og Garrick, 2010]

I denne artikel undersøges sammenhængen i mellem layout af gader i mere end 1000 forskellige nabolag i 24 forskellige byer i Californien og valg af transportmiddel. Her konstateres det at der er stor sammenhæng i mellem design af infrastrukturnetværket og mængden af ture der bliver foretaget på cykel. I studiet konkluderes god korrelation i mellem mængden af cykelvenlig infrastruktur i nabolagene og antal cyklende.

2.3.5 Promoting cycling: changes to expect [European Commission, 2020]

I denne artikel undersøges det hvilken effekt der kan forventes hvis prioritering af cyklisme fører til færre bilture. I studiet undersøges effekten af hvis andelen af bilture reduceres fra 44% til 30% i en by.

Det konkluderes at hvis dette sker så medfører det en hel del positive ting. Heriblandt er der 30% færre trafikpropper, 25% mindre forurening og 9% reduktion i antal mennesker der har støjgener.

2.3.6 Effekter af cykling [DI Transport, 2018]

I denne artikel evalueres effekten af øget cyklisme i hovedstadsområdet på blandt andet trængsel og samfundsøkonomi. Studiet er baseret på trafikmodellen OTM, og på en forenklet antagelse om én til én overflytning fra bil til cykel.

Det konkluderes af studiet at med en 10% stigning i tilbagelagte kilometer på cykel så vil der være 6% mindre trængsel og en besparelse på 184 millioner kroner i trængselsomkostninger. Det konkluderes yderligere at ved 10% vækst i cykeltrafikarbejdet i Danmark vil der være en samlet samfundsøkonomisk sundhedsgevinst på 1.1 milliard kroner. Den største af denne gevinst er at finde i region hovedstaden, da det er her at 41% af de samlede cykeltrafikarbejde udføres.

2.3.7 Cyklister er guld værd for byerne [Celis og Nielsen, 2016]

I denne artikel undersøges cyklisters betydning for handelslivet i bykernerne i en række større danske byer, eksklusiv København.

Det konstateres at cyklen benyttes til den største andel af ture i centrum af større byer, hvor den står for 37% af turene, mens bilen udgør 30%. I artiklen undersøges omsætningen i butikker på forskellige transportformer, og her fastlås det at cyklister og gående bidrager med mere end halvdelen af omsætningen i bymidterne i de store byer uden for København. Desuden så besøger cyklister og gående flere butikker pr. tur end bilister.

Det konkluderes af undersøgelsen at cyklister og gående bidrager væsentligt til handelslivet i bykernerne, og at dette bør indgå i kommunernes mobilitetsplanlægning i henhold til prioritering af cyklisme og cykelinfrastruktur.

2.3.8 Urban mobility on a human scale - Promoting and Facilitating active travel in cities [Quee og Bijlsma, 2018]

I denne rapport undersøges potentialet for cykling til hverdagstransport. Dette gøres ved at afholde nogle forskellige løb i mellem forskellige transportmidler. Her dyster cyklen mod offentlig transport og bilen om hvem der hurtigst kan transportere sig fra forskellige lokationer i Stockholm bymidte til nogle områder uden for bymidten. Den transportform der vinder løbene er skiftevis offentlig transport og cyklen, afhængigt af start- og slutpunktets afstand til offentlig transport. Aldrig bilen.

I studiet undersøges cykelvaner i forskellige lande i Europa, og det konstateres at cyklen identificeres forskelligt i forskellige lande. Når man googler det hollandske ord for cykling - fietsen - er resultaterne primært vedrørende hverdagscykling, men når der søges på cykling i blandt andet Storbritannien og Sverige så er resultaterne mere orienteret i mod cykling som sport og rekreativ aktivitet.

Studiet konstaterer at cykling generelt har været i vækst i Europa, både i lande der traditionelt har været cykellande og i lande hvor hverdagscykling ikke er normen. I Rotterdam har antal ture pr dag vokset fra 55.000 i 2007 til 75.000 i 2014, og i London er cykeltrafikken vokset med 61% i perioden 2005 til 2015.

I studiet undersøges forskellige europæiske byers forhold i mellem kilometer cykelsti kontra størrelsen af byen. Her konstateres det at København har 4,72 km cykelsti per km^2 mens ratioen i Amsterdam 3,48 mens der i Paris er 6,66 km cykelsti per km^2 by. Der konstateres at der ikke er en sammenhæng i mellem en høj ratio af kilometer cykelsti til bystørrelse og andelen der cykles.

Studiet konkluderer at det der gør at cykling er så udbredt i blandt andet København og Amsterdam er at det er fordelagtigt at cykle i disse byer i stedet for at tage bilen. Dette skyldes at cyklen i disse byer generelt er prioriteret højt, og i mange tilfælde højere end bilen. Dette kommer til syne blandt andet ved at give cyklister tidligere grønt i lyskryds og ved at lave grønne bølger for cykeltrafikken i signalstyringen.

2.3.9 ITS solutions for cyclists [Weinreich og Vestergaard, 2019]

I denne artikel undersøges brugen at ITS med henblik på at prioritere cyklisme samt til at forbedre fremkommelighed på cykel, flow af cykelstrømme og trafiksikkerhed for cyklister.

Det konstateres at ITS før i tiden primært blev anvendt til bilisme og først i de senere år er der kommet fokus på anvendelsen af ITS til cyklisme. I dag anvendes ITS til at gøre cykling mere attraktivt og for at gøre det lettere og hurtigere at komme rundt på cykel. Desuden konstateres det at nye teknologier inden for ITS gør det muligt at detektere og registrere cyklister bedre end før.

Artiklen opsætter nogle ønsker for anvendelsen af ITS for cyklister. Disse ønsker omfatter bedre trafiksikkerhed, bedre fremkommelighed og komfort og det at gøre cykeltrafik mere synlig.

Et tiltag der fremhæves i artiklen til at forbedre trafiksikkerheden for cyklister er at adskille disse fra øvrig trafik ved brugen af ITS. Dette kan gøres ved at give cyklister deres eget signal i lyskryds og derefter give disse tidligere grønt i signalstyringen end øvrige trafikanter. Ved at gøre dette prioriteres cykeltrafikken og den gøres mere synlig for de øvrige trafikanter da cyklister kører ud i krydset før øvrig trafik.

I artiklen fremhæves et studie vedrørende brugen af ITS til at undgå højresvingsulykker. Her har Københavns Kommune opsat LED belysning langs cykelstien hen mod et kryds. Det aktiveres når cyklister nærmer sig krydset, hvorved opmærksomhed på cyklisten øges. Studiet viste at i tre ud af fire kryds, hvor dette blev testet, blev antallet af konflikter mellem cyklist og højresvingende halveret, som følge af dette tiltag.

I Aarhus er der ligeledes foretaget et studie for at undgå højresvingsulykker. Her er opstillet dynamiske tavler der advarer cyklister om store køretøjer der befinder sig i højresvingsbanen. Af studiet konkluderes det, at dynamiske tavler reducerer antal af konflikter i mellem cyklist og højresvingende med 28% og at 83% af trafikanterne foretrækker lyskryds med disse tavler kontra et uden.

I artiklen konstateres, at for at øge fremkommeligheden og komforten for cyklister kan signalstyringen designes således, at der skabes grønne bøgler for cyklister og færre start og stop. Der fremhæves to måder dette kan gøres på ved hjælp af ITS. Den ene måde er at oplyse om hvilken hastighed en cyklist skal cykle, for at være med i den grønne bølge, altså at cyklisten tilpasser sig signalstyringen. Den anden måde er at signalstyringen tilpasser sig cyklisternes aktuelle hastighed og foretager valg om forlængelse af grøntiden herefter.

Den første metode fungerer ved, at cyklisten oplyses om en hastighed der skal cykles, for at undgå at skulle stoppe for rødt. Dette kan gøres ved at måle cyklistens hastighed og derefter oplyse en nødvendig hastighed for at være med på bølgen. I artiklen fremhæves

et studie med etablering af grøn bølge for cykeltrafik på 13 lyskryds i Nørrebrogade i København på denne måde. Her viser før og efter målinger på cykeltrafikken en øgning i gennemsnitshastighed fra 15,12 km/h til 20,72 km/h og en sænkning i gennemsnitlig rejsetid fra 8,54 minutter til 6,25 minutter på strækningen.

Den anden metode kræver ikke at cyklister ændrer deres hastighed, men derimod at cyklers position og hastighed detekteres således at signalprogrammet kan tage højde for dette. På Nørre Farimagsgade i København detekteres cyklister med et ViSense kamera, og hvis der detekteres mere end 300 cyklister i en 15 minutters periode eller hvis rejsetiden på et givent strækning er længere end 2 minutter og 30 sekunder så tildeles cyklister mere grøntid i signalstyringen. Dataen indsamlet af ViSense kameraet kan desuden bruges til at evaluere cykelflows og cykelrejsetid.

Slutteligt i artiklen nævnes hvordan cyklister kan gøres mere synlige i trafikken og hvordan det kan vises at cyklister prioriteres ved hjælp af af cykeltællere og dynamiske infotavler. Cykeltælleren registrerer passerende cyklister og oplyser om antallet. De dynamiske infotavler informerer om ting relateret til cykelruten, dette kunne være rejsetid for bil og cykel i mellem to punkter, vejarbejde og trængsel på cykelstien.

2.4 Cykeldetektering

I dette afsnit præsenteres litteratur der vedrører sig detektering af cyklister og andre sensorer brugt i trafikken.

2.4.1 Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister [Jacobsen og Knudsen, 2013]

I denne artikel undersøges brugen af radar med henblik på detektion af trafikanter til trafikstyring af signalanlæg. I artiklen konstateres at traditionel detektering foregår ved brugen af induktionsspoler i vejen, men at disse har en række ulemper relateret til vedligehold, blandt andet ved slidtage af vejen og ved asfalt- og gravearbejde. Radaren ikke har disse ulemper da den installeres i krydsområdet f.eks. i eksisterende signalmaster og derfor ikke kræver anlægsarbejde udenfor krydsområdet og heller ikke er påvirket af slidtage af vejen, asfalt og gravearbejde på samme måde.

I artiklen fremhæves en række fordele ved radarteknologien. Radaren kan detektere i op til 240 meters afstand og den leverer et højt informationsniveau om trafikanter, blandt andet ved at kunne adskille objekter og estimere det enkelte objekts position, afstand og hastighed samt disses ETA til krydset.

I studiet udføres et forsøg hvor detektering med induktionspoler og radar sammenlignes.

Af forsøget konkluderes det, at radar og induktionsspole er jævnbyrdige når det gælder simpel punktdetektering. Herudover finder man række ekstra muligheder ved detektion med radar, blandt andet bedre mulighed for at estimere cyklisters hastighed og dermed ankomsttidspunkter til krydset. Derved kan valget om en eventuel forlængelsesperiode bedre foretages i signalstyringen.

2.4.2 Registering af cykeltrafik [Nissen, 2016]

I denne artikel undersøges de eksisterende og fremtidige muligheder for at detektere og registrere cykeltrafik og vigtigheden af dette, hvis man ønsker at prioritere og fremme cyklisme.

I artiklen konstateres, at for at kunne investere i cykeltrafikken og måle effekten af tiltag der skal fremme cyklisme, så er korrekt detektering og registrering af cyklister en forudsætning.

Problemstillinger vedrørende detektering af cyklister er blandt andet at cyklisters bevægelsesmønster er mindre forudsigeligt end bilers, samt at cyklister har en tendens til at bevæge sig i store klumper og at de ofte deler trace med andre trafikantgrupper, så som knallerter, scootere og motorcykler, som afhængigt af detekteringsmetoden, nemt kan forveksles med hinanden. Disse kan oftest kun adskilles fra hinanden ved at måle hastigheden.

I artiklen konstateres forskellige krav til pålidelig registrering af cykler. Der skal blandt andet detekteres antal cyklister, position, retning og hastighed. Til at gøre dette anvendes forskellige former for detektering, herunder induktionspoler, tælleslanger, radar og video og der anvendes ofte en kombination af 2 detekteringsformer for at bedre kunne håndtere klumper af cyklister. En problemstilling er at meget af udstyret til at detektere cyklister på markedet ikke er lavet til at håndtere den mængde cykeltrafik der er i større byer i Danmark, og den høje volumen og gør at udstyret af og til fejler.

Det konstateres, at når alle parametre vejes op så er induktionspolen stadig den bedste og mest anvendte teknologi, men at der er en række udfordringer med brugen af denne til detektering af cyklister. Cykeldetektering foregår primært i bymæssige forhold, hvor asfaltarbejde, slidtage og andet gør at der er stor risiko for at spoler ødelægges. Det konkluderes derfor at fremtidens detektering skal foregå med en teknologi der ikke er installeret i vejen, og den skal kunne håndtere klumper af cyklister.

2.4.3 Styring af trafiksignalanlæg ved brug af Above Ground Detection (AGD) [Vejregelrådet, 2019]

I denne håndbog gennemgås projektering af trafikstyrede signalanlæg med radar og termisk kamera. I litteraturstudiet behandles kun brugen af radar og detektering af cyklister.

Den mest anvendte teknologi til detektering er induktionsspolen. Denne har været brugt siden 50'erne, og fungerer ved at detektere ved hjælp af elektromagnetisme, og giver udslag ved tilstedeværelse af metal.

Induktionsspolen har en række ulemper, blandt andet omkostninger af vedligehold, da spoler er sårbare overfor sporkørsel, asfalt- og gravearbejde. Det er primært af disse årsager at spolen fravælges til fordel for detektering baseret på AGD-teknologi.

Radarteknologien scanner et defineret område, adskillige gange i sekundet, og kan tracke en stor mængde trafikanter på samme tid og tildele hver af disse et ID, en hastighed og en position. Disse parametre bruges i trafikstyringen i signalanlæg med radardetektering. Fordele ved radarteknologien er blandt andet estimering af tid til ankomst med realtidsmålinger, at den er funktionsdygtigt i al slags vejr og at den

som udgangspunkt er vedligeholdelsesfri. Ulemper ved teknologien vedrører primært fejldetektering, for eksempel problemer med at adskille objekter eller med at detektere cyklister, motorcykler og stillestående trafik.

I håndbogen konstateres at detektering af cyklister ofte har været nedprioriteret i forhold til detektering af motorkøretøjer, men at det ofte er et politisk ønske at opprioritere cyklister, og derfor er detektering af cyklister i højere grad relevant.

Serviceniveau for radardetekering til cyklister afhænger af hvor langt væk fra krydset der detekteres. I håndbogen anbefales der ved højt serviceniveau at detektere i to lange ubrudte felter, målt fra stopstregen tilbage langs cykelstien. Der anbefales at detektere i afstanden 0 - 40 meter og i afstanden 0 - 20 meter. Ved at gøre dette kan anmeldelse til krydset, valg af forlængelsestider foretages og estimeret tid til ankomst (ETA) beregnes i op til 40 meters afstand.

2.4.4 Cycle Safe Intersections - An Evaluation of Radar Bicycle Detectors in Dublin [Devilly et al., 2019]

I denne artikel gennemgås resultaterne af et studie med brugen af radar detektering af cyklister til smartere trafikstyring.

I Dublin er cykeltrafikken vokset i tidsrummet 2004 til 2016, men siden da er væksten faldet, derfor ønskede byrådet at gøre cykling mere attraktivt ved at implementere nogle forskellige tiltag til dette. Et af disse er at forbedre signalstyringen for cyklister.

For at gøre dette udføres et indledende forsøg med tre teknologier til detektering af cyklister. Her undersøges detektering med radar, termisk kamera og almindeligt kamera. Det konstateres at alle tre teknologier er i stand til at detektere cyklister og at de alle er i stand til at zoneinddele cykelstien og detektere både tilkørsel til kryds og ved stopstregen. Det konkluderes af den indledende undersøgelse at radaren klarer sig bedst, og derfor vælges denne teknologi til yderligere undersøgelse af cykeldetektering.

Der udføres derefter et studie med 12 lyskryds, hvor der installeres radar til detektering af cyklister. Radaren opsættes i sammenspil med eksisterende overvågningskameraer således at detektering fra radaren kan verificeres via video.

Den eksisterende detektering anvendt, i disse 12 lyskryds, er induktionspoler, der anmelder cyklister til signalet, aktiverer forlængelsestider og tæller cyklister. I artiklen fremhæves at den eksisterende teknologi ofte fejldetekterer. Dette gør den blandt andet ved manglende detektering af cyklister, eller ved falsk positive anmeldelser fra andre køretøjer (ikke-cykler), samt at karboncykler ofte ikke bliver detekteret.

Der konkluderes gode resultater ved brug af radarteknologi. I et casestudie foretaget på et af krydsene detekterer radaren 90% korrekt sammenlignet med en manuel tælling. Af artiklen konstateres, at dette indledende resultat tyder på en væsentlig mere præcis detektering end den traditionelle induktionsspole for cyklister.

Slutteligt i artiklen nævnes at indledende resultater med brug af radarteknologien er lovende, men at det kræver yderligere studier for at validere metodens præcision og anvendelse.

2.4.5 LiDAR i selvkørende biler

LiDAR er en AGD-teknologi, der anvender laser og danner 3D billeder af omgivelserne ud fra reflektionen. I trafiksektoren er LiDARs primære anvendelsesområde den selvkørende bil, hvor LiDAR anvendes til detektering af objekter i høj opløsning i 360 grader rundt om bilen [Rosique et al., 2019]. LiDAR fungerer som den selvkørende bils "øjne"[Choi et al., 2013] [Domínguez et al., 2011] og detekterer blandt andet kantstenslinje og vejafmærkning [Han et al., 2012]. Denne detektering anvendes blandt andet til fastlæggelse af køretøjets position [Hata og Wolf, 2016] [Wang et al., 2017]. Derudover kan LiDAR anvendes i sensor fusion med blandt andet radar og videokamera til klassificering og tracking af fodgængere, cyklister, biler og lastbiler [Asvadi et al., 2018] [Caltagirone et al., 2019] [Gao et al., 2018] [Lee et al., 2019].

2.4.6 Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors [Zhao et al., 2019]

I denne artikel undersøges anvendelsen af LiDAR til detektering af fodgængere og køretøjer.

Det konstateres at datainput til trafikstyrede signalanlæg og overvågning af trafikken er afhængig af korrekt detektering af trafikanter. De typisk anvendte teknologier til dette er induktionspolen, radar og video. En fælles svaghed ved disse tre teknologier er dårlige evner til realtids detektering af trajektorier for objekter, og generelt dårlige detekteringsevner af fodgængere.

I studiet udføres tre case studier for at undersøge dette, i disse undersøges detekteringsevnerne af LiDARen. Af case studierne konkluderes det at LiDARen detekterede fodgængere med 95% nøjagtigthed, køretøjer med 96% nøjagtighed og at den var i stand til at klassificere disse fra hinanden med 96% nøjagtighed. Ligeledes findes det at realtid trajektorie detekteres med 95% nøjagtighed når trajektorier sammenlignes med bevægelse på videooptagelse. I studiet anvendes en LiDAR med 16-laser sensor monteret i 183 cm højde. Det konstateres at objekt detekteringen med LiDAR kan overføres til detektering af cykler.

2.5 Sammenfatning af litteraturen

Danmark er et af de verdensførende lande til at bruge cyklen som transportmiddel. God udbygning af cykelinfrastruktur og prioritering af cyklisme i trafikken er nogle af hovedårsagerne til at der cykles så meget i Danmark. De seneste år er væksten i cykeltrafikken stagneret i Danmark og for at cykeltrafikken skal tilbage i vækst er der behov for yderligere tiltag, der kan gøre cyklisme endnu mere attraktivt. I udlandet er cykeltrafikken generelt stigende, også i de senere år, ofte som følge af implementering af tiltag inspirereret fra cykelstærke nationer så som Danmark og Holland.

Alle studier viser at der er stor sammenhæng imellem hvor meget cyklismen prioriteres, og hvor meget der cykles. Der er store fordele for byer i at have færre bilture og flere cykelture. Flere cykelture gør at der blandt andet er mindre trængsel på vejnettet, færre miljøgener i form af støj og uren luft, øget trafiksikkerhed for cyklister som følge af "safety in numbers"samt en stor samfundsøkonomisk sundhedsgevinst. Cyklister udgør desuden

en væsentlig andel af butikkers omsætningen i centrum af større byer, og er derfor også til gavn for handelslivet.

I Danmark arbejdes der med brugen af ITS til at fremme cyklisme, og her er der opnået gode resultater med at lave grønne bøgler for cyklister og implementere tiltag der mindsker risikoen for højresvingsulykker.

ITS løsninger der relaterer sig til prioritering af cyklister i signalstyringen kræver detektering af cyklister. Den mest udbredte detekteringsteknologi er induktionsspolen, men denne teknologi har en række ulemper vedrørende detektering af cyklister. Der er derfor i de senere år udført studier med brugen af AGD-teknologier til detektering af cyklister. Indledende studier af radarteknologi i Danmark og Irland viser gode detekteringsevner af cyklister samt en række andre fordele ved radardetektering. Disse fordele er blandt andet en forbedret ETA funktion og bedre mulighed for at estimere antallet af cyklister når disse bevæger sig i en samlet klump. Et andet studie viser gode resultater med LiDAR detektering af fodgængere og køretøjer, og at LiDAR detektering kan anvendes til cykeldetektering.

Detektordata bruges til prioritering af cyklister i trafikstyrede signalanlæg og er derfor en vigtig komponent for at fremme cyklisme yderligere. Derudover kan detektordata anvendes til at danne statistisk grundlag for cykeltrafikken. Ud fra dette kan udviklingen i cykeltrafikken følges og effekten af cykelfremmende tiltag kan vurderes. For at kunne gøre dette er det afgørende at der er god overensstemmelse med detekteret data og reel cykeltrafik. Der er derfor behov for yderligere studier der verificerer og validere brugen af AGD til detektering af cyklister.

Metode 3

Dette kapitel omhandler metoder brugt i denne rapport. Heri beskrives fremgangsmåden og valg taget i projektet, til undersøgelsen af LiDAR til cykeldetektering.

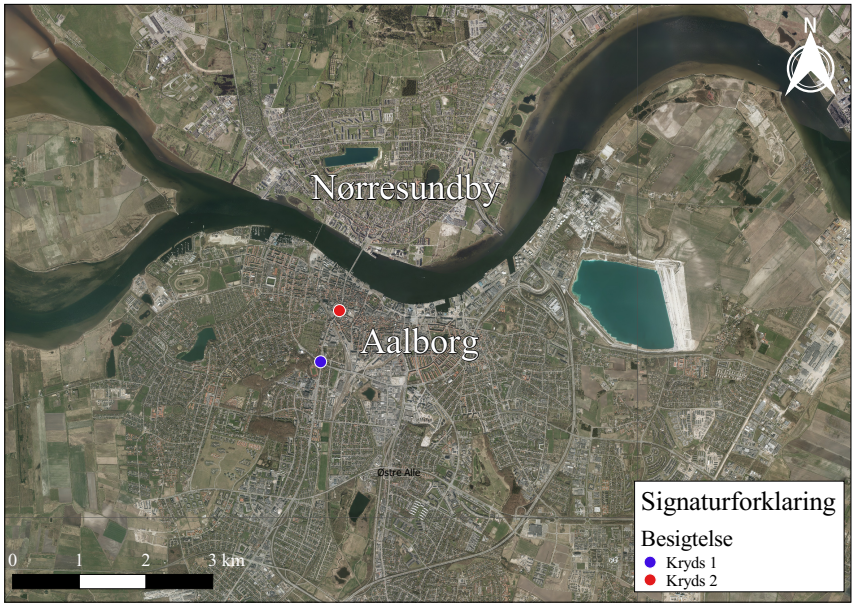
3.1 Besigtelse

Der er foretaget en bestigelse af 2 kryds i Aalborg, for at fastlægge lokation til undersøgelse af cykeldetektering med LiDAR.

Lokationer i besigtigelsen er udvalgt ud fra følgende kriterier:

- Tendens til ophobning af cyklister ventende for rødt.
- Cykeltrafik i eget trace.
- Signalreguleret kryds.
- Mulighed for opsætning af sensorer.

De to lokationer er F-kryds i mellem Hobrovej/Vesterbro og Øster Alle/Kong Christians Alle og T-kryds i mellem Vesterbro og Vingårdsgade, disse er anført som henholdsvis "Kryds 1"og "Kryds 2"på nedestående figur 3.1.



Figur 3.1. Placering af besigtiget kryds.

Besigtigelse er foretaget d. 5. februar 2020 kl 14 i tørvejr. I besigtigelsen undersøges forhold vedrørende opsætning af LiDAR til detektering af cykeltrafik.

Kryds 1 - F-kryds ved Hobrovej/Vesterbro og Østre Alle/Kong Christians Alle

Udformningen af F-kryds ses på figur 3.2. Her er undersøgt for detektering på cykelstien langs Vesterbro i sydgående retning, fremhævet på figur, da cykelintesiteten er vurderet størst her.

Figur 3.2. Udformning af F-kryds i mellem Hobrovej/Vesterbro og Østre Alle/Kong Christians Alle.

På figur 3.3 ses krydsområdet fra det sydvestlige hjørne i mod færdelsretningen og på figur 3.4 ses krydset fra det sydøstlige hjørne i diagonal retning mod cykelstien.

Figur 3.3. Krydset set fra sydvest.

Figur 3.4. Krydset set fra sydøst.

I besigtigelsen er observeret forholdsvis mange cyklister ved krydset. Dette stemmer overens med nærliggende ÅDT (årsdøgnstrafik) måling fra 2020 på 1798 cyklister/knallerter foretaget 150 meter nord for krydset [Mastra, 2020]. Cyklisterne er ofte observeret ankommende til krydset i grupper fra nærliggende lyskryds. Krydset er i mellem to primære trafikveje [Vejman, 2020], med en omløbstid i signalstyringen i intervallet 70 - 100 sekunder. Grøntiden er prioriteret for trafik på Østre Alle, og maksimal rødtid for ventende cyklister på Hobrovej er 80 sekunder.

Krydsområdet er stort, fra fortov i det sydvestlig hjørne er der 40 meter til stopstreg på cykelstien langs Vesterbro. Der er gode pladsforhold i krydsområdet med brede fortove samt god mulighed for opsætning af udstyr i en af de mange høje master i krydsområdet.

Kryds 2 - T-kryds ved Vesterbro og Vingaardsalle

Udformningen af T-kryds ved Vesterbro og Vingaardsgade ses på figur 3.5. Her er undersøgt for detektering af cyklister på cykelstien på Vesterbro i nordgående retning, fremhævet på figur, da cykelintensiteten er vurderet størst her.

Figur 3.5. Udformning af T-kryds i mellem Vesterbro og Vingaardsgade.

På figur 3.6 ses cykelstien fra det nordøstlige hjørne i mod færdelsretningen og på figur 3.7 ses krydsområdet fra det nordvestlige hjørne i diagonal retning mod cykelstien.

Figur 3.6. Cykelstien på Vesterbro set fra nordøst.

Figur 3.7. Krydsområdet set fra nordvest.

I besigtigelsen er der observeret tilsvarende mange cyklister i T-kryds i mellem Vesterbro og Vingaardgade. Dette stemmer overens med en tilsvarende ÅDT måling som ved F-krydset. Her er en ÅDT måling fra 2015 på 1724 cyklister/knallerter 200 meter nord for krydset [Mastra, 2020]. Der er ikke observeret tendens til cyklister ankommende i grupper til krydset. Krydset er i mellem en primære trafikvej, Vesterbro, og en primær lokalvej, Vingaardsgade [Vejman, 2020]. Omløbstiden i krydset er 80 sekunder, med prioritering af grøntid for trafik på Vesterbro. For ventende cyklister på Vesterbro er maksimal rødtid 34 sekunder.

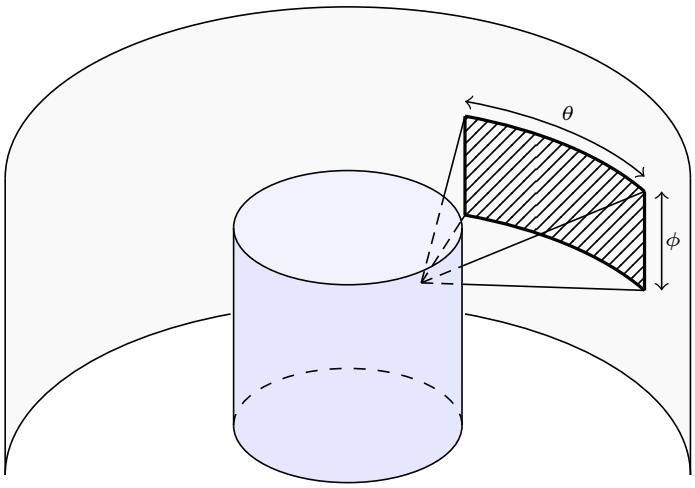
Krydset er i bynære forhold med et lille krydsområde. Fortovene er smalle og der er ikke nogle høje master der kan bruges til opsætning af udstyr.

På baggrund af besigtigelsen vælges F-krydset ved Hobrovej/Vesterbro og Østre Alle/Kong Christians Alle til videre undersøgelse af LiDAR til cykeldetektering. Dette gøres fordi at her er bedst forhold til opsætning af udstyr, og fordi der er observeret en tendens til cyklister ankommer i grupper til krydset. Ankomstfordelingen kombineret med den lange rødtid for cyklister vurderes til at give de bedste muligheder for at at undersøge problemformuleringen i projektet.

3.2 Undersøgelsesdesign

Til undersøgelsen af cykeldetektering med LiDAR er Velodyne HDL-32e LiDAR ejet af Trafikforskningsgruppen ved Aalborg Universitet anvendt. Denne fungerer ved at udsende laser fra et roterende sensorhoved og detektere omgivelserne ud fra reflektionen. For hver rotation indsamles 1 sæt datapunkter. Rotationshastigheden for sensorhovedet kan indstilles i intervallet 300 - 1200 RPM (revolutions per minute) afhængigt af ønsket opdateringshastighed af datapunkterne. Dette svarer til at indsamle data i intervallet 5 - 20 billeder per sekund [Velydone LiDAR, 2017].

HDL-32e har et horisontalt synsfelt på op til 360° og et vertikalt synsfelt på 40° i spektrummet +10° til -30°[Velydone LiDAR, 2017]. På figur 3.8 er synsfelt til Velodyne HDL-32e illustreret.



Figur 3.8. Illustrering af synsfelt for HDL-32e LiDAR.

Detekteret data er behandlet i fastlagt FOV (field of view) med henblik på objektgenkendelse og tracking af cyklister. Dette er gjort ved hjælp af punktskyanalyse og tildeling af x, y og z koordinater samt tid for hver opdatering af datapunkter.

I indenværende afsnit gennemgås fastlæggelse af formål og målsætning med undersøgelse af LiDAR til cykeldetektering og fremgangsmåde og metode for for indsamling, behandling og analyse af data.

3.2.1 Fastlæggelse af undersøgelse

I projektet er LiDAR til detektering af cyklister undersøgt med henblik på fastlæggelse af position, hastighed, ETA og antal, og med fokus på at undersøge dette når cyklister bevæger sig i grupper. Dette formål er fastlagt på baggrund af korrespondancer med fagpersoner og interessenter inden for cykeldetektering, hvor disse har givet udtryk for erfaringer med cykeldetektering og brugerønsker til forbedring.

Erfaringer fra disse er, at der ikke er én enkelt eksisterende detektor anvendt til cykeldetektering, som er i stand til at detektere cyklisters position, hastighed, ETA samt at tælle antal af cyklister, og at cykeldetekteringen er fejlbehæftet når cyklisterne bevæger sig i grupper. Dette ligger til grund for at undersøge LiDAR til detektering af antal cyklister og disses position, hastighed og ETA.

Kontakt til fagpersoner og interessenter er indledt via opslag på LinkedIn omhandlende detektering af "klumper"af cyklister. Fagpersoner og interessenter er blandt andet fra *ITS Teknik*, *SWARCO*, *Rambøll*, *Københavns Kommune* og dennes underafdeling *Sekretariatet for Supercykelstier*. Erfaringer og brugerønskerne derved både fra leverandører og brugere af detekteringsteknologier.

Erfaringerne der er givet udtryk for er, at eksisterende anvendte AGD sensorer alene kan anvendes til belægningsdetektering, men at der ikke opnås gode resultater med detektering af position, hastighed, antal og ETA. I de eksisterende kryds med cykeldetektering, er AGD teknologien anvendt som en emuleret spole, der detekterer tilstedeværelsen af en cyklist i simple detekteringsfelter og udløser en prioritering på baggrund af tilstedeværelsen.

Brugerønsker til cykeldetektering omfatter blandt andet indsamling af så meget data om cyklisterne fra sensorene som muligt, således at valg i trafikstyringen foretages på bedst mulig datagrundlag.

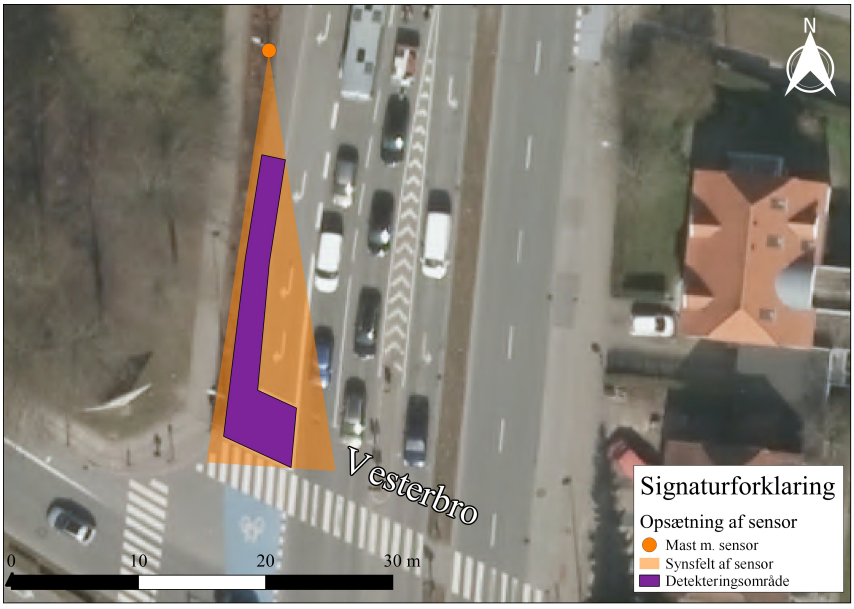
I appendiks A *Erfaring og Brugerønsker til cykeldetektering* ses opslag på LinkedIn samt uddrag af korrespondancer med fagpersoner og interessenter om erfaringer og brugerønsker til cykeldetektering.

3.2.2 Opsætning af sensor

I F-krydset i mellem Hobrovej/Vesterbro og Østre Alle/Kong Christians Alle er LiDAR-sensoren opsat i mast på Vesterbro cirka 30 meter fra cykelstiens stopstreg væk fra krydset. På figur 3.9 ses cykelstien set imod krydset fra mast.

Figur 3.9. Cykelstien set fra mast ved placering af LiDAR-sensor.

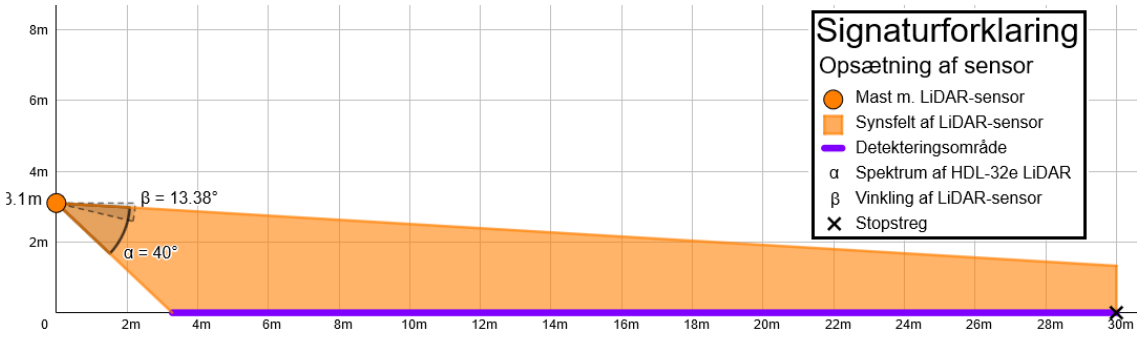
LiDAR-sensoren detekterer cyklister tilkørende krydset. På figur 3.10 ses placering af mast, detekteringsområde på cykelstien og det horisontale synsfelt af LiDARen i projektet.



Figur 3.10. Placering af mast og horisontalt synsfelt af LiDAR-sensor.

Til detektering af dette område er LiDAR monteret i 3.1 meters højde og vinklet 13°. Dette giver et vertikalt synsfelt der begynder 3 meter fra masten og slutter forbi stopstregen på cykelstien.

På figur 3.11 ses det vertikale synsfelt af LiDAR.



Figur 3.11. Vertikalt synsfelt af LiDAR-sensor.

HDL-32e er i projektet monteret ovenpå videokamera, der er reference for verificering af indsamlet data. På figur 3.12 og 3.13 ses LiDAR og videokamera monteret på mast.

Figur 3.12. LiDAR monteret på kamera set langs cykelsti.

Figur 3.13. LiDAR monteret på kamera set fra modsat side af vejen.

3.2.3 Dataindsamling

Dataindsamling er sket tirsdag d. 28 april 2020 i tidsrummet 7.57 til 16.32. LiDAR er indstillet til at rotere med 1200 RPM, svarende til indsamling af data 20 gange i sekundet.

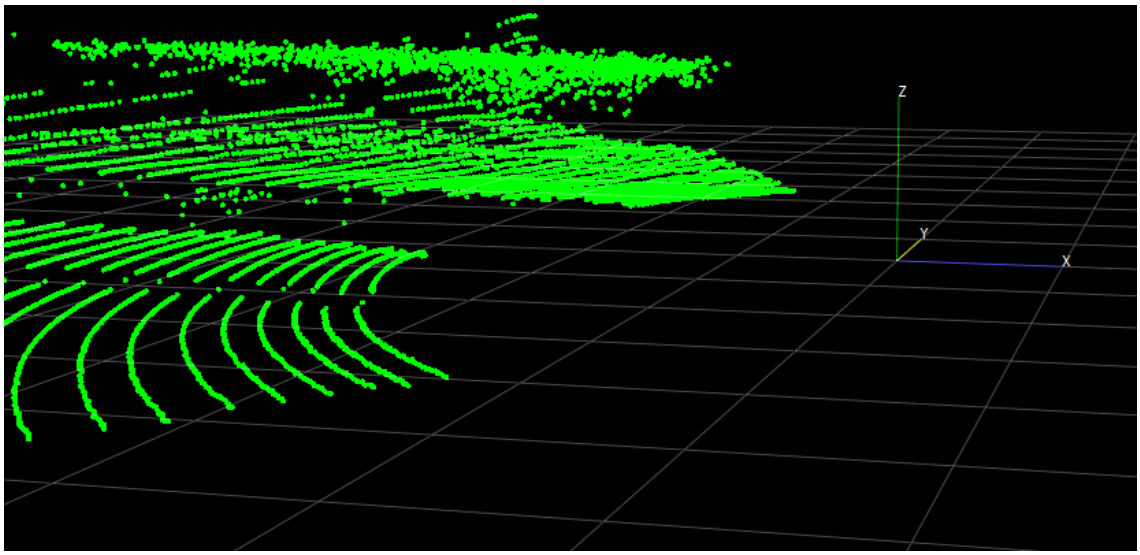
Indsamlet LiDAR-data inddeles i sekvenser af 15 minutter og sammenholdes med video i samme tidsrum.

3.2.4 Databehandling

Til databehandling af LiDAR-data er programmet Pylidartracker anvendt. Programmet er udviklet til formålet af Mihhail Samusev fra Trafikforskningsgruppen på Aalborg Universitet. Programmet er i udviklingsfasen og indeværende projekt er det første hvori det er anvendt. Projektet indgår i testfasen og udviklingen af programmets funktioner og fremgangsmåde til detektering med LiDAR.

Definering af XY-plan

I LiDAR-data er XY-plan defineret ud fra position og vinkling af sensor, altså 3.1 meter over vejoverfladen og vinket med 13°. For at få et bedre overblik, er XY-plan ændret til at være defineret af vejoverfladen. På figur 3.14 ses at XY-plan er justeret til vejoverfladen.

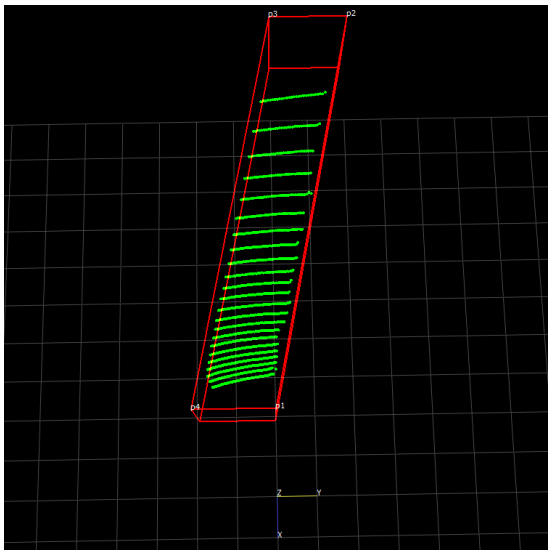


Figur 3.14. Justeret XY plan til vejoverflade.

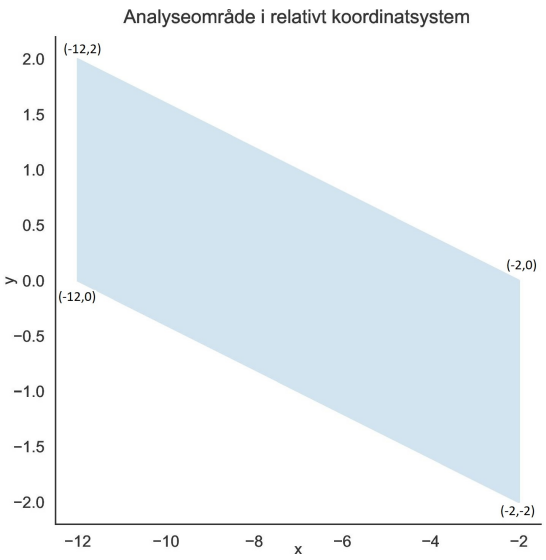
Fastlæggelse af analysesområde

Indsamlet LiDAR-data indeholder samtlige datapunkter i hele LiDARens FOV. For at præcisere relevante datapunkter for cykeldetektering udvælges mindre område på cykelstien i Pylidartracker. Udvalgt område udgør 10 meter af cykelstien tættest på sensoren, i afstanden cirka 28 - 18 meter fra stopstregen. Dette område er udvalgt som analyseområde idet opløsningen af LiDAR-dataen er højest inden for dette område.

Ved at gøre dette trackes kun objekter i det udvalgte område. Analyseområdet er defineret af fire punkter i relativt koordinatsystem og disse er: $(-2; 0)$, $(-12; 2)$, $(-12; 0)$, $(-2; -2)$. På figur 3.15 ses analyseområdet på cykelstien på Vesterbro i Pylidartracker og på figur 3.16 ses analyseområdet i koordinatsystem relativt til placering af LiDAR.



Figur 3.15. Analyseområde udklippet i Pylidartracker.

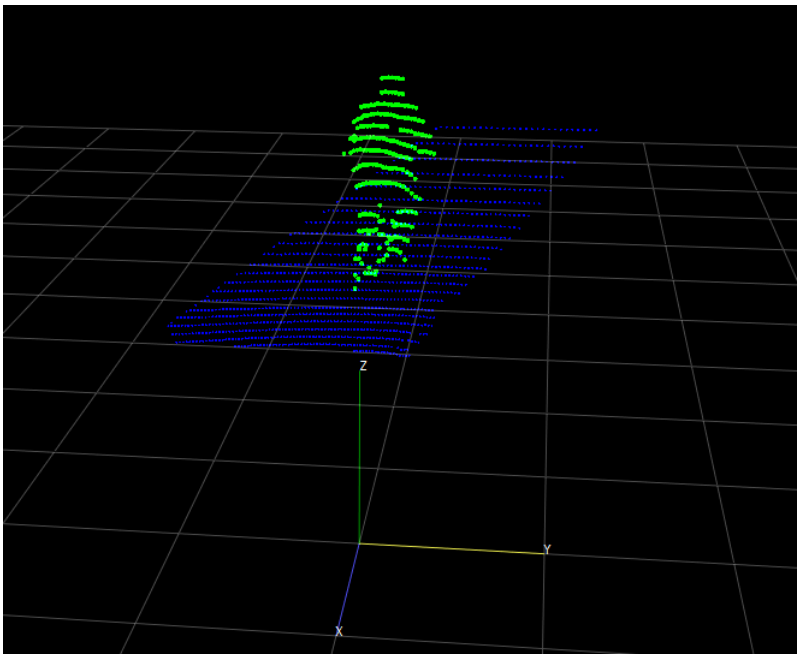


Figur 3.16. Analyseområde i koordinatsystem relativt til placering af LiDAR.

Analyseområdet begynder inden detekteringsområdet jf. figur 3.11. Dette er gjort for at indkørende cyklister bliver detekteret så hurtigt som er muligt. Analyseområdet er udgjort af to meter bred cykelsti i en udstrækning af 10 meter. Højre side af analyseområdet, vist i relativt koordinatsystem, er tættest på placering af LiDAR-sensoren. Dette vil sige at cyklister, såfremt de cykler i retning mod krydset, vil bevæge sig fra højre mod venstre i analyseområdet.

Baggrundsfiltrering

For at bedre kunne foretage korrekt objektgenkendelse af cyklisterne er datapunkterne filtreret således at stationære datapunkter er klassificeret som baggrund. Dette gøres ved at en sekvens af data (50 frames) gennemgås for bevægelse i Pylidartracker. Datapunkter der ikke ændrer sig klassificeres som baggrund. På figur 3.17 ses cykelstien med anvendt baggrundsfiltrering. Datapunkter klassificeret som baggrund er blå.

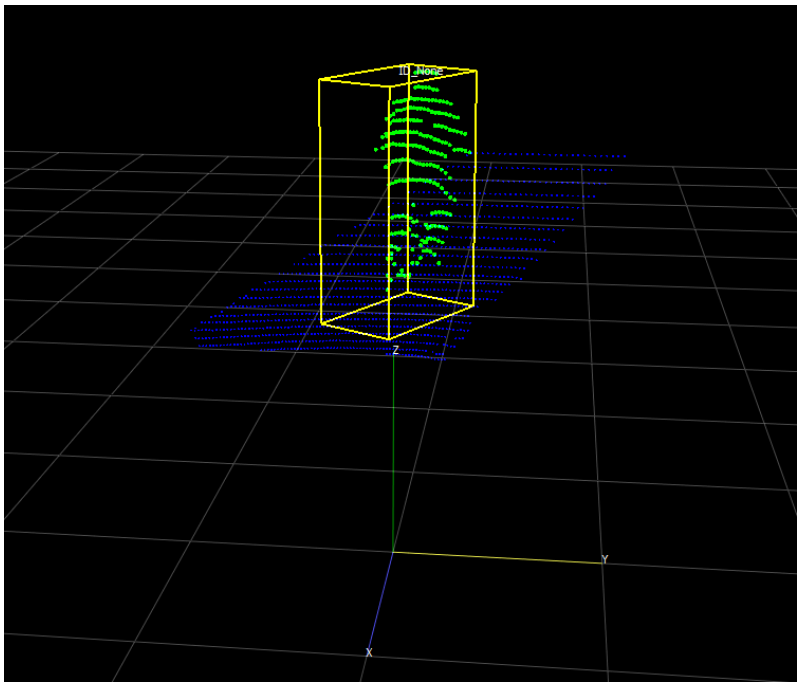


Figur 3.17. Datapunkter for cykelstien med anvendt baggrundsfiltrering i Pylidartracker.

Ved at fastlægge hvilke datapunkter der udgør baggrunden, som i dette tilfælde er vejoverfladen af cykelstien, bliver disse datapunkter filtreret fra i punktskyanalysen til objektgenkendelse.

Punktskyanalyse

Efter fastlæggelse af baggrund er punktskyanalyse foretaget til objektgenkendelse. Dette gøres ved at analysere tætheden af datapunkterne i bevægelse. Disse klassificeres som objekter hvis tætheden af datapunkter er over en fastlagt tærskelværdi. Denne værdi fastlægges iterativt på baggrund af datasættet, således at kun reelle objekter klassificeres som i bevægelse. På figur 3.18 ses objektgenkendelse af datapunkter på cykelstien i Pylidartracker.

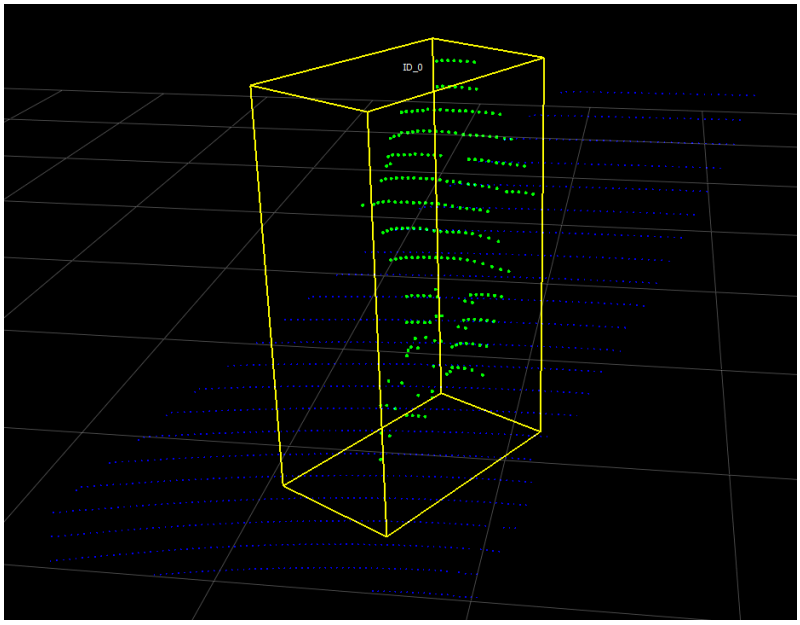


Figur 3.18. Objektgenkendelse af datapunkter i Pylidartracker.

Objektgenkendelse er illustreret i Pylidartracker med gul firkant rundt om hvert enkelt objekt.

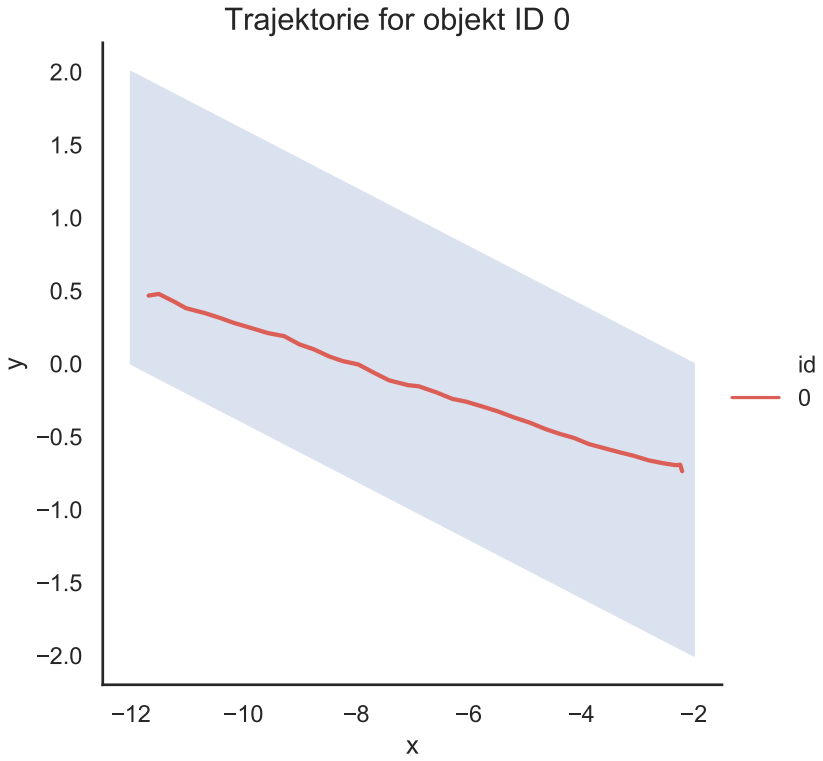
Tracking af objekter

Hvert klassificeret objekt tildeles et unikt ID. Dette gøres for at adskille objekter og detektere information om disse objekter på et individuelt niveau. På figur 3.19 ses et objekt i Pylidartracker med tildelt ID.



Figur 3.19. Tildelt ID til objekt i Pylidartracker.

For hvert klassificeret objekt afbildes trajektorie for objekter inden for analyseområdet. Afbildet trajektorie er konstrueret ud fra detekterede x og y koordinater og disses ændring over tid. Dette er gjort for at kontrollere objektbevægelse for anormalitet og for at udrede fejlklassificering af objekter. Eksempelvis ses trajektorie for et tilfældigt objekt 0 på figur 3.20.



Figur 3.20. Trajektorie for et tilfældigt objekt 0 inden for analyseområdet.

Detekterede x og y koordinater er fastlagt ud fra midtpunkt af den gule firkant der illustrerer det detekterede objekt.

3.2.5 Dataanalyse

Genereret resultat fra Pylidartracker er en tekstfil med én linje for hver frame, med tilhørende tid og eventuelt trackede objekter, som forklaret i ovenstående afsnit. For hver frame hvori der er et tracket objekt indgår dennes ID samt x og y koordinat. For hver frame er der en tilhørende tid og forskellen i mellem tid for hver frame er 0.05 sekund, svarende til 20 FPS (frames per second). På figur 3.21 ses en illustration af resultatet fra Pylidartracker for trackede objekter.


```
{"frame_number": 3361, "timestamp": 1588049460.365156, "objects": []}
{"frame_number": 3362, "timestamp": 1588049460.415134, "objects": []}
{"frame_number": 3363, "timestamp": 1588049460.465039, "objects": []}
{"frame_number": 3364, "timestamp": 1588049460.514387, "objects": []}
{"frame_number": 3365, "timestamp": 1588049460.564893, "objects": []}
{"frame_number": 3366, "timestamp": 1588049460.614091, "objects": [{"id": 6, "x": -3.2772598266601562, "y": -0.7048280835151672
{"frame_number": 3367, "timestamp": 1588049460.664702, "objects": [{"id": 6, "x": -3.3380913734436035, "y": -0.6261735558509827
{"frame_number": 3368, "timestamp": 1588049460.714648, "objects": [{"id": 6, "x": -3.188983917236328, "y": -0.6462863683700562,
{"frame_number": 3369, "timestamp": 1588049460.76368, "objects": [{"id": 6, "x": -3.213080406188965, "y": -0.6338315606117249,
```


Figur 3.21. Output fra Pylidartracker.

På ovenstående figur 3.21 er det illustreret at i frameintervallet 3361 - 3365, er der ikke tracket noget objekt i Pylidartracker og at i frame 3366 - 3369, er objekt ID 6 tracket og dettes x og y koordinat er fastlagt i hver frame.

Fastlæggelse af antal cyklister

Objekt ID er givet til hvert individuelt objekt og dermed er det totale antal trackede objekter direkte aflæseligt i resultatet fra Pylidartracker.

For at validere pålideligheden af LiDAR til estimering af antal cyklister sammenlignes antal trackede objekter med antal observerede cyklister fra video i hver tidssekvens.

Fastlæggelse af cyklisters position

Trackede objekters x og y koordinater er angivet i et koordinatsystem med placering af LiDAR som referencepunkt. Denne position er kendt, og dermed kan cyklisters position fastlægges ud fra det relative koordinatsystem. Position for hver enkelt objekt ses ved afbildning af trajektorie for enkelt objekt som illustreret på figur 3.20.

Til validering af detekterede trajektorier er trajektorier i hver tidssekvens testet med en regressionsanalyse. Dette er gjort ud fra antagelsen om at cyklister tilnærmelsesvis bevæger sig i en ret linje igennem analyseområdet, uden store ændringer i retning.

Til at teste denne antagelse anvendes regressionsanalysen ANCOVA (Analysis of Covariance) [Sterne og Kirkwood, 2003], som for hver cyklist estimerer en særskilt skæring med y-aksen. Modellen evaluerer kurveforløb og estimerer R^2 ud fra hvor godt trajektoriet passer på et retlinet kurveforløb. En høj værdi af R^2 indikerer at målepunkterne ligger tæt omkring de individuelle kurveforløb. Trajektorier med en lav R^2 indikerer at målepunkter ikke danner et godt retlinjet kurveforløb. En høj R^2 indikerer at cyklistens positioner i gennem analyseområdet passer godt på antagelsen om retlinjet bevægelse, uden store ændringer i retning og spring i detekteret position.

Hvis R^2 mindre end 0.95 i en given tidssekvens er hvert individuelt trajektorie undersøgt i tidssekvensen for fejldetektering af position. Der er sat højt krav til R^2 grundet stærk antagelse om at individuelle cyklister i analyseområdet, vil bevæge sig i en kontinuerlig ret linje, over en strækning på 10 meter.

Fastlæggelse af cyklisters hastighed

Til fastlæggelse af cyklisternes hastighed og ETA er et python script udviklet til formålet i projektet anvendt. I scriptet udregnes distancen i mellem hver frame for hvert objekt. Denne distance og tiden i mellem hver frame ligger til grund for beregning af hastighed og ETA for hver cyklist.

Distancen i meter, Δs, mellem to frames for et givent objekt findes ved følgende formel:

$$\Delta s = \sqrt{(x_{0+n} - x_0)^2 + (y_{0+n} - y_0)^2}, \tag{3.1}$$

hvor x_0 og y_0 er koordinaterne for den nuværende frame, og x_{0+n} og y_{0+n} er koordinaterne for nuværende frame + n frames.

Tilsvarende kan tiden i sekunder, Δt, mellem to frames findes ved følgende formel:

$$\Delta t = t_{0+n} - t_0, \tag{3.2}$$

hvor t_0 er tiden i nuværende frame og t_{0+n} er tiden i nuværende frame + n frames.

Ved at anvende formel (3.1) og formel (3.2) kan hastigheden i meter per sekund, v, for et givet objekt ID findes ved følgende formel:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \tag{3.3}$$

Hastigheden udregnes hvert 0.5 sekund, ved optagelseshastighed på 20 FPS er $n = 10$.

I hver tidssekvens er gennemsnitshastighed for hver cyklist beregnet indenfor analyseområdet.

Til validering af beregnede gennemsnitshastigheder er disse kontrolleret for at være indenfor et hastighedsinterval på 2 m/s (7.2 km/t) - 6.5 m/s (23.4 km/t). Dette interval er fastlagt ud fra en gennemsnitshastighed for cyklister i København målt på fri strækning på 6.02 m/s (21.6 km/t) [Buch og Greibe, 2015]. Hastighedsintervallet i projektet indeholder denne gennemsnitshastighed og accepterer hastigheder ned til 2 m/s og op til 6.5 m/s. Dette er fordi strækningen ikke er fri, men en tilkørsel til et kryds, og baseret på antagelsen om at en cyklist tilpasser sin fart afhængigt af signalbilledet. Ved tilkørsel mod rødt signalbillede vil en cyklist sænke sin fart og derfor accepteres lavere gennemsnitshastigheder. Ved tilkørsel mod et signalbillede der er ved at skifte væk fra grøn vil cyklister øge sin hastighed for at nå over.

Detekterede cyklister hvis beregnede gennemsnitshastighed er uden for intervallet 2 m/s (7.2 km/t) - 6.5 m/s (23.4 km/t) er undersøgt for om disse stemmer overens med videooptagelse. Hvis dette ikke stemmer overens er den beregnede gennemsnitshastighed for den specifikke cyklist fejldetekteret.

Gennemsnitshastigheder i hver tidssekvens er derudover beskrevet ud fra minimum og maksimumsværdi, median og gennemsnit og standardafvigelse i hver tidssekvens.

Fastlæggelse af cyklisters ETA

ETA udregnes for cyklister tilkørende krydset for hvert 0.5 sekund ud fra beregnet hastighed og afstand fra krydset ud fra positionen i given frame. Krydset er defineret af x og y koordinater i relativt koordinatsystem tilhørende midten af stopstregen. Disse er $(-29.5, -3.3)$.

Distancen i meter, Δs, i mellem position i frame tilhørende beregnet hastighed og krydset findes ved formel

$$\Delta s = \sqrt{(x_k - x_{0+n})^2 + (y_k - y_{0+n})^2}, \tag{3.4}$$

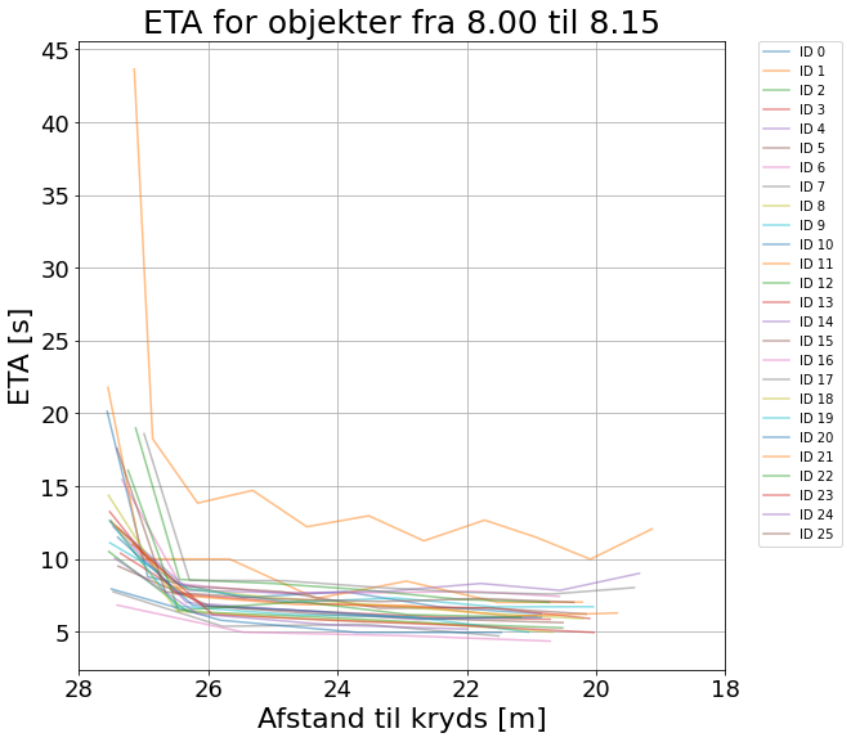
Hvor x_{0+n} og y_{0+n} er koordinaterne for frame tilhørende beregnet hastighed og x_k og y_k er koordinaterne til stopstregen ved krydset.

Ved at anvende formel (3.4) og formel (3.3) kan ETA i sekunder, for et givet objekt ID findes i en given frame ved følgende formel:

$$ETA = \frac{\Delta s}{v}. \tag{3.5}$$

Til beregning af ETA for cyklister, ekskluderes de to første meter af analyseområdet, således at ETA er beregnet i afstanden 26 til 18 meter fra krydset. Dette er gjort fordi at ETA er estimeret for højt i de første to meter af analyseområdet.

Dette kan ses af figur 3.22 hvor ETA for detekterede objekter, i afstanden 28 til 18 meter fra krydset, fra 8.00 til 8.15 er vist.



Figur 3.22. ETA for detekterede objekter i hele analyseområdet fra 8.00 til 8.15.

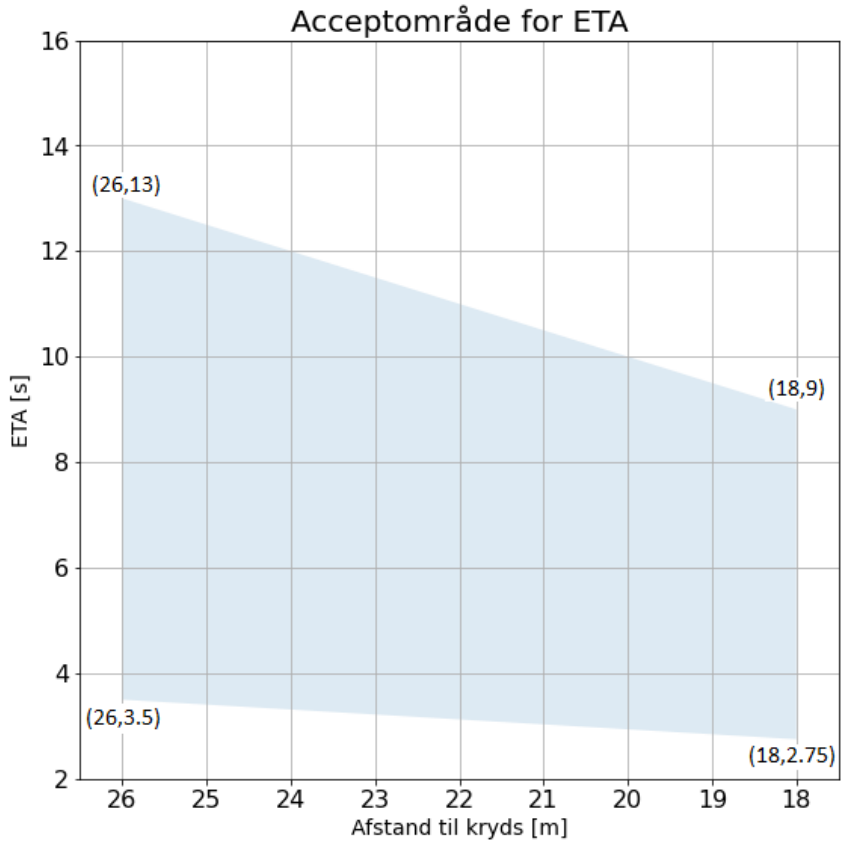
På figuren ses det at tilnærmelsesvis alle beregnede ETAer falder kraftigt i området 28 til 26 meter af krydset, svarende til at tilnærmelsesvis alle cyklister accelerer kraftigt efter at have indkørt analyseområdet. Dette er ikke retvisende og for at kunne validere kurveforløb for ETA er de første to meter af analyseområdet ekskluderet i validering af kurveforløb for ETA. Årsagen til at ETA er beregnet forkert i de første to meter af analyseområdet er analyseret i kapitel 4.3, *Analyse*.

Til validering af beregnet ETA er kurveforløb plottet for hver cyklists ETA i afstanden 26 til 18 meter fra kryds. Til kontrol af om disse er retvisende og korrekte er et acceptområde for ETA opstillet ud fra antagelsen om at cyklister bevæger sig kontinuerligt frem mod krydset, således at ETA falder når afstanden mindskes.

Afgrænsning af acceptområde er defineret af hastighedsinterval for beregnede gennemsnitshastigheder. Ved 26 meters afstand fra krydset er acceptområde for ETA i intervallet 3.5

til 13 sekunder og ved 18 meters afstand til krydset er acceptområdet i intervallet 2.75 til 9 sekunder. Dette acceptområde vil indeholde kurveforløb for ETA for alle cyklister der kontinuerligt bevæger sig mod krydset med en hastighed i intervallet 2 m/s - 6.5 m/s.

På figur 3.23 ses acceptområde for ETA illustreret med lyseblåt.



Figur 3.23. Acceptområde for beregnede ETA.

Hele eller delvise kurveforløb for ETA der falder uden for dette acceptområde er undersøgt for om disse stemmer overens med cyklistens reelle bevægelse hen i mod krydset. Hvis dette ikke stemmer overens er den beregnede ETA for cyklisten fejldetekteret.

Resultater 4

Dette kapitel omhandler resultater fra undersøgelsen af LiDAR til cykeldetektering, som beskrevet i afsnit 3.2 *Undersøgelsesdesign*. Resultater gennemgås for dataindsamling med LiDAR, databehandling i Pylidartracker og dataanalyse til fastlæggelse af antal cyklister og disses position, hastighed og ETA.

Resultater fremlægges kortfattet i nedenstående afsnit og fundne problemer er analyseret i kapitel 5 *Analyse*.

4.1 Dataindsamling

Data er indsamlet i overensstemmelse med afsnit 3.2.3 angående dataindsamling i metodeafsnit.

Der er indsamlet data d. 28 april 2020 i tidsrummet fra klokken 7.57 til 16.32. LiDAR-data er indsamlet om morgenen, klokken 7.57 til 9.11, og om eftermiddagen, klokken 14.19 til 16.32. LiDAR-data er indsamlet med 20 FPS.

Dataindsamlingen omfatter 15.2 GB LiDAR-data til databehandling og analyse.

Indsamlet LiDAR-data inddeles i 12 sekvekenser af 15 minutters varighed, i alt 3 timers data, på følgende måde:

- Sekvens 1: 8.00 - 8.15
- Sekvens 2: 8.15 - 8.30
- Sekvens 3: 8.30 - 8.45
- Sekvens 4: 8.45 - 9.00
- Sekvens 5: 14.30 - 14.45
- Sekvens 6: 14.45 - 15.00
- Sekvens 7: 15.00 - 15.15
- Sekvens 8: 15.15 - 15.30
- Sekvens 9: 15.30 - 15.45
- Sekvens 10: 15.45 - 16.00
- Sekvens 11: 16.00 - 16.15
- Sekvens 12: 16.15 - 16.30

4.2 Databehandling

Data er behandlet i overensstemmelse med afsnit 3.2.4 angående databehandling i metodeafsnit, med programmet Pylidartracker.

Analyseområdet for detektering udgør 20 m^2 cykelsti med en længdeudstrækning på 10 meter, og tracking af objekter i to meters højde fra vejoverfladen. Analseområdet strækker sig fra 28 til 18 meter fra krydset.

4.3 Datanalyse

I følgende afsnit fremlægges resultater for fastlæggelse af cyklisters antal, position, hastighed og ETA ud fra LiDAR-data.

4.3.1 Antal cyklister

Der er obsereveret 233 cyklister, ved gennemgang af video, og detekteret 234 cyklister, ved databehandling i Pylidartracker, i de 12 tidssekvenser fra 8.00 til 16.30. Dette giver en samlet præcision af detekterede cyklister i Pylidartracker på 99.5% og en overestimering af antal detekterede cyklister med 1.

På tabel 4.1 ses antallet af observerede cyklister sammenlignet med antallet af detekterede cyklister for hver tidssekvens.

Tabel 4.1. Antal observerede cyklister sammenlignet med antal detekterede cyklister.

Sekvens	**Tid**	**Observerede Cykler**	**Detekterede Cykler**	**Forskel**	**Præcision %**
1	8.00-8.15	26	26	0	100
2	8.15-8.30	11	11	0	100
3	8.30-8.45	8	8	0	100
4	8.45-9.00	10	10	0	100
5	14.30-14.45	19	19	0	100
6	14.45-15.00	24	24	0	100
7	15.00-15.15	12	12	0	100
8	15.15-15.30	25	25	0	100
9	15.30-15.45	31	31	0	100
10	15.45-16.00	19	19	0	100
11	16.00-16.15	24	24	0	100
12	16.15-16.30	24	25	+1	96
Total		233	234	+1	99.5

Ved kontrol af tidssekvensen 16.15 - 16.30 i resultatet fra Pylidartracker, er det konstateret at cyklist med ID 6 og ID 8 er den samme cyklist. Årsagen til at én cyklist er givet to ID er analyseret i kapitel 5 *Analyse*.

4.3.2 Position af cyklister

Position for hver enkelt detekteret cyklist er fastlagt ud fra resultat i Pylidartracker inden for analyseområdet. Positionen afbildes for hver cyklist i hver frame ud fra x og y koordinater. Ved afbildning af dette er hver cyklists trajektorie igennem analyseområdet på cykelstien dannet.

Position og trajektorie er fastlagt for alle detekterede objekter i Pylidartracker i afstanden 28 til 18 meter fra krydset.

I appendiks B *Trajektorier* figur B.1 til figur B.12 ses trajektorier for alle 12 tidssekvenser.

Trajektorier er valideret ud fra antagelsen om at cyklister bevæger sig i en ret linje igennem analyseområdet, uden store ændring skift i retning. Til dette er der for hver tidssekvens estimeret en R^2 der tester denne antagelse, ud fra regressionsanalysen "ANCOVA"som beskrevet i metode.

På tabel 4.2 fremgår R^2 værdier for de forskellige tidssekvenser.

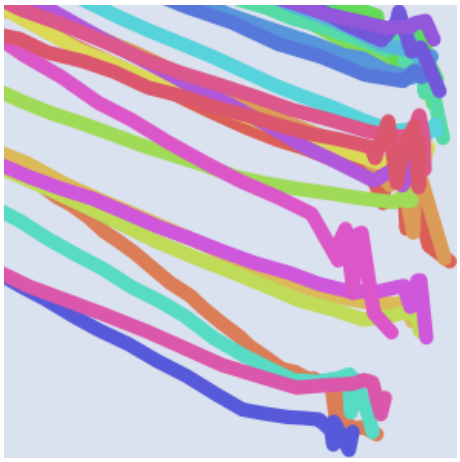
Tabel 4.2. Estimeret R^2 for trajektorier

Sekvens	**Tid**	R^2
1	8.00 - 8.15	0.9881
2	8.15 - 8.30	0.9782
3	8.30 - 8.45	0.9608
4	8.45 - 9.00	0.9881
5	14.30 - 14.45	0.9835
6	14.45 - 15.00	0.9695
7	15.00 - 15.15	0.9887
8	15.15 - 15.30	0.9796
9	15.30 - 15.45	0.9801
10	15.45 - 16.00	0.9857
11	16.00 - 16.15	0.9833
12	16.15 - 16.30	0.9634

Alle tidssekvenser har en R^2 på større end 0.95, og dermed er alle positioner og trajektorier for de 234 detekterede cyklister bedømt korrekte ud fra antagelse om at cyklister bevæger sig i en ret linje igennem analyseområdet.

I afsnit 4.3.1 er det konstateret at cyklisten med ID 6 og ID 8 i tidssekvensen 16.15 til 16.30 er den samme cyklist, i kapitel 5 analyseres betydningen for fastlæggelse af dennes position og trajektorie.

For en stor del af trajektorier set i appendiks B er der observeret en del "støj"i starten af hver detekteret trajektorie. Dette ses i højre side af analyseområdet, hvor cyklister indkører analyseområdet. På figur 4.1 illustreres dette. Her er er zoomet ind på højre side af analyseområdet cyklisters trajektorier i tidsrummet 8.00 til 8.15.



Figur 4.1. Støj i højre side af analyseområdet for cyklisters trajektorier fra 8.00 til 8.15.

Årsagen til "støj"i starten af trajektorier er analyseret i kapitel 5 *Analyse*.

4.3.3 Hastighed af cyklister

Hastighed for hver enkelt detekteret cyklist er fastlagt ud fra resultat i Pylidartracker inden for analyseområdet. Hastigheden er beregnet ud fra cyklisters ændring i position for hvert 0.5 sekund. For hver cyklist er gennemsnitshastighed beregnet inden for analyseområdet

I appendiks C *Hastigheder* på tabel C.1 til tabel C.12 ses beregnede gennemsnitshastigheder for hvert ID i de 12 tidssekvenser.

Ud af 234 detekterede cyklister er gennemsnitshastigheden for 213 af disse inden for acceptintervallet på 2 m/s (7.2 km/t) til 6.5 m/s (23.4 km/t) og 21 gennemsnitshastigheder er udenfor dette interval. Ud af disse er 20 korrekte og retvisende. 1 cyklists hastighed kan ikke beregnes. Denne cyklist er tildelt ID 6 i tidssekvensen 16.15 til 16.30.

Gennemsnitlig hastighed er fundet til at være korrekt og retvisende for 233 ud af 234 detekterede cyklister.

4.3.4 ETA af cyklister

ETA for hver enkelt detekteret cyklist er fastlagt ud fra resultat i Pylidartracker i afstanden 26 til 18 meter fra krydset. ETA er beregnet ud fra cyklisters hastighed og afstand til krydset for hvert 0.5 sekund. Placering af kryds er fastlagt af stopstregen og fastlagt som punkt $(-29.5, -3.3)$ i relativt koordinatsystem.

I appendiks D *ETA* figur D.1 til figur D.29 ses ETA for hver enkelt detekteret cyklist i hver tidssekvens i afstanden 26 til 18 meter fra krydset. Ved gennemgang af disse ses at der er en tendens til at ETA kurveforløb for cyklister med lav ETA bliver afkortet. Dette er undersøgt nærmere i kapitel 5 *Analyse*.

Ud af de 234 detekterede cyklister er 212 af disse inden for fastlagt acceptområde illustreret på figur 3.23 i metodeafsnit. Kurveforløb for de resterende 22 cyklister er undersøgt for om de stemmer overens med reelt bevægelsesmønster kontrolleret ved video. ETA kurveforløb

for 21 af disse er korrekte og retvisende og 1 cyklist er fejldetekteret. Fejldetekteret cyklist er ID 6 i tidssekvensen 16.15 til 16.30

ETA er detekteret korrekt for 233 ud af 234 cyklister i afstanden 26 til 18 meter fra krydset.

4.3.5 Sammenfatning af resultat

Antallet af cyklister og disses position, hastighed og ETA er detekteret tilfredstillende med LiDARen for 233 cyklister inden for analyseområdet. Kun i én enkelt situation fejldetekterer LiDARen, hvor én cyklist er detekteret to gange. Dette er svarer til at LiDARen, ud fra datasættet, detekterer antallet af cyklister og disses position, hastighed og ETA korrekt 99.5% af tiden inden for analyseområdet, som strækker sig i afstanden to til 12 meter fra placering af LiDAR.

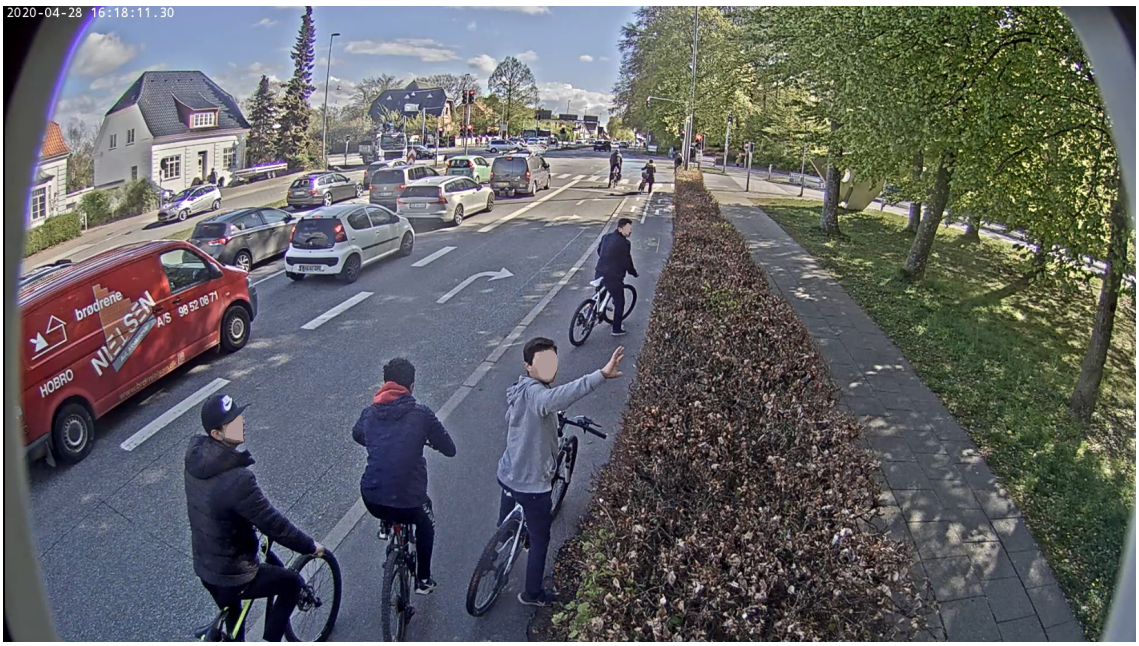
Analyse 5

I dette kapitel er fejldetektering af cyklist ID 6, i tidssekvensen 16.15 til 16.30, analyseret. Herunder betydning af dette for detektering af antal cyklister, position, hastighed og ETA. Derudover er årsagen til "støj"i trajektorier for position i starten af analyseområdet og årsagen til at ETA er fejldetekteret i de første to meter af analyseområdet analyseret.

Analyse af fejldetektering med LiDAR, og andre problemer konstateret i resultatafsnit, er gjort med henblik på at undersøge om hvorvidt indsamlet LiDAR-data kan besvare projektet problemformulering.

5.1 Analyse af fejldetektering

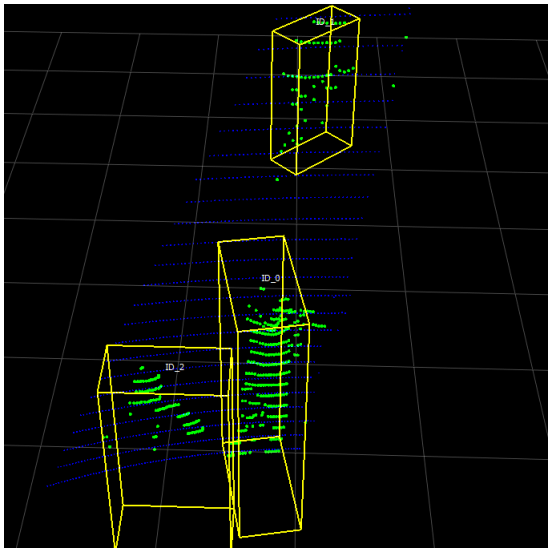
Ved analyse af resultater fra Pylidartracker, og ved gennemgang af video og LiDAR-data, for situationen hvor én cyklist er detekteret to gange er det konstateret at dette skyldes tætkørende cyklister og disses bevægelsesmønstre. Situationen, hvor én cyklist er detekteret to gange, opstår ved at en gruppe af fire tætkørende cyklister, hvoraf den ene stopper op og vinker til kameraet, kommer forbi. På figur 5.1 ses de fire cyklister umiddelbart efter at have kørt ind i LiDAR-sensorens FOV.



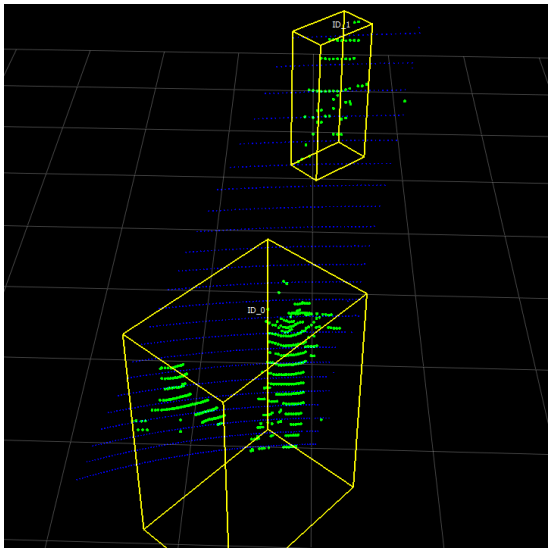
Figur 5.1. Fire tætkørende cyklister fra videooptagelse.

Situationen, med de fire tætkørende cyklister, ses i Pylidartracker på nedenstående figurer. På figur 5.2 ses disse umiddelbart efter at den tredje cyklist (cyklist med blå jakke på figur 5.1) er cyklet ind i analyseområdet og her er hver enkelt cyklist detekteret korrekt. På figur

5.3 ses situationen et par frames senere, hvor denne cyklist er kommet meget tæt på den stillestående cyklist (cyklist med grå jakke som vinker på figur 5.1) og disse to cyklister bliver fejldetekteret som ét enkelt objekt.

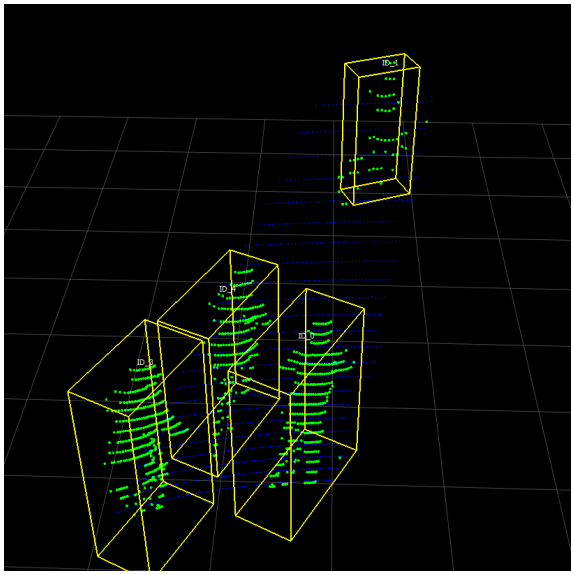


Figur 5.2. Tre tætkørende cyklister detekteret som tre objekter.



Figur 5.3. To tætkørende cyklister detekteret som ét objekt.

Et kort øjeblik efter figur 5.3 øges afstanden i mellem de to cyklister, der før var detekteret som ét objekt, og de er igen detekteret korrekt. Dette ses på figur 5.4 hvor den fjerde cyklist (cyklist med sort jakke på figur 5.1) er kommet ind i analyseområdet og de er alle detekteret enkeltvis.



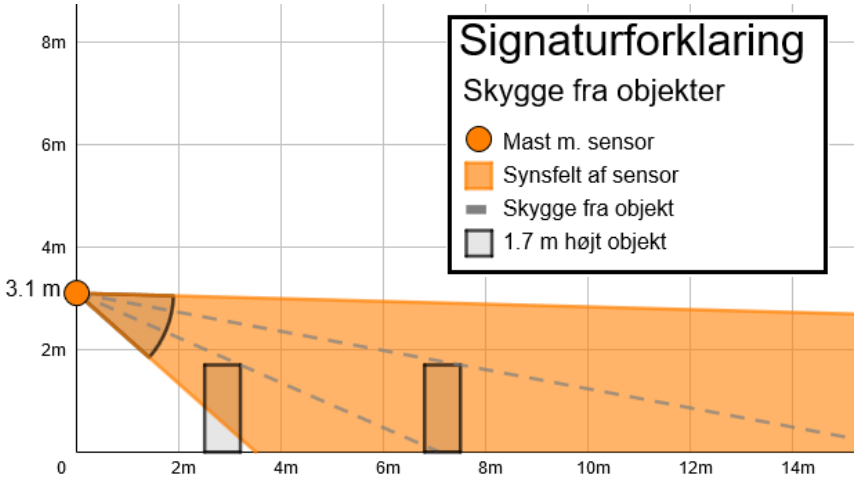
Figur 5.4. De to tætkørende cyklister er detekteret som enkeltvise objekter igen.

Cyklisterne er derefter detekteret korrekt i resten af analyseområdet.
Denne "sammensmeltning"i objektgenkendelsen, hvor cyklisten med blå jakke og cyklisten med grå jakke, er detekteret som ét objekt, er en fejldetektering.

Ved gennemgang af sekvensen i Pylidartracker konstateres, at dette skyldes tætkørende

objekter "skygger"for hinandens datapunkter i LiDARens FOV. Dette fører til at Pylidartracker ikke kan adskille hvilke datapunkter tilhører hvilken cyklist.

Størrelsen af denne "skygge"fra objekter afhænger af LiDARens monteringshøjde, vinkel og afstanden fra objektet til LiDARen. Dette ses på figur 5.5 hvor størrelsen af skyggen fra et 1.7 meter højt objekt illustreres ved forskellige afstande fra LiDARen, med monteringshøjde og vinkling anvendt i dataindsamlingen.



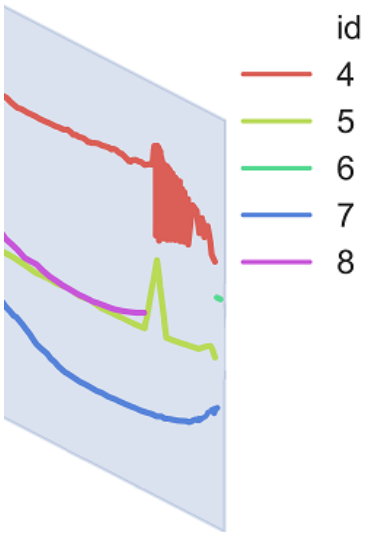
Figur 5.5. Skygge fra objekter ved LiDAR monteret i 3.1 meter.

Dermed konstateres, at fejldetekteringen af de to tætkørende cyklister skyldes at de skygger for hinandens datapunkter.

5.1.1 Effekt af fejldetektering for fastlagt position

Ved analyse af hvilken effekt det har for fastlæggelse af cyklistens position er det konstateret, at positionen for cyklisterne ikke er detekteret korrekt i de par frames hvor de to cyklister er detekteret som ét objekt, som vist på figur 5.3.

Dette ses på figur 5.6, hvor trajektorier for ID 4, 5, 6, 7 og 8 er vist, i starten af analyseområdet hvor fejldetekteringen sker.



Figur 5.6. Trajektorier for de fire tætkørende cyklister.

Trajektorie for ID 6 og 8 er den samme cyklist, og her ses det at ID 6 er detekteret i et meget kort stykke, og derefter forsvundet. Den samme cyklist er derefter detekteret som ID 8 i resten af analyseområdet. Positionen for ID 4 oplevet meget "støj"inden for det stykke hvor ID 6 er sammensmeltet med denne som vist på figur 5.3. Dette skyldes positionens x og y koordinater, som er fastlagt ud fra midtpunktet af objekt.

Effekten af dobbeltdetekteringen af én cyklist er, at positionen for de to cyklister ikke er fastlagt korrekt i de frames, hvor de ikke er detekteret enkeltvis.

5.1.2 Effekt af fejldetektering på gennemsnitshastighed og ETA

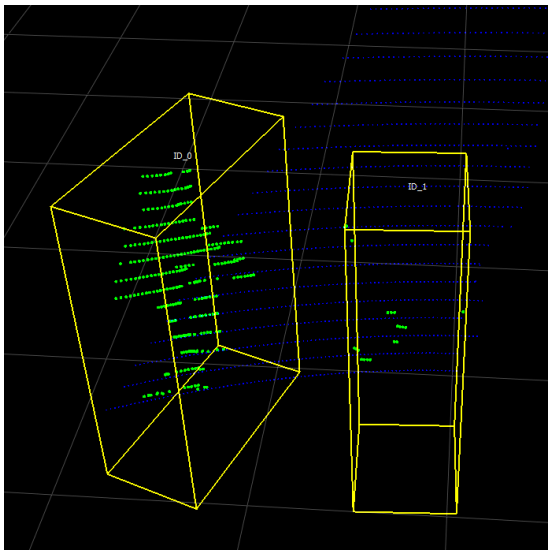
Beregnede gennemsnitshastigheder og ETA er korrekte for alle cyklister undtagen ID 6 i tidssekvensen 16.15 til 16.30, som ikke kan beregnes. Årsagen til dette er at dette ID kun er detekteret i 2 frames, svarende til 0.1 sekund, og hastighed og ETA er udregnet pr. 0.5 sekund.

Effekten er, at cyklistens hastighed og ETA først er beregnet når cyklisten er korrekt detekteret, som vist på figur 5.4.

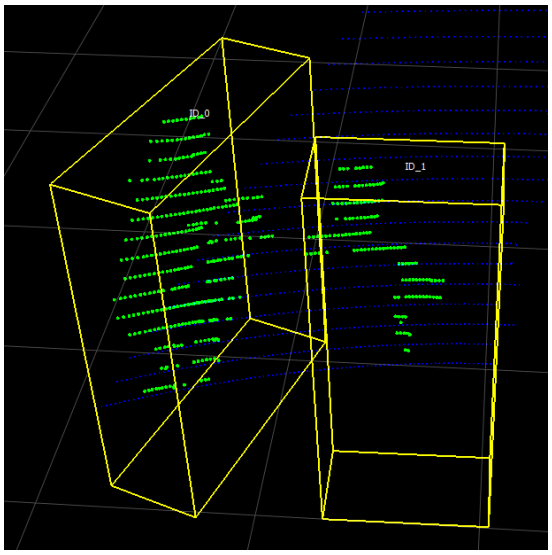
5.1.3 Analyse af støj i start af trajektorier

På alle trajektorier er der observeret støj i detekteret position, i starten af analyseområdet som vist på figur 4.1 i resultatafsnittet. Årsagen til denne støj er, at når en cyklist (cykel + person) entrerer analyseområdet bliver det forreste af cyklen detekteret først - inden hele cyklisten (kroppen og cyklen) er inde i området. Dette fører til at x og y koordinater i starten af trajektoriet er fastlagt af et massemidtpunkt der ændrer sig meget, i takt med at mere og mere af cyklisten kommer ind i analyseområdet.

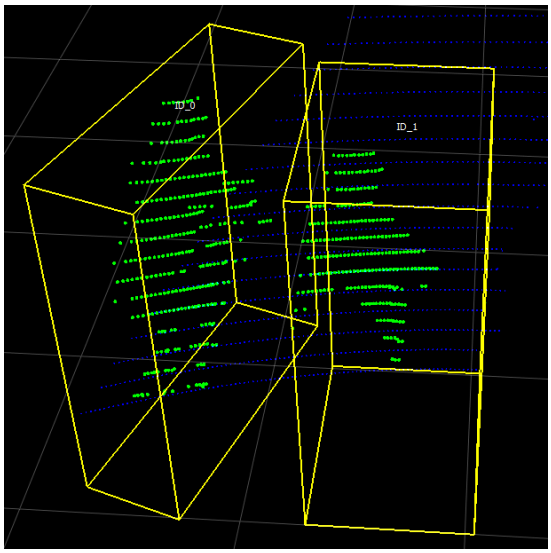
Dette er illustreret på figur 5.7, 5.8 og 5.9.



Figur 5.7. Første frame hvori cyklisten til højre er detekteret.



Figur 5.8. Anden frame hvori cyklisten til højre er detekteret.

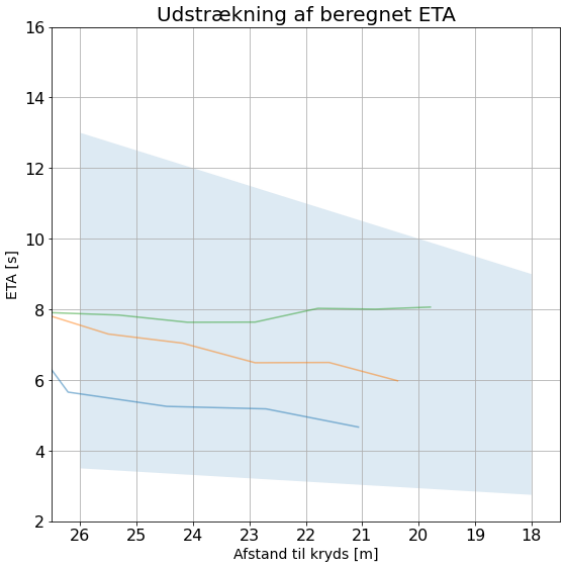


Figur 5.9. Tredje frame hvori cyklisten er detekteret.

I denne billedsekvens ses, at den gule firkant, der indikerer et genkendt objekt, ændrer sig meget for objekter der ikke er helt ud inde i analyseområdet og dette fører til støj i starten af detekteret position i analyseområdet.

5.1.4 Analyse af udstrækning af ETA kurveforløb

I kurveforløb for cyklisters ETA, er der observeret at beregnet ETA ikke er vist i hele analyseområdet. Dette ses af figur 5.10, som illustrerer tre tilfældige cyklisters ETA kurveforløb.



Figur 5.10. Udstrækning af beregnet ETA.

En lav ETA er sammenhængende med en høj hastighed, og både ETA og hastighed er beregnet i 0.5 sekunders interval. Årsagen til at kurveforløb for ETA ikke er vist i hele analyseområdet, skyldes at tilbageværende afstand i analyseområdet, er tilbagelagt på under 0.5 sekund. Området hvori ETA er beregnet er dermed mindre for hurtigtkørende cyklister.

6 Diskussion

I resultatafsnittet og analyse heraf er det konstateret, at LiDAR kan bruges til nøjagtig detektering af cyklisters antal, position, hastighed og ETA, men også at én situation med tætkørende cyklister førte til fejldetektering.

I dette kapitel er anvendelsesformål af cykeldetektering, og brugen af LiDAR hertil, diskuteret i forhold til dens evne til detektering af cyklisters antal, position, hastighed og ETA. Derudover præsenteres mulige tiltag til forbedring af cykeldetektering med LiDAR og detektering af cyklister med andre sensorer sammenholdes med LiDAR, ud fra anvendelsesformålene af cykeldetektering. Til sidst er effekten af COVID-19 for dataindsamlingen desuden kort berørt.

6.1 Anvendelsesformål af cykeldetektering

Cykeldetektering kan anvendes til mange ting, herunder trafikstyrede signalanlæg og registrering af trafikudvikling for cykler.

Disse forskellige anvendelsesformål stiller forskellige krav til cykeldetektering. herunder er de forskellige krav for ovennævnte anvendelsesområder til cykeldetektering diskuteret ud fra hvorvidt LiDAR teknologien imødekommer disse.

Anvendelse af cykeldetektering i signalanlæg

I trafikstyrede signalanlæg med traditionel cykeldetektering anvendes dette til aktivering af cykelsignaler og eventuelle forlængelsestider. For at kunne gøre dette, er det nødvendigt at detektere tilstedeværelsen af en cyklist, og i de mere sofistikerede anlæg, detektere ETA.

I undersøgelse af erfaringer og brugerønsker til cykeldetektering, vist i appendiks A, er der også en praktisk anvendelse i at kunne estimere antallet af cyklister til brug i trafikstyrende signalanlæg. Dette øger informationsniveauet således, at et trafikstyret signalanlæg ikke kun detekterer ETA, men også antallet af tilkørende cyklister. Formålet med dette er at kunne prioritere en cykelstrøm ud fra ankomstintensiteten.

I projektet er LiDAR konfigureret til indsamling af data om hver individuelle cyklist, med det formål at detektere antallet af cyklister og disses position, hastighed og ETA til kryds. LiDAR detekterer derved tilstedeværelse af cyklister på individuelt niveau, tæller antallet af cyklister og beregner ETA for hver cyklist til krydset. Derved imødekommes de stillede krav til cykeldetektering i brug i signalanlæg med LiDAR detektering anvendt i projektet.

Et problem med anvendelsen af cykeldetektering med LiDAR til brug i signalanlæg, er at området, hvori den er i stand til at detektere med høj nøjagtighed, er forholdsvis lille. I

projektet detekterer LiDAR cyklister i en afstand af 12 meter fra placering af sensor. Efter 12 meter bliver detekteringen upålidelig i takt med, at antallet af datapunkter, der udgør et objekt, bliver færre og risikoen for, at objekter nærmere sensoren "skygger"for objekter længere væk, som illustreret på figur 5.5, stiger.

Det begrænsede detekterinsområde besværliggør anvendelsen af cykeldetektering med LiDAR til trafikstyrede signalanlæg. Dette skyldes, at området for detektering af tilstedeværelse ofte ikke vil være det samme område for detektering af ETA. I trafikstyrede anlæg hvori cykelsignaler aktiveres ud fra tilstedeværelse, er dette ofte ud fra information om ventende cyklister ved stopstregen eller i en venstresvingsbane. For at detektere dette kræves placering af LiDAR indenfor 12 meter af stopstregen. En placering af LiDAR-sensor så tæt på krydset, er ikke særlig brugbar til at beregne ETA for cyklister med henblik på aktivering af eventuelle forlængelsestider. Med et detekteringsområde på 12 meter fra stopstregen vil LiDARen kun være i stand til at detektere cyklister i cirka to til tre sekunder før de ankommer til krydset. Dette er kortere end gultid efter grønt, som er fire sekunder, og derfor alt for kort tid for signalstyringen til at kunne bruge estimeret ETA til valg om forlængelsestider.

Brugen af LiDAR til cykeldetektering i et lyskryds, der både kræver detektering af tilstedeværelse og ETA, vil derfor ofte kræve flere LiDAR-sensorer konfigureret til forskellige formål.

LiDAR-teknologien kan detektere cyklister med et højt informationsniveau i et lille område. For at vurdere anvendelsen af denne til brug i signalanlæg, er det derfor vigtigt at have for øje hvilke aspekter af cykeldetekteringen, der passer på dette.

For detektering af ventende cyklister, passer LiDARens egenskaber godt på behovet til dette. Det er et lille areal hvori ventende cyklister ønskes detekteret, og det høje informationsniveau af detekteringen, og nøjagtigheden heraf, sikrer at tilstedeværelsen af ventende cyklister er pålideligt detekteret.

For detektering af cyklisters ETA er LiDAR delvist egnet. Det høje informationsniveau af LiDAR detekteringen er nødvendig, da estimering af ETA indebærer detektering af cyklistens position, udregning af hastighed ud fra ændring i position og beregning af ETA ud fra denne hastighed og afstanden til krydset. Det lille detekteringsområde passer til gengæld ikke godt til detektering af cyklisters ETA, da det ikke er muligt kontinuerligt at detektere cyklistens ETA hen i mod krydset.

LiDAR kan derfor ikke entydigt konstateres til at være den bedst egnede cykeldetektor til alle formål i trafikstyrede signalanlæg. Brugen af cykeldetektering med LiDAR er i højere grad brugbart til detektering, der kræver et højt informationsniveau, og hvor det begrænsede detekteringsområde kan accepteres.

Anvendelse af cykeldetektering til registrering af trafikudvikling for cykler

Til registrering af udviklingen af cykeltrafikken, til fx. evaluering af effekt af cykelfremmende tiltag, er det nødvendigt, at cykeldetekteringen med stor nøjagtighed kan estimere antallet af cyklister, og dermed bidrage til et solidt datagrundlag for statistisk analyse.

I projektet er LiDAR konfigureret til indsamling af data om hver individuel cyklist og antal

af cyklister detekteres ud fra dette. Derved imødekommer LiDAR detekteringen krav for registrering af trafikudvikling.

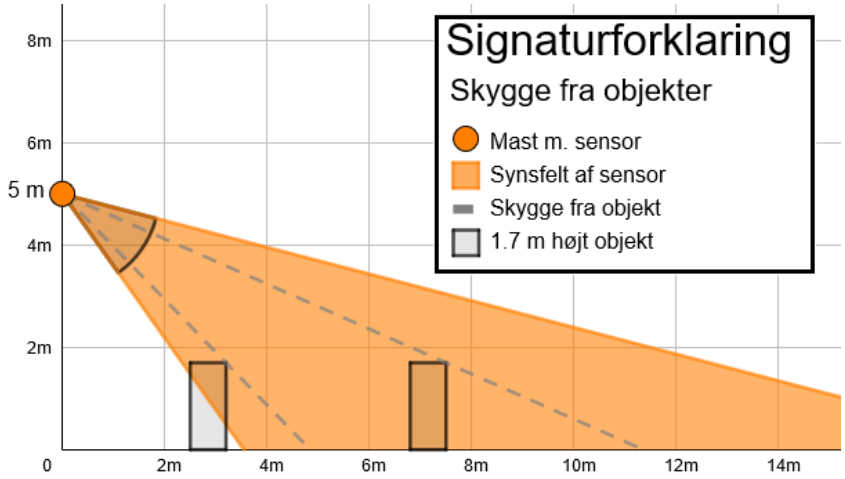
Cykelstatistikker baserer sig ofte på ÅDT-tællinger, som foretages i defineret punkt - det vil sige et mindre, velafgrænset område. Hertil er LiDAR velegnet. Dog kan meget tætkørende cyklister føre til fejldetektering, som tidligere anført. Grundet at datasættet er relativt begrænset, og kun indeholder én situation med meget tætkørende cyklister, er der ikke grundlag for at konkludere noget entydigt vedrørende LiDAR's evne til at separere tætkørende cyklister.

For at styrke detekteringen af tætkørende cyklister, er der i nedenstående afsnit 6.1.1 diskuteret to tiltag der eventuelt kan forbedre estimeringen af antallet af cyklister når disse kører tæt.

6.1.1 Tiltag til detektering af antal cyklister

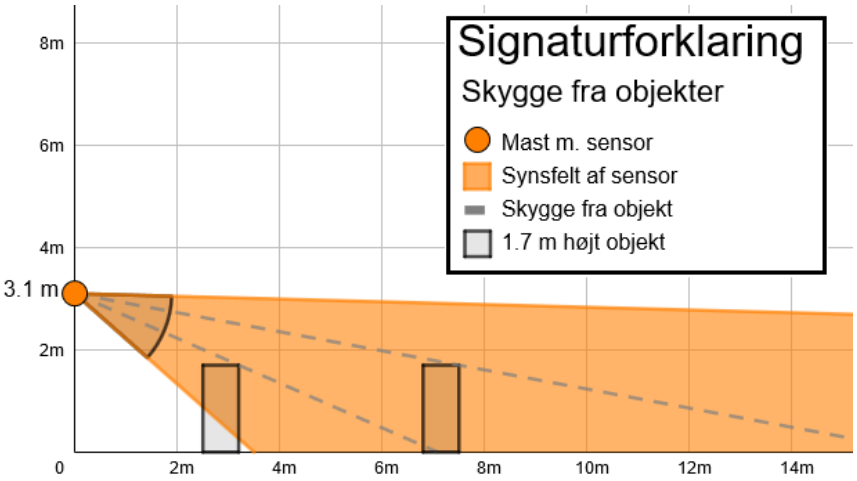
Hyppigheden af fejldetektering, som skyldes, at objekter skygger for hinanden, kan mindskes ved implementering af to forskellige tiltag.

Størrelsen af disse skygger kan mindskes ved at montere LiDAR højere. Dette er illustreret på figur 6.1 hvor LiDAR er monteret i 5 meters højde.



Figur 6.1. Skygge fra objekter ved LiDAR monteret i 5 meter.

Her ses det at "skygger"fra objekter er mindre end ved den anvendte monteringshøjde brugt i projekt som er vist på figur 6.2.



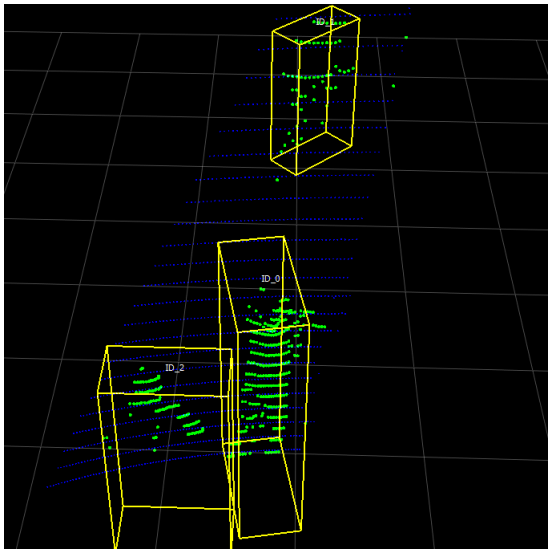
Figur 6.2. Skygge fra objekter ved LiDAR monteret i 3.1 meter.

En højere monteringshøjde vil derfor føre til at to tætkørende cyklister bedre kan adskilles og blive detekteret enkeltvis.

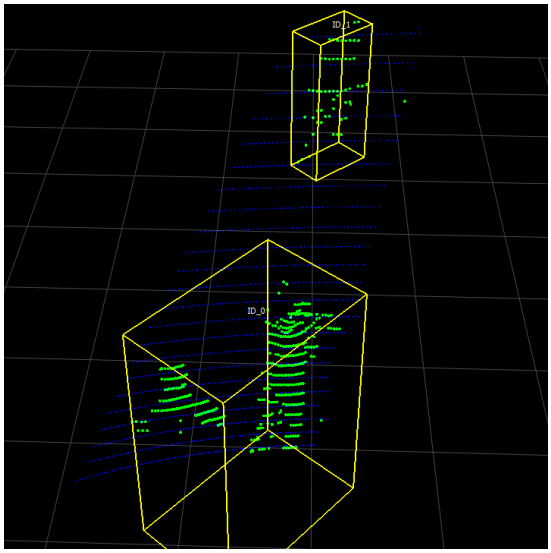
Ved at montere LiDAR højere bliver det sværere at tilgå udstyret, skulle der være behov for tilsyn/vedligehold. Til gengæld er udstyret mere ude af syne og mindre disponeret for hærværk. Omkostninger for opsætning af udstyr må også antages at stige marginalt når monteringshøjden øges, da det i højere grad kræver lift, sikkerhedsudstyr m.m.

Udover fysiske tiltag til forbedret detektering af cyklister med LiDAR, kan man også udvikle på softwaresiden, for eksempel ved at definere antallet af cyklister ud fra rumfanget af de detekterede objekter.

Denne metode er illustreret på figur 6.3 og 6.4 hvor det ses, at rumfanget af den gule firkant er øget når to tætkørende cyklister er detekteret som ét objekt.

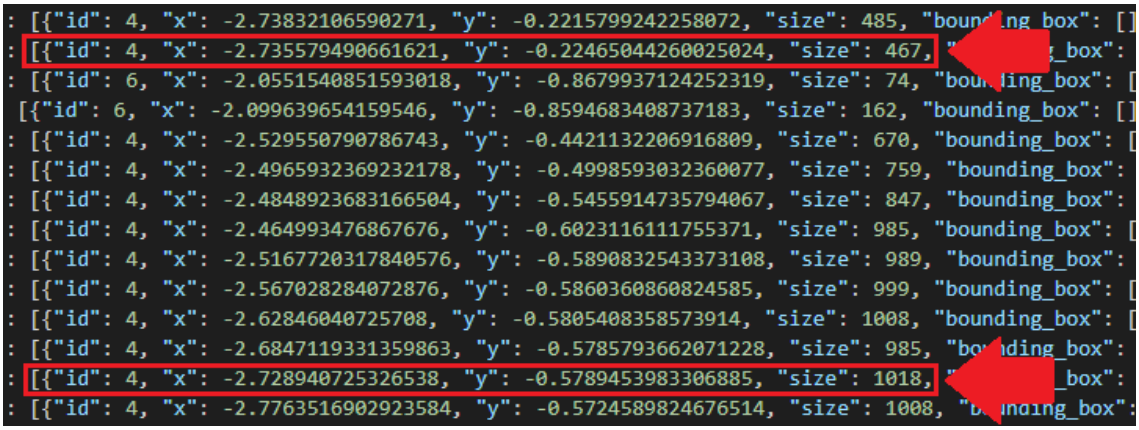


Figur 6.3. Rumfang illustreret når tætkørende objekter er detekteret enkeltvis.



Figur 6.4. Rumfang af objekt er øget når to cyklister er detekteret som ét objekt.

Denne ændring i rumfang ses i data fra Pylidartracker, som vist på figur 6.5, hvor hver linje viser, hvad der er detekteret i hver frame. Her ses det, at objekt ID 4 har et rumfang, "size", på 467. I næste frame er objekt ID 6 detekteret. Det er cyklisten nærmest LiDARen på ovenstående figur 6.3 og 6.4. Denne er detekteret i to frames, og derefter "sammensmeltet"med ID 4. Rumfang af ID 4 ses derefter gradvist øget i de næste frames, op til cirka dobbelt værdi, i takt med at hele cyklisten kommer ind i analyseområdet.



Figur 6.5. Ændring i rumfang,"size", som følge af to cyklister er detekteret som ét objekt.

Ud fra ændring i rumfang er det muligt at lave en algoritme, der tilnærmelsesvis estimerer antallet af cyklister ud fra rumfang af objekter, og dermed omgå udfordringen ved at detektere antallet af cyklister, når disse er tætkørende.

Detektering af antal cyklister med LiDAR baseret på rumfang ville være en estimering. Her vil et stort rumfang betyde flere cyklister i samme detekterede objekt. Ud fra rumfang af 1 cyklist, kan størrelsen af rumfanget for objekter med 1, 2 - 3, 4 - 5, og 5+ cyklister defineres. Dette vil gøre at antallet af detekterede cyklister ikke er helt nøjagtigt, men vil kunne bruges til acceptable estimater på størrelsen af den cyklende trafik.

Det er således heller ikke muligt at detektere position og trajektorie, hastighed og ETA for enkeltvise cyklister, når disse indgår i en tætkørende gruppe. Position, hastighed og ETA vil stadig blive detekteret, men vil være gældende for alle cyklister der befinder sig i "klumpen"af tætkørende cyklister.

Implementeringen af dette tiltag sænker informationsniveauet af detekteringen, og dermed præcisionen. Derfor er det nødvendigt af afveje dette med anvendelsen af detekteringen, og om hvorvidt estimering af antal cyklister ud fra inddelte intervaller og fælles ETA er præcist nok. Til undersøgelse af et cykelfremmende tiltag, hvor en stor effekt forventes, vil anvendelsen af dette være acceptabelt, så længe, at usikkerheden af estimering af antal cyklister ud fra rumfang, er mindre end forventet effekt. Til brug i et sofistikeret signalanlæg, hvor graden af prioritering afhænger af antallet af tilkørende cyklister og disses ETA, vil en inddeling af tætkørende cyklister i grupper, nok føre til tilnærmelsesvis samme valg i signalstyringen som ved detektering af cyklister på individuelt niveau. Hvis cykeldetekteringen derimod anvendes til undersøgelse af cyklisters bevægelse og præcise adfærdsmønster, er det nok ikke acceptabelt at sænke informationsniveauet.

Det kan ikke entydigt siges om estimering af antal cyklister ud fra rumfang af objekter

vil forbedre detekteringen med LiDAR. Det afhænger af anvendelsen af detekteringen, den nødvendige præcision heraf og usikkerheden i inddelte intervaller. For at fastlægge sidstnævnte er det nødvendigt at udføre studier med tætkørende cyklister og anvende beskrevet algoritme og ud fra dette beskrive usikkerheden ud fra diskrepans i mellem observerde cyklister og detekterede objekter.

6.2 Sammenligning med andre sensorteknologier

Eksisterende anvendte teknologier for cykeldetektering er typisk induktionsspolen og AGD teknologierne - radar, termiske- og RGB kameraer, som fastlagt i litteraturstudiet i kapitel 2.

Ud fra de definerede anvendelsesformål af cykeldetektering, har de forskellige sensorteknologier styrker og svagheder når de sammenlignes med cykeldetektering med LiDAR.

6.2.1 Detektering af ventende cyklister

Til punktdetektering af ventende cyklister ved stopstreg og for venstresvingende anvendes typisk induktionsspoler. Spolen udfordres i denne sammenhæng af det begrænsede spoleareal. For de øvrige eksisterende anvendte AGD-teknologier til detektering af ventende cyklister er der også udfordringer. For radar består udfordringen i tilfredsstillende detektering af stillestående objekter, hvilket er en svaghed for radarteknologien [Vejregelrådet, 2019]. Termiske- og RGB kameraer er derimod velegnede til stillestående trafik, og ville derfor tilfredsstillende kunne detektere ventende cyklister i de fleste tilfælde. Ligesom de øvrige detektionsprincipper, kan både det termiske- og RGB kameraet fejldetektere. For det termiske kameras vedkommende kan der på varme dage fejldetekteres, som følge af varmestrålingen fra asfalten [Vejregelrådet, 2019]. For RGB kameraets vedkommende vil tidspunkter med dårlige lysforhold, fx. ved blænding fra sol eller ved mørke, give anledning til at denne fejldetekterer [Vejregelrådet, 2019].

Ved anvendelse af LiDAR-teknologien omgås mange af disse problemer, og resultater fra studiet viser, at LiDAR er i stand til at detektere cyklister med høj nøjagtighed i et mindre område. Ud fra dette vil LiDAR-teknologien være bedre egnet til detektering af ventende cyklister end de eksisterende anvendte sensorteknologier til dette formål.

6.2.2 Detektering af cyklisters ETA

Til detektering af ETA for cyklister, i trafikstyrede signalanlæg, er radar den bedste mulighed, af de i forvejen anvendte teknologier [Devilly et al., 2019] [Jacobsen og Knudsen, 2013]. Radarteknologien kan detektere cyklister i op til 40 meters afstand [Vejregelrådet, 2019]. En radar placeret ved krydset kan derfor estimere ETA for cyklister otte sekunder før ankomst til krydset (med en hastighed på 5 m/s, svarende til 18 km/t), og kontinuerligt frem til stopstregen.

Ud fra resultater fundet i studiet, vil det begrænsede detekteringsområde, hvori LiDAR detekterer med høj nøjagtighed, gøre det nødvendigt at anvende flere LiDAR-sensorer for at detektere ETA i samme udstrækning som én enkelt radar er i stand til. Ud fra dette er den eksisterende radarteknologi bedre egnet til detektering af cyklisters ETA.

6.2.3 Detektering af udvikling i cykeltrafikken

Til detektering af udviklingen i cykeltrafikken er de eksisterende sensorteknologier generelt udfordret af cyklisters kaotiske bevægelsesmønster, som gør nøjagtig detektering af cyklisters antal, position, hastighed og ETA vanskelig [Nissen, 2016].

Ud fra resultater i studiet, er LiDAR-teknologien i stand til at nøjagtigt detektere cyklisters antal, position, hastighed og ETA. Dette gør at LiDAR-teknologien er godt egnet til detektering af udvikling i cykeltrafikken, såfremt dette detekteres i et lille område. Med LiDAR er det fx. muligt at definere et detekteringsområde på et hjørne af et kryds, og ud fra dette detektere antallet af ligeudkørende og højre- og venstresvingende cyklister. Dette kan derefter anvendes til en krydstælling af cykeltrafikken i pågældende kryds.

LiDAR-teknologien er ikke perfekt til alle formål, og det er også værd at have for øje, at nøjagtigheden af LiDAR-detekteringen falder ved hård regn [Rosique et al., 2019]. I hvor høj grad LiDAR er påvirkelig af regn, kan ikke fastlægges ud fra dataindsamling, og forfatteren kender ikke til andre studier vedrørende dette.

6.3 Effekt af COVID-19 for dataindsamlingen

Projektets dataindsamling er udført d. 28 april 2020, mens at COVID-19 restriktioner har været aktive. Disse restriktioner indebar blandt andet lukkede offentlige institutioner og private arbejdspladser og fokus på afstand i mellem personer.

Dette fører til et ændret transportmønster hvor der overordnet set har været færre cyklister og mere afstand i mellem hver cyklist. I Aalborg er cykeltrafikken i hverdagene under COVID-19 faldet med 45% sammenholdt med samme periode i 2019 [Mastra, 2020]. Derudover førte COVID-19 restriktioner til at dataindsamling kun var forbeholdt én dag.

Dette har gjort at antallet af cyklister som indgår i dataindsamlingen er mindre end det ville havde været hvis disse restriktioner ikke var på plads.

Hvis dataindsamling var foretaget under normale omstændigheder så ville der forventes flere cyklister og flere situationer med tætkørende cyklister hvori LiDAR og programmet Pylidartracker ville blive udfordret i detektering af tætkørende cyklister.

7 Konklusion

I samfundet er der et ønske om at fremme cyklisme. Et sted dette kan gøres er i trafikstyrede signalanlæg, hvor cyklister kan prioriteres i signalstyringen via detektering. Traditionelt er detektering gjort med induktionspoler i asfalten, men høje driftsomkostninger og manglende evne til korrekt detektering af cyklister i grupper, gør at detektering med AGD teknologi vinder frem. En AGD teknologi som ikke er anvendt til traditionel detektering på nuværende tidspunkt er LiDAR-teknologien. Denne udsender laser og detekterer omgivelserne ud fra reflektionen heraf. LiDAR er kendt for anvendelse í selvkørende biler, men undersøges i projektet til cykeldetektering på grund af sin evne til detektering i høj opløsning.

I projektet er anvendelsen af LiDAR til cykeldetektering undersøgt ud fra følgende problemformulering:

"Kan LiDAR anvendes til nøjagtig detektering af cyklister, når disse bevæger sig i grupper?"

Til at undersøge dette er en HDL-32e LiDAR anvendt til detektering af cyklister på cykelsti tilkørende et signalreguleret kryds. Til objektgenkendelse af cyklister fra LiDAR-data er programmet Pylidartracker, som er udviklet til projektet, anvendt.

Der er indsamlet data i tidsrummet 8.00 til 9.00 og 14.30 til 16.30 på én dag og i denne periode er der observeret 233 forbipasserende cyklister. Ved detektering med LiDAR er det fundet, at denne kun er pålidelig i 12 meters afstand fra placering af sensor, men at den inden for denne afstand detekterer cyklister med høj nøjagtighed.

For alle observerede cyklister er position, hastighed og ETA fastlagt korrekt ud fra LiDAR data, og i ét tilfælde er to tætkørende cyklister fejldetekteret, og dette fører til en overestimering af antallet af cyklister med én. Det samlede detekterede antal cyklister er derved 234, hvoraf antal cyklister og disses position, hastighed og ETA er korrekt for 233 af disse.

Heraf kan det konkluderes, at resultater fundet i projekt viser en nøjagtighed for fastlæggelse af cyklisters antal, position, hastighed og ETA med LiDAR på 99.5%. Ud fra vurdering af de anvendelsesmæssige formål af cykeldetekteringen er dette præcist nok til, at LiDAR kan anvendes til nøjagtig detektering af cyklister.

Ud fra analysen er det fundet at minimumsafstanden i mellem cyklister, for korrekt detektering med LiDAR er afhængig af monteringshøjden. Derudover er det fundet, at der er en sammenhæng imellem rumfang af detekterede objekter i Pylidartracker og antallet

af cyklister i objektet. Dette kan bruges til estimering af antallet af tætkørende cyklister, ud fra sammenhæng mellem rumfang af objekt og antal cyklister.

Projektets dataindsamling foregik under COVID-19 restriktioner, som påvirkede antallet af cyklister, optagelsesperioden på 1 dag og potentielt adfærdsmønster for afstand i mellem cyklister. Af denne årsag er datasættet for småt og uvarieret til at konkludere, at den fundne nøjagtighed er gældende for cyklister bevægende i grupper. Funden nøjagtighed er ud fra resultaterne kun gældende for enkeltvist forbipasserende cyklister, eller par af to cyklister ved siden af hinanden på cykelstien. Denne nøjagtighed kan ikke nødvendigvis ekstrapoleres til en trafikal situation med flere cyklister bevægende i grupper eller et andet undersøgelsesdesign.

For bedre at kunne konkludere nøjagtigheden af cykeldetektering med LiDAR når disse bevæger sig i grupper foreslås yderligere studier, hvor hyppigheden af tætkørende cyklister er højere. Ligeledes er der behov for yderligere studier for at undersøge effekten af forskellige monteringshøjder og præcisionen af algoritme til estimering af antal ud fra rumfang af detekterede objekter.

Perspektivering 8

I følgende kapitel perspektiveres til andre anvendelser af cykeldetektering med LiDAR, end dem der er analyseret og diskuteret i opgaven.

I projektet har der været fokus på anvendelsen af cykeldetektering, med henblik på optimering af kapacitet, i trafikstyrende signalanlæg, men et andet stort anvendelsesområde for cykeldetektering, og detektering generelt, er trafiksikkerhed.

Et emne der er meget oppe i tiden, er dynamiske mellemtider og implementering af dette. Her ønskes det, at mellemtider afhænger af sikkerhedstider fastlagt i realtid, ud fra detekterede konflikter mellem trafikstrømme. For at kunne gøre dette kræves et komplet trafikbillede af et kryds, detekteret i realtid med høj nøjagtighed. Ud fra konklusionen om LiDAR-sensorens evne til nøjagtig detektering i et lille område vil LiDARen være en god kandidat til dette formål. Begrænsninger fra LiDAR-sensorens lille detekteringsområde kan omgås ved brug af flere LiDAR-sensorer, og software til kommunikation i mellem disse.

Givet korrekt detektering, over et komplet trafikbillede, vil implementering af dynamiske mellemtider føre til øget trafiksikkerhed. Dette skyldes, at der ikke vil åbnes for grønt, for trafikstrømme i konflikt, før krydset er rømmet. Dette kunne også have en positiv effekt på kapaciteten i krydset, da dette vil medføre, at der kan laves en skarp åbning af trafikstrømme i konflikt, lige så snart at krydset er rømmet.

I 2019 skete 40% af alle uheld med personskade til følge, i kryds, og ud af alle uheld, der involverer cyklister, sker 53% af disse i kryds [Vejdirektoratet, 2020]. Derudover sker 2/3 af alle uheld i byerne [Vejdirektoratet, 2020], og en stor del af disse uheld sker i signalregulerede kryds. En øget trafiksikkerhed som følge af implementeringen af dynamiske mellemtider, ville derfor kunne sænke antallet af trafikuheld.

Ud over, at en stor del af uheldene sker i kryds, så er kapaciteten på vejnettet i byerne i høj grad defineret af kapaciteten i krydsene [Vejregelrådet, 2015]. Implementeringen af dynamiske mellemtider vil gøre, at der i alle tilfælde, hvor rømningstiden i krydset er lavere end den eksisterende statiske sikkerhedstid, vil være øget kapacitet i krydset.

Cykeldetektering kan også anvendes til at øge andre trafikanters opmærksomhed på cyklisterne. Dette er typisk noget man gør for at minimere antallet af højresvingsulykker. Disse udgjorde i 2019 15% af alle uheld med cyklister med dræbte eller tilskadekomne til følge [Vejdirektoratet, 2020].

Her vil den nøjagtige detektering med LiDAR-sensoren kunne bruges til detektering af cyklister i et lille område af cykelstien op til et kryds, og detektere om der er en cykel på vej hen i mod krydset. Ud fra dette, kan opmærksomheden på cyklisten øges ved fx.

dynamiske skilte eller lys på cykelstien. Studier viser ved brug af cykeldetektering til øget opmærksomhed på cyklister, reduceres andelen af konflikter, i mellem højresvingende biler og ligeudkørende cyklister, med 28% [Weinreich og Vestergaard, 2019].

Effekten af god og nøjagtig detektering, er dermed ikke kun begrænset til optimering i ét enkelt kryds. God og nøjagtig detektering har en effekt på hele trafikafviklingen på vejnettet i byen.

De anvendelsmæssige formål af cykeldetektering, og brugen af LiDAR til dette, som i denne rapport er analyseret, diskuteret og perspektiveret, udgør på ingen måde et komplet billede af hvad cykeldetektering og LiDAR kan anvendes til. Teknologien er i konstant udvikling, og trafikdetektering, herunder cyklistdetektering, vil med tiden blive endnu mere nøjagtig, og anvendelsesmulighederne vil øges i takt med dette.

Litteratur

Aalborg Kommune, **2018**. Aalborg Kommune. *Trafikudviklingen i Aalborg Kommune*. `https://www.aalborg.dk/trafik-og-transport/trafik/trafik-og-uheld/trafik`, 2018. set: 13-02-2020.

Aarhus Kommune, **2017**. Aarhus Kommune. *Aarhus Cykelby - Cykelregnskab 2017*. `https://www.aarhus.dk/media/11130/aak-cykelregnskab-2017_final.pdf`, 2017. set: 10-02-2020.

Asvadi et al., **2018**. Alireza Asvadi, Luis Garrote, Cristiano Premebida, Paulo Peixoto og Urbano J. Nunes. *Multimodal vehicle detection: fusing 3D-LIDAR and color camera data*. Pattern Recognition Letters, 115, 20 – 29, 2018. ISSN 0167-8655. doi: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.09.038. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865517303598`. Multimodal Fusion for Pattern Recognition.

Thomas S Buch og Poul Greibe, *2015*. Thomas S Buch og Poul Greibe. Analysis of bicycle traffic on one-way bicycle tracks of different width. In *European Transport Conference 2015*. Association for European Transport (AET) Frankfurt, Germany, 2015.

Caltagirone et al., **2019**. Luca Caltagirone, Mauro Bellone, Lennart Svensson og Mattias Wahde. *LIDAR–camera fusion for road detection using fully convolutional neural networks*. Robotics and Autonomous Systems, 111, 125 – 131, 2019. ISSN 0921-8890. doi: https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.11.002. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889018300496`.

Celis og Nielsen, **Juni/Juli 2016**. Pablo Celis og Malene Kofod Nielsen. *Cyklister er guld værd for byerne*. Trafik Veje, 2016. set: 25-02-2020.

Cervero et al., **2019**. Robert Cervero, Steve Denman og Ying Jin. *Network design, built and natural environments, and bicycle commuting: Evidence from British cities and towns*. Transport Policy, 74, 153 – 164, 2019. ISSN 0967-070X. doi: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.09.007. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X1830101X`.

J. Choi, S. Ulbrich, B. Lichte og M. Maurer, *Oct 2013*. J. Choi, S. Ulbrich, B. Lichte og M. Maurer. Multi-Target Tracking using a 3D-Lidar sensor for autonomous vehicles. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pages 881–886, Oct 2013. doi: 10.1109/ITSC.2013.6728343.

Oisín Devilly, Karen Hosie, Petra Cooling og Christopher K. Manzira, *2019*. Oisín Devilly, Karen Hosie, Petra Cooling og Christopher K. Manzira. Cycle Safe Intersections - An Evaluation of Radar Bicycle Detectors in Dublin. In *Proceedings*

from the European Transport Conference in Dublin 2019, European Transport Conference. Intelligent Transport Systems - Dublin City Council, 2019.

DI Transport, **Maj 2018**. DI Transport. *Effekter af cykling*. https://www.danskindustri.dk/brancher/di-transport/analysearkiv/ovrige-analyser/2018/6/effekter-af-cykling/, 2018. set: 26-02-2020.

R. Domínguez, E. Onieva, J. Alonso, J. Villagra og C. González, *Nov 2011*. R. Domínguez, E. Onieva, J. Alonso, J. Villagra og C. González. LIDAR based perception solution for autonomous vehicles. In *2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, pages 790–795, Nov 2011. doi: 10.1109/ISDA.2011.6121753.

DTU Transport, **Maj 2018**. DTU Transport. *Faktaark om cykeltrafik i Danmark 2017*. https://www.cta.man.dtu.dk/-/media/Centre/Modelcenter/2017-Faktaark_cykeltrafik_180523.ashx?la=da&hash=769FDAE064CFB4400189737D0B2728E2EF954FDC, 2018. set: 07-02-2020.

DTU Transport, **2019**. DTU Transport. *Transportvaner for Odense 2019*. https://www.cyklisternesby.dk/generelt/planlaegning/status-paa-cykeltrafik, 2019. set: 10-02-2020.

European Commission, **Februar 2020**. European Commission. *Promoting cycling: changes to expect*. https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/pedestrians/promote_cycling_and_bicycle_helmets_or_not/promoting_cycling_changes_to_expect_en, 2020. set: 26-02-2020.

Feldhan, **Oktober 2017**. Jim Feldhan. *President of Semico Research*. https://semiengineering.com/radar-versus-lidar/, 2017. set: 06-03-2020.

Gao et al., **Sep. 2018**. H. Gao, B. Cheng, J. Wang, K. Li, J. Zhao og D. Li. *Object Classification Using CNN-Based Fusion of Vision and LIDAR in Autonomous Vehicle Environment*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(9), 4224–4231, 2018. ISSN 1941-0050. doi: 10.1109/TII.2018.2822828.

Han et al., **March 2012**. J. Han, D. Kim, M. Lee og M. Sunwoo. *Enhanced Road Boundary and Obstacle Detection Using a Downward-Looking LIDAR Sensor*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(3), 971–985, 2012. ISSN 1939-9359. doi: 10.1109/TVT.2012.2182785.

Hata og Wolf, **Feb 2016**. A. Y. Hata og D. F. Wolf. *Feature Detection for Vehicle Localization in Urban Environments Using a Multilayer LIDAR*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(2), 420–429, 2016. ISSN 1558-0016. doi: 10.1109/TITS.2015.2477817.

Jacobsen og Knudsen, **September 2013**. Lars H. Jacobsen og Knud D. Knudsen. *Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister*. Trafik Veje, 2013. set: 14-02-2020.

Jacobsen, **2015**. P L Jacobsen. *Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling*. Injury Prevention, 21(4), 271–275, 2015. ISSN 1353-8047. doi: 10.1136/ip.9.3.205rep. URL https://injuryprevention.bmj.com/content/21/4/271.

Kalburge, **Oktober 2017**. Amol Kalburge. *Senior Director of strategic marketing at TowerJazz*. https://semiengineering.com/radar-versus-lidar/, 2017. set: 06-03-2020.

Københavns Kommune, **2019**. Københavns Kommune. *Cykelredegørelse 2019*. https://www.kk.dk/sites/default/files/edoc/Attachments/23020624-32266360-1.pdf, 2019. set: 07-02-2020.

Lapedus, **Oktober 2017**. Mark Lapedus. *Radar Versus LiDAR*. 2017. set: 05-03-2020.

Lee et al., **2019**. Hojoon Lee, Heungseok Chae og Kyongsu Yi. *A Geometric Model based 2D LiDAR/Radar Sensor Fusion for Tracking Surrounding Vehicles*. IFAC-PapersOnLine, 52(8), 130 – 135, 2019. ISSN 2405-8963. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.060. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303908. 10th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles IAV 2019.

Marshall og Garrick, **2010**. Wesley E. Marshall og Norman W. Garrick. *Effect of Street Network Design on Walking and Biking*. Transportation Research Record, 2198 (1), 103–115, 2010. doi: 10.3141/2198-12. URL https://doi.org/10.3141/2198-12.

Mastra, **2020**. Mastra. *Nøgletal*. https://mastra.vd.dk/mastra/nytui/kort/UniKort.html?v=99#, 2020. set: 22-05-2020.

Nielsen et al., **2015**. Thomas Alexander Sick Nielsen, Linda Christensen, Sonja Haustein og Till Koglin. *Danmark er cykelland nummer 2 i Europa*. Cykelviden, (Marts), 2015.

Nissen, **Maj 2016**. Benny Nissen. *Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister*. Trafik Veje, 2016. set: 17-02-2020.

Pucher og Buehler, **2008**. John Pucher og Ralph Buehler. *Making Cycling Irresistible: Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany*. Transport Reviews, 28(4), 495–528, 2008. doi: 10.1080/01441640701806612. URL https://doi.org/10.1080/01441640701806612.

Quee og Bijlsma, **2018**. Jeroen Quee og Haye Bijlsma. *Urban mobility on a human scale - Promoting and Facilitating active travel in cities*. 2018. set: 13-02-2020.

Rosique et al., **2019**. Francisca Rosique, Pedro J. Navarro, Carlos Fernández og Antonio Padilla. *A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research*. Sensors, 19(3), 2019. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s19030648. URL https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/648.

Seerup og Westhausen, **Januar 2017**. Bent Seerup og Bo Westhausen. *Nye avancerede sensorer til trafikstyring i trafiksignalanlæg*. Trafik Veje, 2017. set: 04-03-2020.

Sterne og Kirkwood, **2003**. Jonathan A. C. Sterne og Betty R. Kirkwood. *Essential Medical Statistics*. Blackwell Science Ltd, second edition, 2003.

Transportministeriet, **Juli 2014**. Transportministeriet. *Danmark - Op på cyklen!* https://www.trm.dk/publikationer/2014/den-nationale-cykelstrategi-danmark-op-paa-cyklen/, 2014. ISBN: 978-87-91511-90-5 set: 27-05-2019.

Vejdirektoratet, **November 2019**. Vejdirektoratet. *Cykeltrafikken i Danmark*. https://www.vejdirektoratet.dk/tema/cykler-pa-vejene, 2019. set: 07-02-2020.

Vejdirektoratet, **Juni 2020**. Vejdirektoratet. *Trafikulykker for året 2019*. https://www.vejdirektoratet.dk/api/drupal/sites/default/files/2020-06/Trafikulykker%202019.pdf, 2020. set: 03-06-2020.

Vejdirektoratet, **2017**. Vejdirektoratet. *Hvorfor stiller vi cyklen?* https://www.vejdirektoratet.dk/api/drupal/sites/default/files/publications/hvorfor_stiller_vi_cyklen.pdf, 2017. set: 27-02-2020.

Vejdirektoratet, **Februar 2018**. Trafikstatistikafdeling Vejdirektoratet. *Nøgletal om Vejtransport*. http://api.vejdirektoratet-stage.ffwdev.com/sites/default/files/2019-03/Statistikkatalog_0.xlsx, 2018. set: 27-02-2020.

Vejman, **2020**. Vejman. *Kvikinformation*. http://www.vejman.dk/da/Sider/default.aspx, 2020. set: 04-02-2019.

Vejregelrådet, **2019**. Vejregelrådet. *Styring af trafiksignalanlæg ved brug af Above Ground Detection (AGD)*, 2019.

Vejregelrådet, **2015**. Vejregelrådet. *Håndbog i Trafikplanlægning i byer*, 2015.

Velydone LiDAR, **April 2017**. Velydone LiDAR. *HDL32-E User Manual*, 2017. URL https://velodynelidar.com/products/hdl-32e/.

Vestergaard og Bunton, **Maj 2019**. Maja Sig Vestergaard og Trine Bunton. *Hvordan man planlægger for cykelfremme*. Cycling Embassy of Denmark, 2019. set: 27-02-2020.

Vestergaard et al., **Januar 2018**. Maria Quvang Harck Vestergaard, Ditte Bendix Lanng og Søren Risdal Borg. *Førerløse busser skal mobilisere Aalborg Øst*. Trafik Veje, 2018. set: 05-03-2020.

Wang et al., **2017**. Liang Wang, Yihuan Zhang og Jun Wang. *Map-Based Localization Method for Autonomous Vehicles Using 3D-LIDAR **This work is supported in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61473209.* IFAC-PapersOnLine, 50(1), 276 – 281, 2017. ISSN 2405-8963. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.046. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317300630. 20th IFAC World Congress.

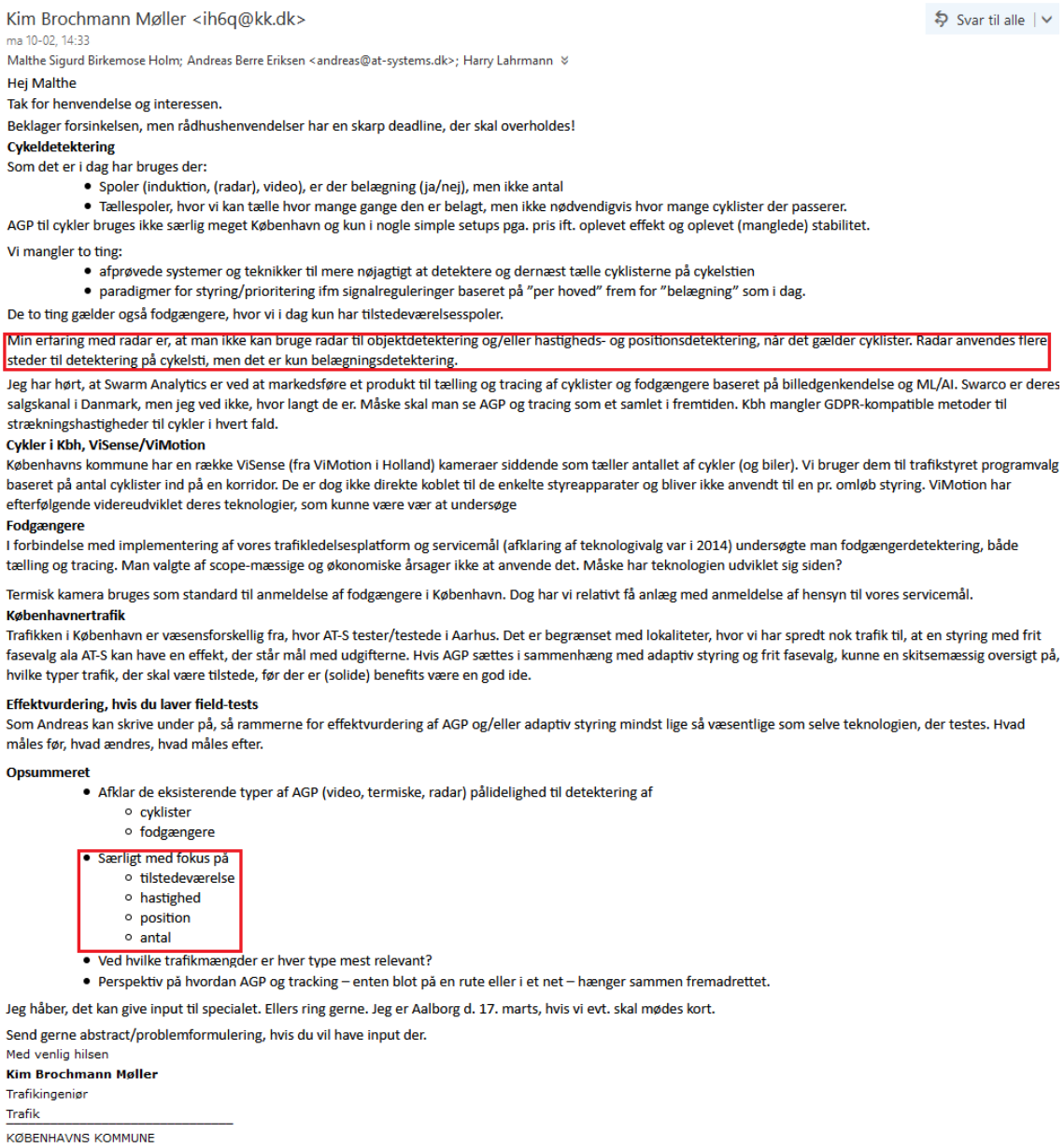
Weinreich og Vestergaard, **August 2019**. Marianne Weinreich og Maja Sig Vestergaard. *ITS solutions for cyclists*. Cycling Embassy of Denmark, 2019. set: 17-02-2020.

Zhao et al., **2019**. Junxuan Zhao, Hao Xu, Hongchao Liu, Jianqing Wu, Yichen Zheng og Dayong Wu. *Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 100, 68 – 87, 2019. ISSN 0968-090X. doi: https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.007. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X19300282`.

Appendiks

Erfaringer og brugerønsker til cykeldetektering A

Viden indsamles via netværk af fagpersoner og interessenter i trafiksektoren. Indledningsvis er ideen om undersøgelse af AGD til cykeldetektering fra Kim Brochmann Møller, som er trafikingeniør i Københavns Kommune. Korrespondance med Kim ses på figur A.1 og A.2.



Kim Brochmann Møller <ih6q@kk.dk>
ma 10-02, 14:33
Malthe Sigurd Birkemose Holm; Andreas Berre Eriksen <andreas@at-systems.dk>; Harry Lahrmann

Svar til alle

Hej Malthe
Tak for henvendelse og interessen.
Beklager forsinkelsen, men rådhushenvendelser har en skarp deadline, der skal overholdes!

Cykeldetektering
Som det er i dag har bruges der:

- Spoler (induktion, (radar), video), er der belægning (ja/nej), men ikke antal
- Tællespoler, hvor vi kan tælle hvor mange gange den er belagt, men ikke nødvendigvis hvor mange cyklister der passerer.

AGP til cykler bruges ikke særlig meget København og kun i nogle simple setups pga. pris ift. oplevet effekt og oplevet (manglede) stabilitet.

Vi mangler to ting:

- afprøvede systemer og teknikker til mere nøjagtigt at detektere og dernæst tælle cyklisterne på cykelstien
- paradigmer for styring/prioritering ifm signalreguleringer baseret på "per hoved" frem for "belægning" som i dag.

De to ting gælder også fodgængere, hvor vi i dag kun har tilstedeværelsesspoler.

Min erfaring med radar er, at man ikke kan bruge radar til objektdetektering og/eller hastigheds- og positionsdetektering, når det gælder cyklister. Radar anvendes flere steder til detektering på cykelsti, men det er kun belægningsdetektering.

Jeg har hørt, at Swarm Analytics er ved at markedsføre et produkt til tælling og tracing af cyklister og fodgængere baseret på billedgenkendelse og ML/AI. Swarco er deres salgskanal i Danmark, men jeg ved ikke, hvor langt de er. Måske skal man se AGP og tracing som et samlet i fremtiden. Kbh mangler GDPR-kompatible metoder til strækningshastigheder til cykler i hvert fald.

Cykler i Kbh, ViSense/ViMotion
Københavns kommune har en række ViSense (fra ViMotion i Holland) kameraer siddende som tæller antallet af cykler (og biler). Vi bruger dem til trafikstyret programvalg baseret på antal cyklister ind på en korridor. De er dog ikke direkte koblet til de enkelte styreapparater og bliver ikke anvendt til en pr. omløb styring. ViMotion har efterfølgende videreudviklet deres teknologier, som kunne være vær at undersøge

Fodgængere
I forbindelse med implementering af vores trafikledelsesplatform og servicemål (afklaring af teknologivalg var i 2014) undersøgte man fodgængerdetektering, både tælling og tracing. Man valgte af scope-mæssige og økonomiske årsager ikke at anvende det. Måske har teknologien udviklet sig siden?

Termisk kamera bruges som standard til anmeldelse af fodgængere i København. Dog har vi relativt få anlæg med anmeldelse af hensyn til vores servicemål.

Københavnertrafik
Trafikken i København er væsensforskellig fra, hvor AT-S tester/testede i Aarhus. Det er begrænset med lokaliteter, hvor vi har spredt nok trafik til, at en styring med frit fasevalg ala AT-S kan have en effekt, der står mål med udgifterne. Hvis AGP sættes i sammenhæng med adaptiv styring og frit fasevalg, kunne en skitsemæssig oversigt på, hvilke typer trafik, der skal være tilstede, før der er (solide) benefits være en god ide.

Effektvurdering, hvis du laver field-tests
Som Andreas kan skrive under på, så rammerne for effektvurdering af AGP og/eller adaptiv styring mindst lige så væsentlige som selve teknologien, der testes. Hvad måles før, hvad ændres, hvad måles efter.

Opsummeret

- Afklar de eksisterende typer af AGP (video, termiske, radar) pålidelighed til detektering af
  - cyklister
  - fodgængere
- Særligt med fokus på
  - tilstedeværelse
  - hastighed
  - position
  - antal
- Ved hvilke trafikmængder er hver type mest relevant?
- Perspektiv på hvordan AGP og tracking – enten blot på en rute eller i et net – hænger sammen fremadrettet.

Jeg håber, det kan give input til specialet. Ellers ring gerne. Jeg er Aalborg d. 17. marts, hvis vi evt. skal mødes kort.

Send gerne abstract/problemformulering, hvis du vil have input der.
Med venlig hilsen
Kim Brochmann Møller
Trafikingeniør
Trafik
KØBENHAVNS KOMMUNE

Figur A.1. Korrespondance med Kim angående anvendelsen af AGD til cykeldetektering.

Her fremhæves det at hans erfaringer er at radar ikke kan bruges til objektdetektering,

hastighed- og positionsdetektering og at der er fokus på pålidelig detektering af tilstedeværelse, hastighed, position med AGD.

Yderligere udtrykkes en interesse fra Kim og Københavns Kommune for undersøgelse af dette med LiDAR, som det frehæves på figur A.2.

Kim Brochmann Møller <ih6q@kk.dk>

ti 11-02, 12:47

Hej Malthe

Jeg har netop fået at vide, at undervisningen d. 17 marts er på Aalborg Campus København, så en snak må blive pr telefon.

Vedr. lidar.
Hvad jeg hører, går man mod kameraer og billedbehandling (AI/ML). Hvis der præsenteres noget med lidar til trafikdetektering, der er økonomisk tilgængeligt, så er jeg lutter ører.

Held og lykke med specialet!

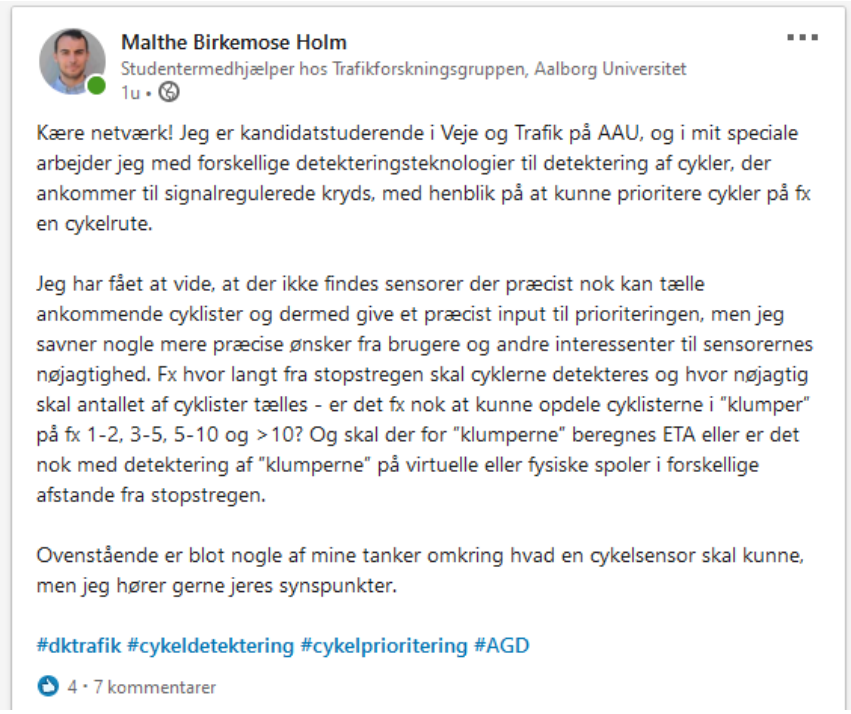
Med venlig hilsen

Kim Brochmann Møller
Trafikingeniør
Trafik

KØBENHAVNS KOMMUNE

Figur A.2. Korrespondance med Kim angående anvendelsen af AGD til cykeldetektering.

Til at supplere dette med erfaringer og brugerønsker fra andre fagpersoner og interessenter i trafiksektoren, laves et opslag på LinkedIn, hvor der spørges ind til cykeldetektering og ønsker til nøjagtigheden af detektering, opslag ses på figur A.3.



Malthe Birkemose Holm
Studentermedhjælper hos Trafikforskningsgruppen, Aalborg Universitet
1u •

Kære netværk! Jeg er kandidatstuderende i Veje og Trafik på AAU, og i mit speciale arbejder jeg med forskellige detekteringsteknologier til detektering af cykler, der ankommer til signalregulerede kryds, med henblik på at kunne prioritere cykler på fx en cykelrute.

Jeg har fået at vide, at der ikke findes sensorer der præcist nok kan tælle ankommende cyklister og dermed give et præcist input til prioriteringen, men jeg savner nogle mere præcise ønsker fra brugere og andre interessenter til sensorernes nøjagtighed. Fx hvor langt fra stopstregen skal cyklerne detekteres og hvor nøjagtig skal antallet af cyklister tælles - er det fx nok at kunne opdele cyklisterne i "klumper" på fx 1-2, 3-5, 5-10 og >10? Og skal der for "klumperne" beregnes ETA eller er det nok med detektering af "klumperne" på virtuelle eller fysiske spoler i forskellige afstande fra stopstregen.

Ovenstående er blot nogle af mine tanker omkring hvad en cykelsensor skal kunne, men jeg hører gerne jeres synspunkter.

#dktrafik #cykeldetektering #cykelprioritering #AGD

4 • 7 kommentarer

Figur A.3. LinkedIn opslag til indsamling af erfaringer og brugerønsker med cykeldetektering.

En tilbagemelding til opslaget kommer fra Jakob Nørgaard Wedel, som er trafikingeniør hos Rambøll, dette ses på figur A.4.

Figur A.4. Tilbagemeldning fra trafikingeniør fra Rambøll.

Her udtrykkes at evnen til at estimere antal cyklister er brugbart i henhold til at vælge graden af prioritering, samt at estimering af ETA for cyklister kan bruges til at skarp nedlukning af grønt for cyklister, således at signalprogrammet kan optimeres.

Denne udtalelse bekræftes af Jos van Vlerken fra Sekretariatet for Supercykelstier ved Københavns Kommune, som ses af figur A.5.

Jos van Vlerken <CZ9Y@kk.dk>

Svar til alle

fr 27-03, 10:28

David Gaarsdal Rønnov <IQ38@kk.dk>; Emil Tin <ZF0F@kk.dk>; +2 flere

Hej David,

Vi har vist nok allerede være i kontakt med Malthe via Kim.

Men grundlæggende set er vi interesserede i følgende.:

Et meget præcist antal cyklister på et givent sted, gerne med over 95% nøjagtighed, også når der er mange cyklister samtidig. Dette opnår vi på nuværende tidspunkt vha automatisk billedgenkendelse og kameraer, dog bliver disse mindre nøjagtig om natten på mørke steder. Hvis disse tællinger kan klassificere cyklisterne i fx ladcykler, elcykler, løbehjul osv er det så meget desto bedre. I forhold til ETA, position, hastigheder osv. kunne det være relevant i forhold til at give prioritet for større grupper cyklister i trafiksignalerne, men dette er vi vist nok også i stand til ved hjælp af vores kameraer.

I sidste ende vil den teknologi vi bruger være en afvejning af behov, funktionalitet og pris. På den måde er vi teknologineutrale. Radar er relativt billigt, men har vist sig at give dårlig funktionalitet når det kommer til at tælle de mængder cyklister vi har i dag. Det er fint til detektion, men i København må man antage, at der næste altid er cyklister alle steder, at få bekræftet dette er ikke så relevant. Spørgsmålet er blot hvor mange cyklister der er og her har kameradetektion vist sig at være det bedste for nu..

Vi er i hvert fald meget tilfredse med vores kameraer på nuværende tidspunkt, men hvis LiDAR kan gøre noget lignende eller noget der er tilsvarende nyttigt til en pris der er proportional med nytten, så ville vi være interesserede i at kigge på det.

Jeg håber dette hjælper.

Best regards

Jos van Vlerken

Project Manager

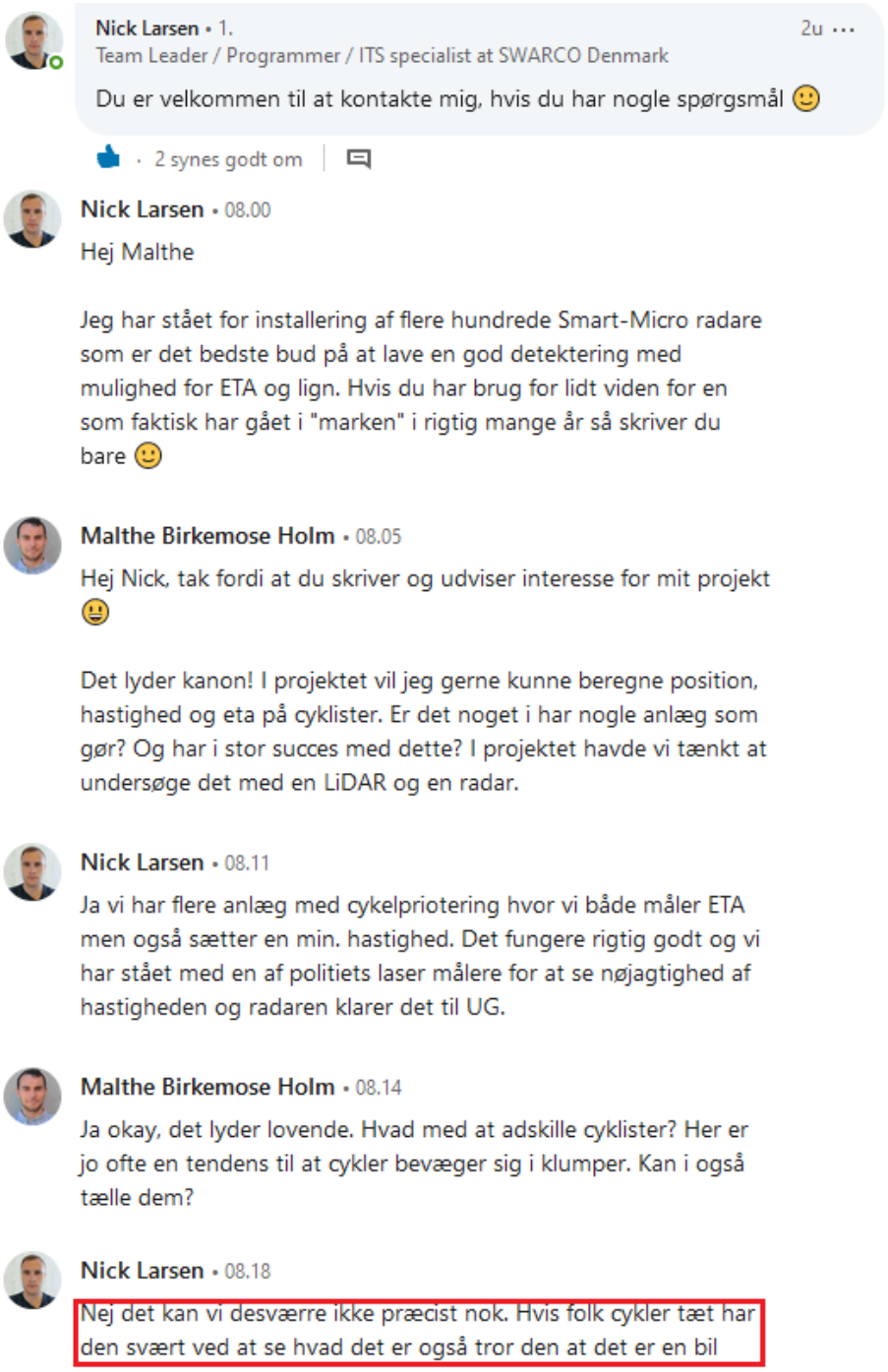
Traffic

CITY of COPENHAGEN

Figur A.5. Uddrag af mailkorrespondance med Københavns Kommune.

Her udtrykkes interesse i at kunne estimere antal cyklister og at estimering af ETA, position og hastighed kan bruges til at prioritere større antal cyklister i signalstyringen.

Opslaget på LinkedIn førte også til korrespondancer med fagpersoner fra leverandører af detekter teknologier. En af disse var Nick Larsen fra SWARCO. Uddrag af korrespondance med Nick Larsen ses af figur A.6.



Figur A.6. Uddrag af korrespondance med Nick Larsen fra SWARCO.

Nick udtrykker at har gode erfaringer med estimering af cyklisters ETA og hastighed med radar i deres anlæg, men at de har problemer med at detektering af cyklister, når disse cykler tæt, både med at adskille cyklister og ved at korrekt objektklassificere.

De samme erfaringer har Henrik Lomholt fra ITS Teknik, som fremhævet i mailkorrespondancen på figur A.7.

Henrik Lomholt <hl@its-teknik.dk>

Svar til alle

ti 31-03, 10:41

Malthe Sigurd Birkemose Holm

Hej Malthe

Se mine svar med rødt under dine spørgsmål.

Med venlig hilsen / Best regards

Henrik Lomholt

Key Account Manager

Fra: Malthe Sigurd Birkemose Holm [mailto:mholm18@student.aau.dk]
Sendt: 26. marts 2020 09:37
Til: hl@its-teknik.dk
Emne: Spørgsmål vedrørende cykeldetektering - Malthe

Hej Henrik, tusinde tak fordi at jeg må skrive til dig vedrørende mit speciale projekt om cykeldetektering.

I mit projekt ønsker jeg at undersøge brugen af above ground detectors (i mit projekt undersøger jeg med LiDAR, og måske radar) til at detektere cyklisters position, hastighed, antal og ETA i realtid. Til dette er jeg interesseret i at vide om i har anlæg som gør dette?

Vi detekterer i dag cykler med radar i stort set alle nye kryds, problemet med radar er når der kommer grupper af cyklister her har erfaringer fra København (en test med 8 smartmicro radar) vist at radaren tror dette r en bil eller en bus når det er grupper. Radaren kan stadigvæk måle hastighed så man kan i teorien bruge denne til at udmåle en ca. ETA.

Når vi skal tælle cyklister og måle en nøjagtig hastighed er der nogle forskellige løsninger men den bedste hvos vi kan begge dele er sensorline som skæres ned i asfalten, Vi kan tælle grupper osv. med kamera men får ikke hastighed på dem men med Sensorline kan vi både tælle med op mod 98% nøjagtighed og måle hastighed med samme nøjagtighed. Dette er dog en løsning som ikke er AGD. Vi har bla. I Aalborg lavet et barometer ved broen som tæller cykler og måler hastighed samt oplyser om rejsetid til Uni.

Jeg har fået at vide at den mest almindelig detektering af cyklister er "blot" at detektere tilstedeværelsen af en cyklist, og altså ikke helt på det informationsniveau som jeg vil undersøge i mit projekt. Derfor vil jeg spørge om hvilke brugerønsker i oplever som leverandør af detektorløsninger til cyklister? Ønskes det fra kommuner, rådgivere m.m. at kunne detektere cyklister i et så højt informationsniveau som jeg vil i mit projekt? Og mener du at en stabil detektering af dette ville kunne bidrage til bedre trafikstyring og prioritering af cykeltrafik?

I signalanlæg er det store ønske stadigvæk blot at detektere cyklister, vi har med sensorline lavet en løsning i Albertslund/Glostrup hvor der tælles og måles hastighed samt fortæller via en lille barometer hvor hurtigt cyklisten skal køre for at nå grønt lys i krydset der ligger lidt længere fremme men igen er det ikke en AGD løsning.
Som tidligere skrevet har vi testet en radar løsning der kan både tælle vise retning og hastighed med stor nøjagtighed på Dronning Louises Bro i København hvor der hvert år passere mellem 2,5 og 3 millioner cyklister (store grupper) Denne løsning var super, eneste ting var at den skulle monteres i ca. 2 meters højde så hærværk var en klar udfordring og samtidigt var den forholdsvis dyr´.

Hvis du kommer på en løsning der kan etableres fornuftigt må du endeligt vende tilbage så vi kan teste det i et kryds.

På forhånd tak

Mvh

Malthe Holm

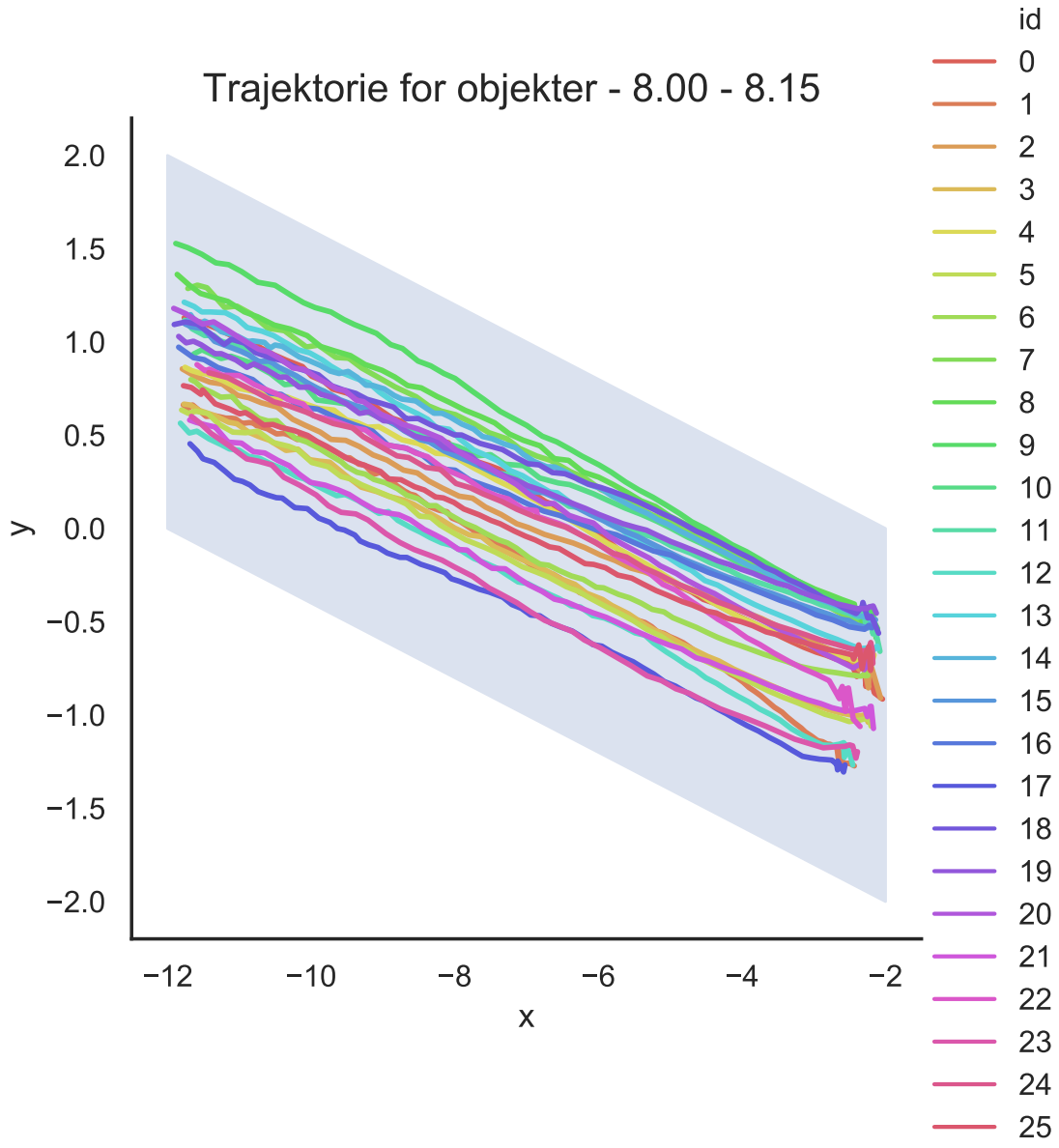
Figur A.7. Mailkorrespondance med ITS Teknik.

Her ses at Henriks erfaring er at når der kommer grupper af cyklister så kan radaren ikke objektklassificere korrekt. Til at tælle cyklister bruger ITS teknik en anden løsning ved navn Sensorline, som de har høj nøjagtighed med. Men dette er ikke en AGD løsning.

Erfaringerne fra de forskellige fagpersoner og interessenter viser at der i de eksisterende anvendte detekteringsteknologier ikke er én enkelt detektor, der er i stand til at estimere antal, position, hastighed og ETA pålideligt, når der er mange cyklister.

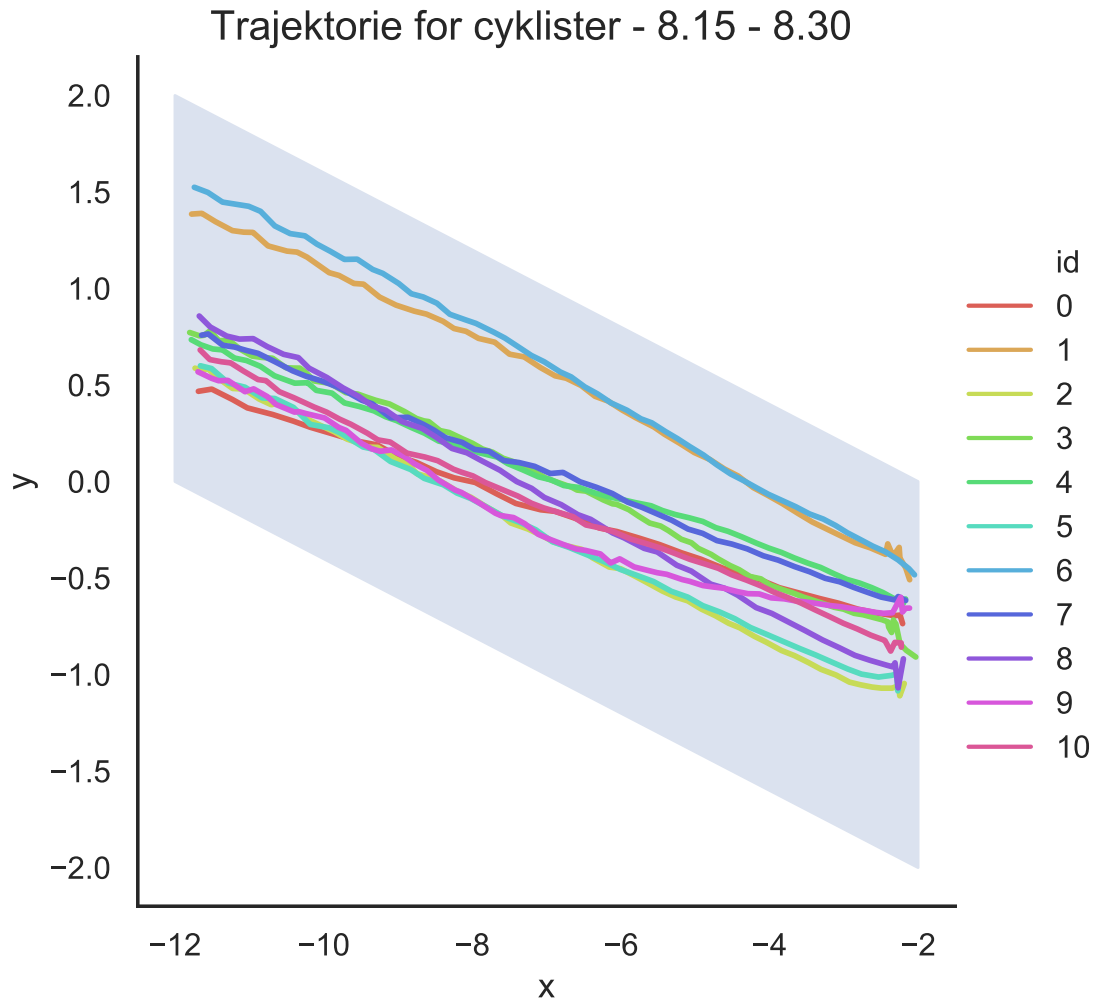
Trajektorier B

Tidssekvens 1: 8.00 - 8.15 - Trajektorier



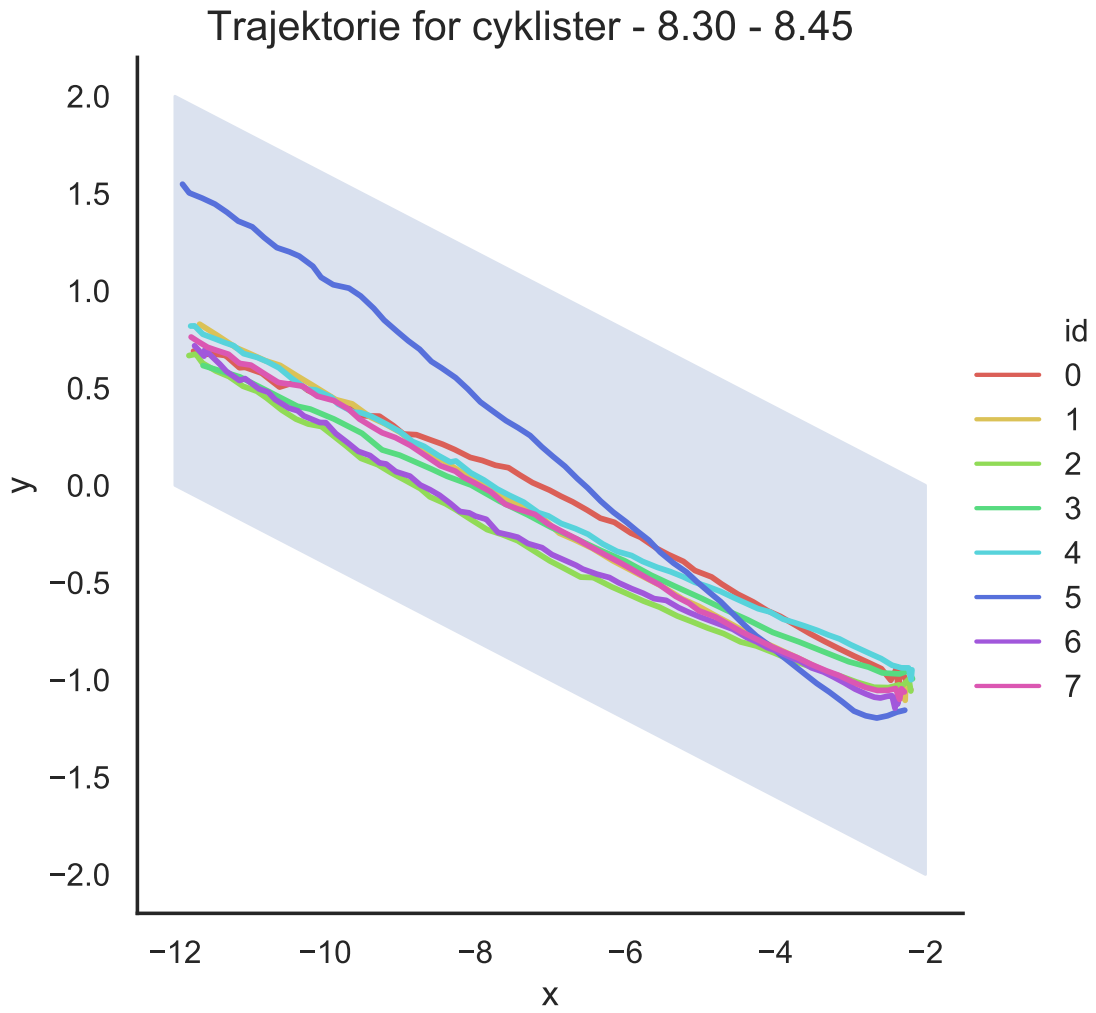
Figur B.1. Trajektorier for detekterede cyklister fra 8.00 til 8.15.

Tidssekvens 2: 8.15 - 8.30 - Trajektorier



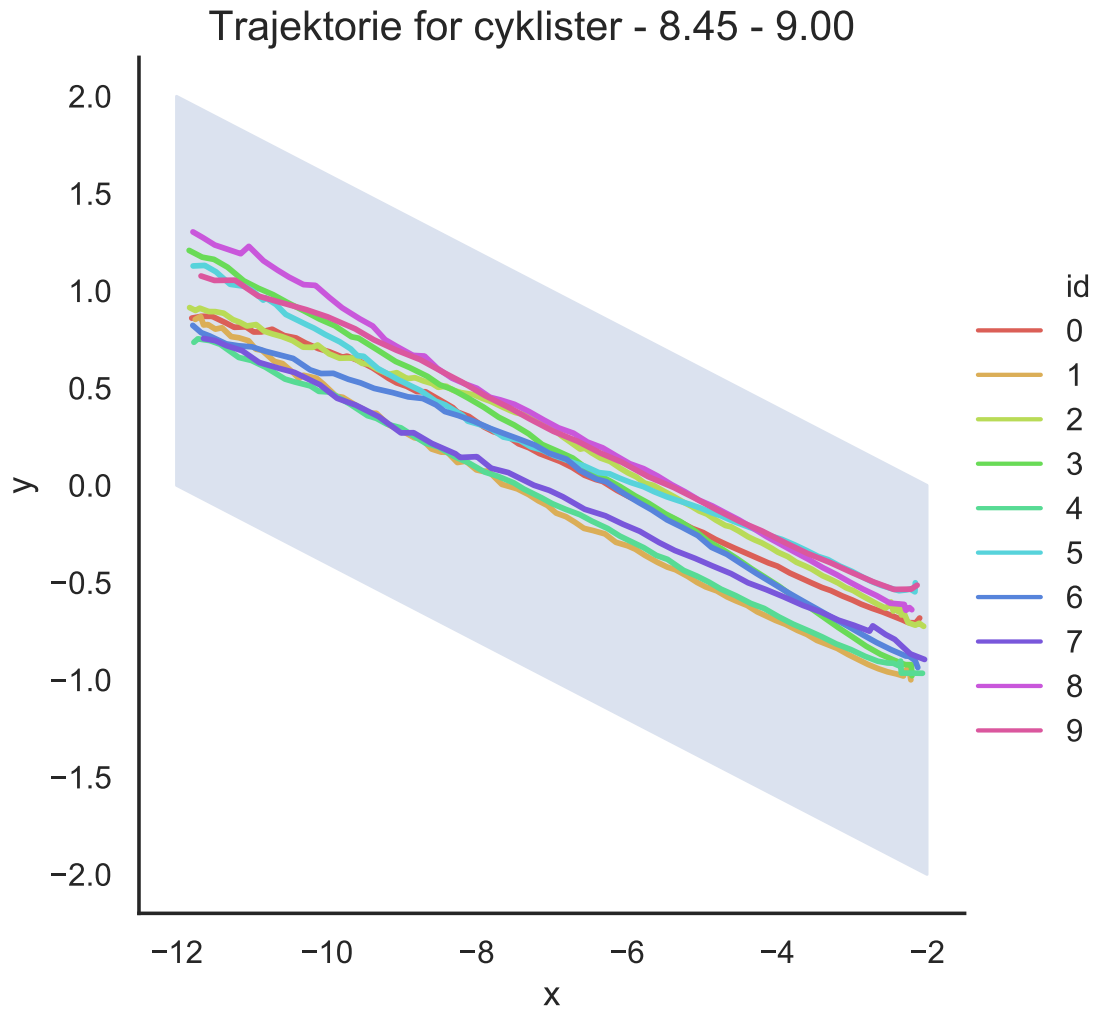
Figur B.2. Trajektorier for detekterede cyklister fra 8.15 til 8.30.

Tidssekvens 3: 8.30 - 8.45 - Trajektorier



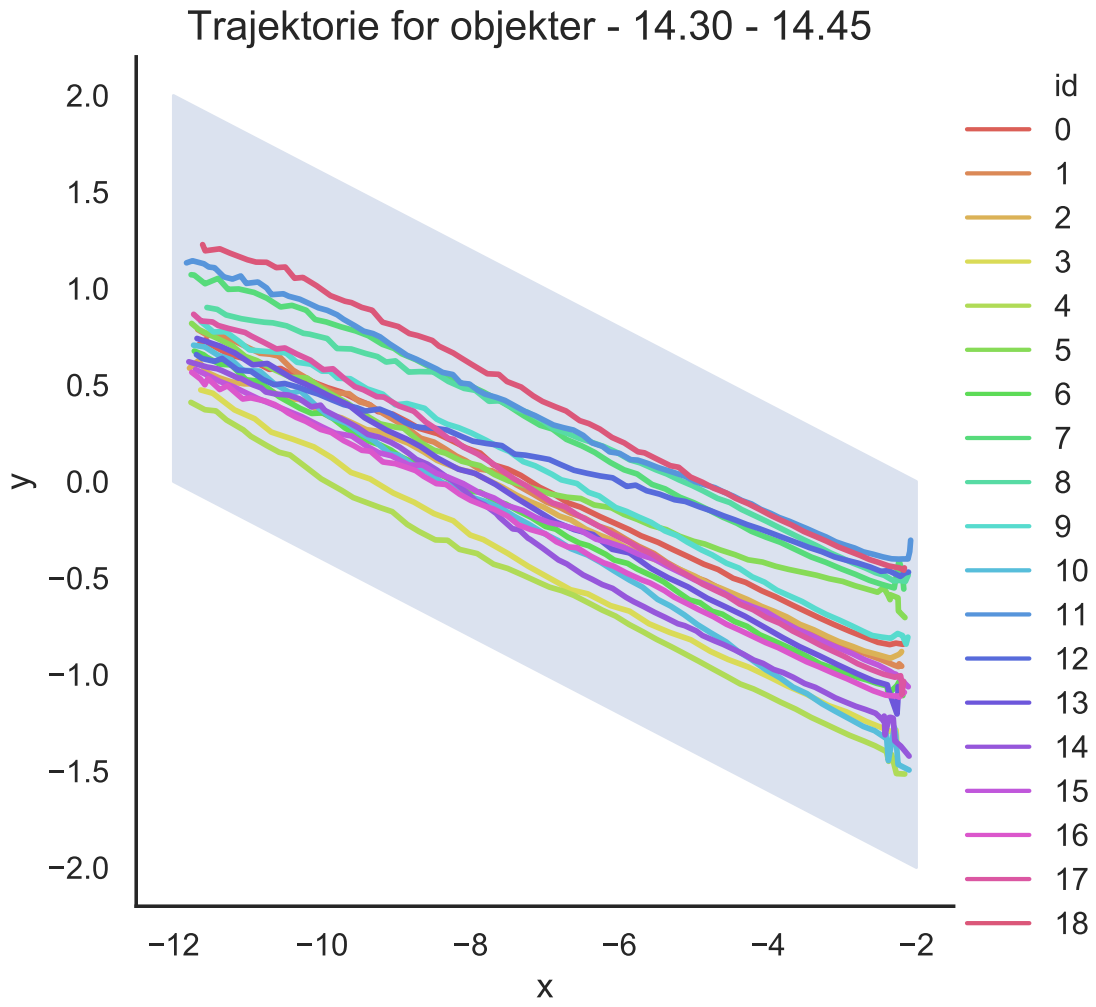
Figur B.3. Trajektorier for detekterede cyklister fra 8.30 til 8.45.

Tidssekvens 4: 8.45 - 9.00 - Trajektorier



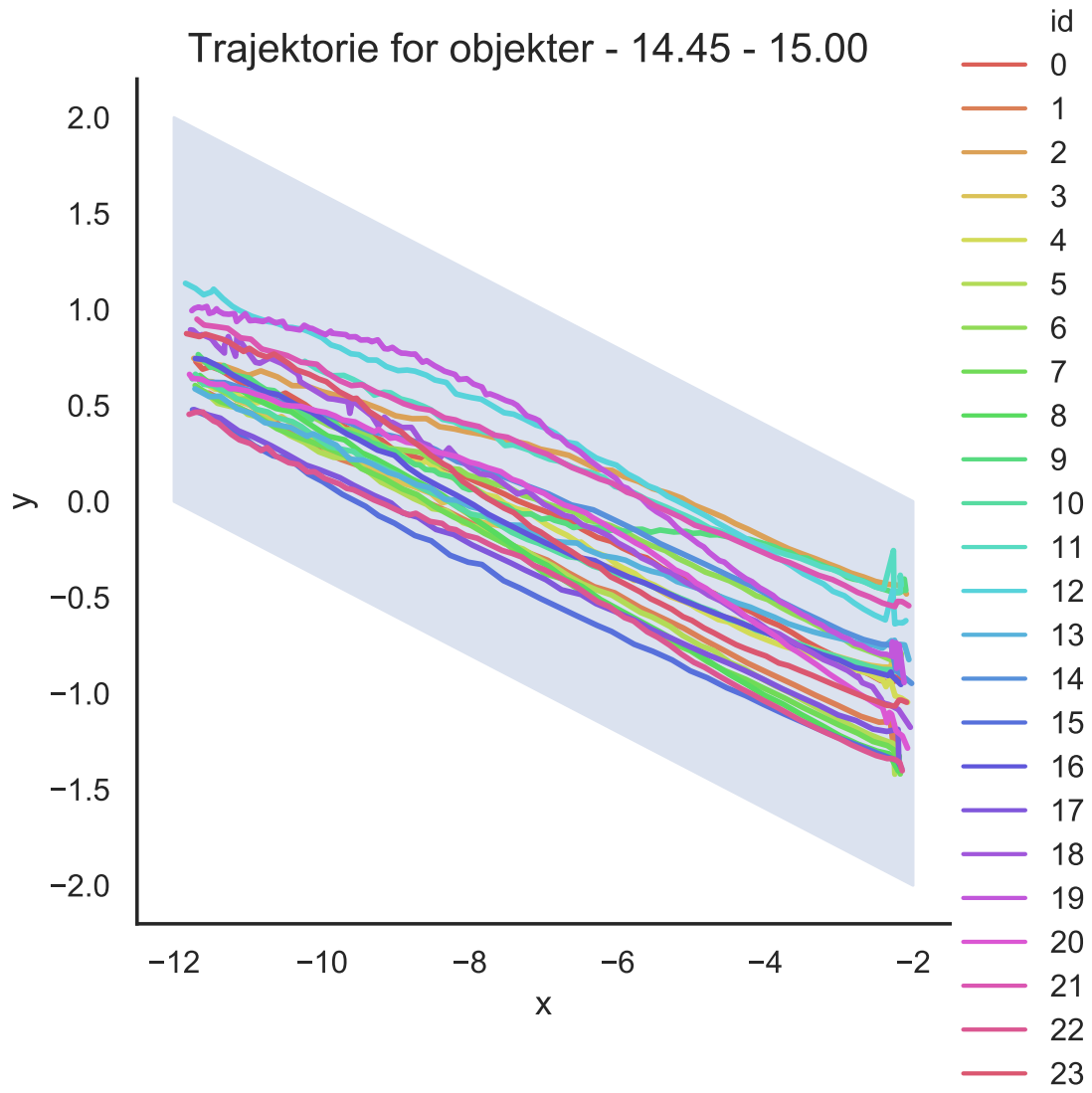
Figur B.4. Trajektorier for detekterede cyklister fra 8.45 til 9.00.

Tidssekvens 5: 14.30 - 14.45 - Trajektorier



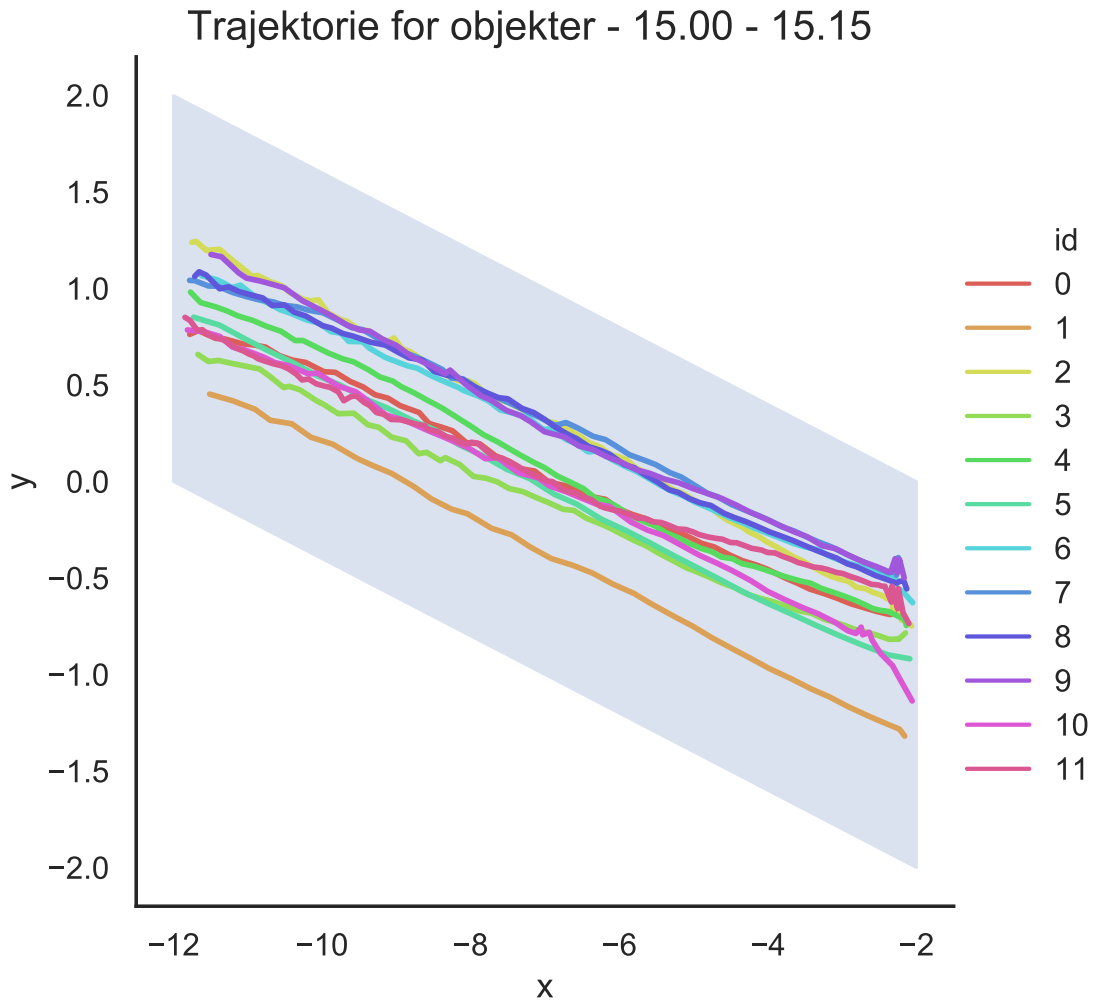
Figur B.5. Trajektorier for detekterede cyklister fra 14.30 til 14.45.

Tidssekvens 6: 14.45 - 15.00 - Trajektorier



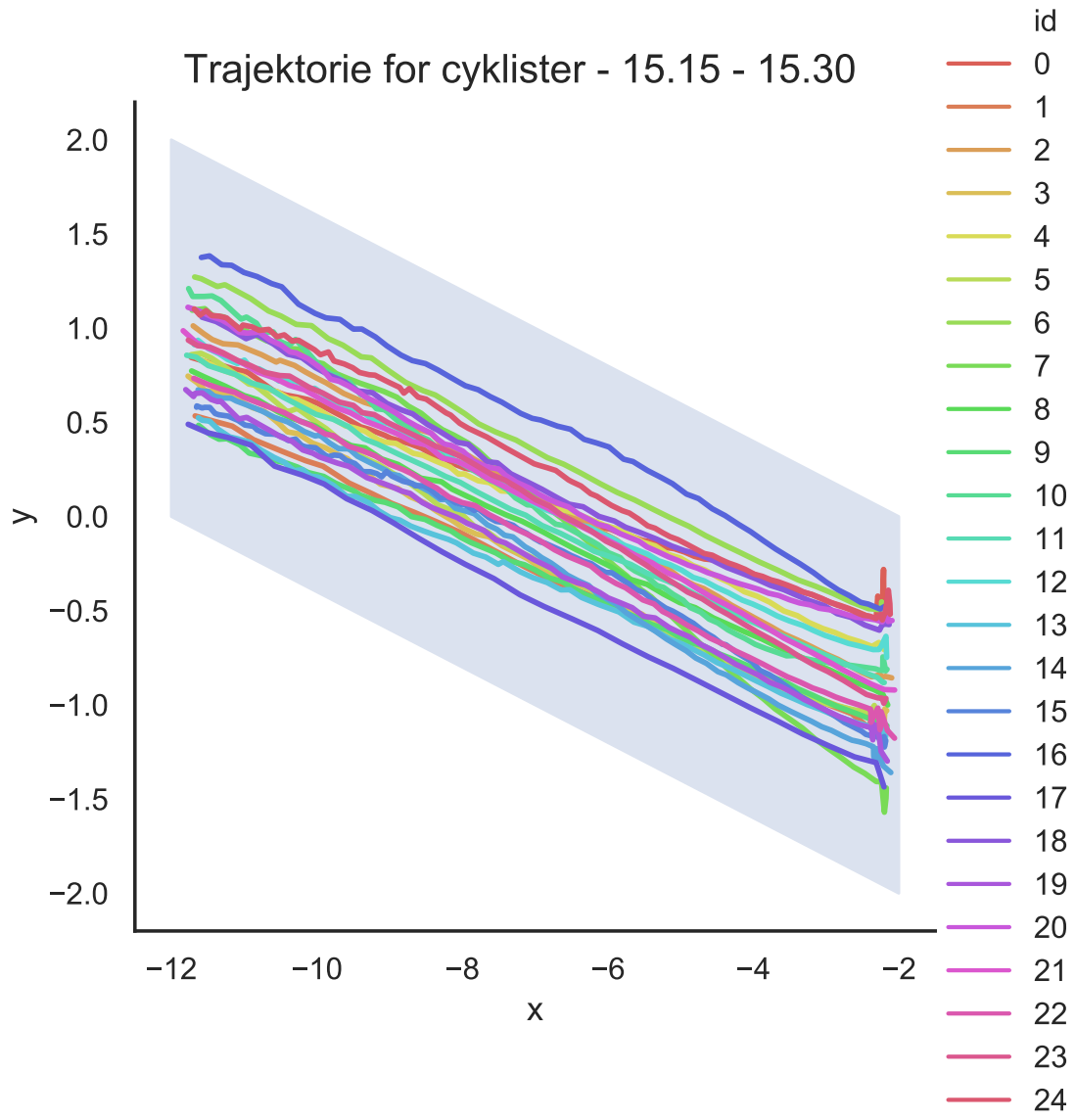
Figur B.6. Trajektorier for detekterede cyklister fra 14.45 til 15.00.

Tidssekvens 7: 15.00 - 15.15 - Trajektorier



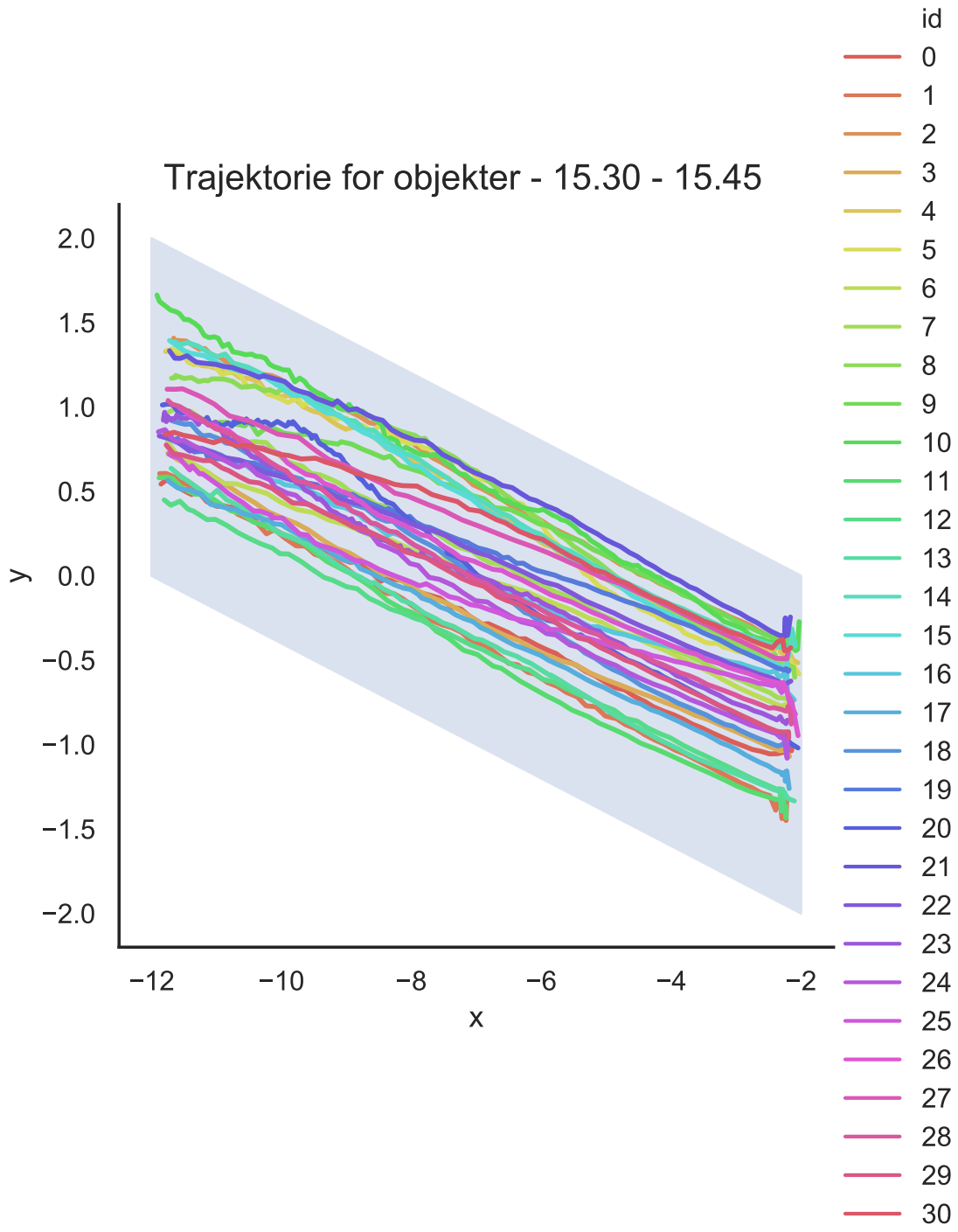
Figur B.7. Trajektorier for detekterede cyklister fra 15.00 til 15.15.

Tidssekvens 8: 15.15 - 15.30 - Trajektorier



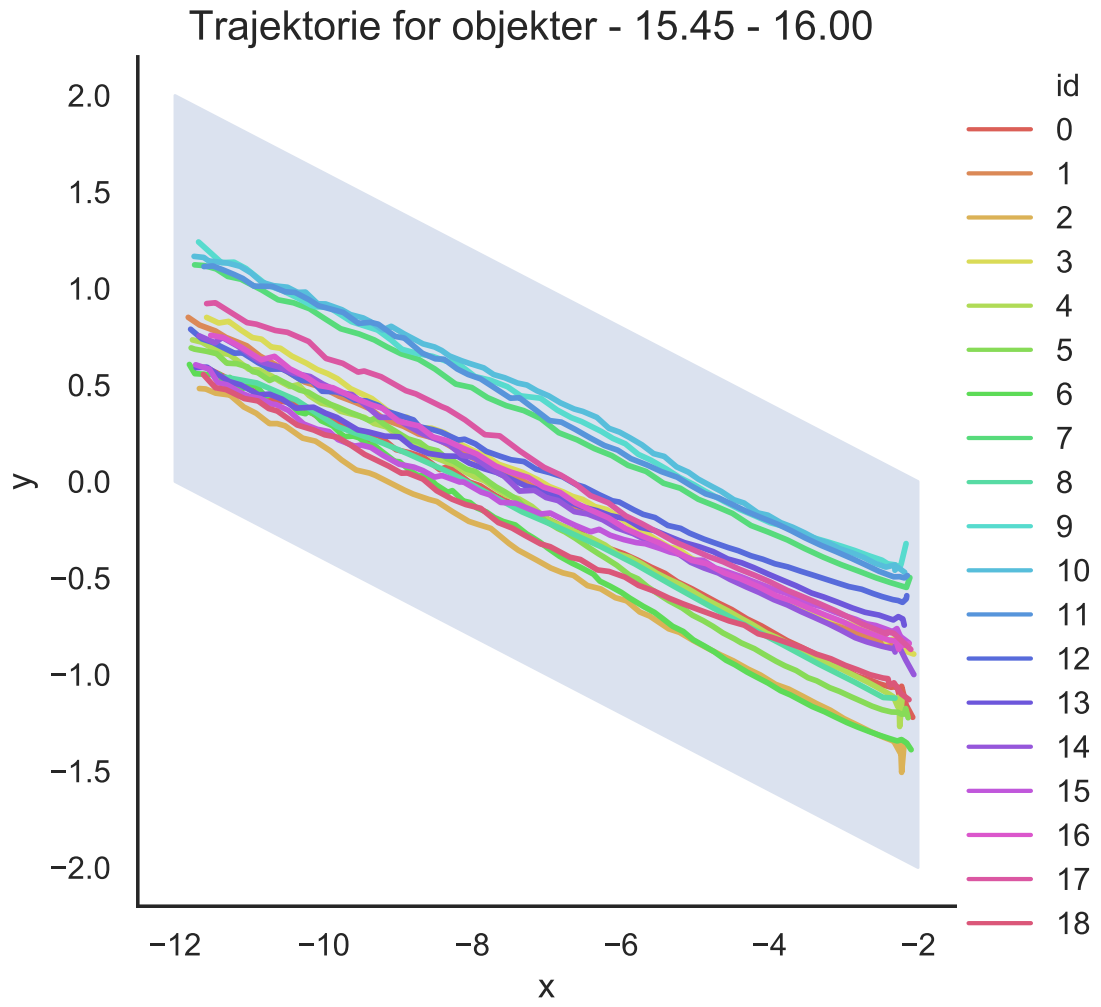
Figur B.8. Trajektorier for detekterede cyklister fra 15.15 til 15.30.

Tidssekvens 9: 15.30 - 15.45 - Trajektorier



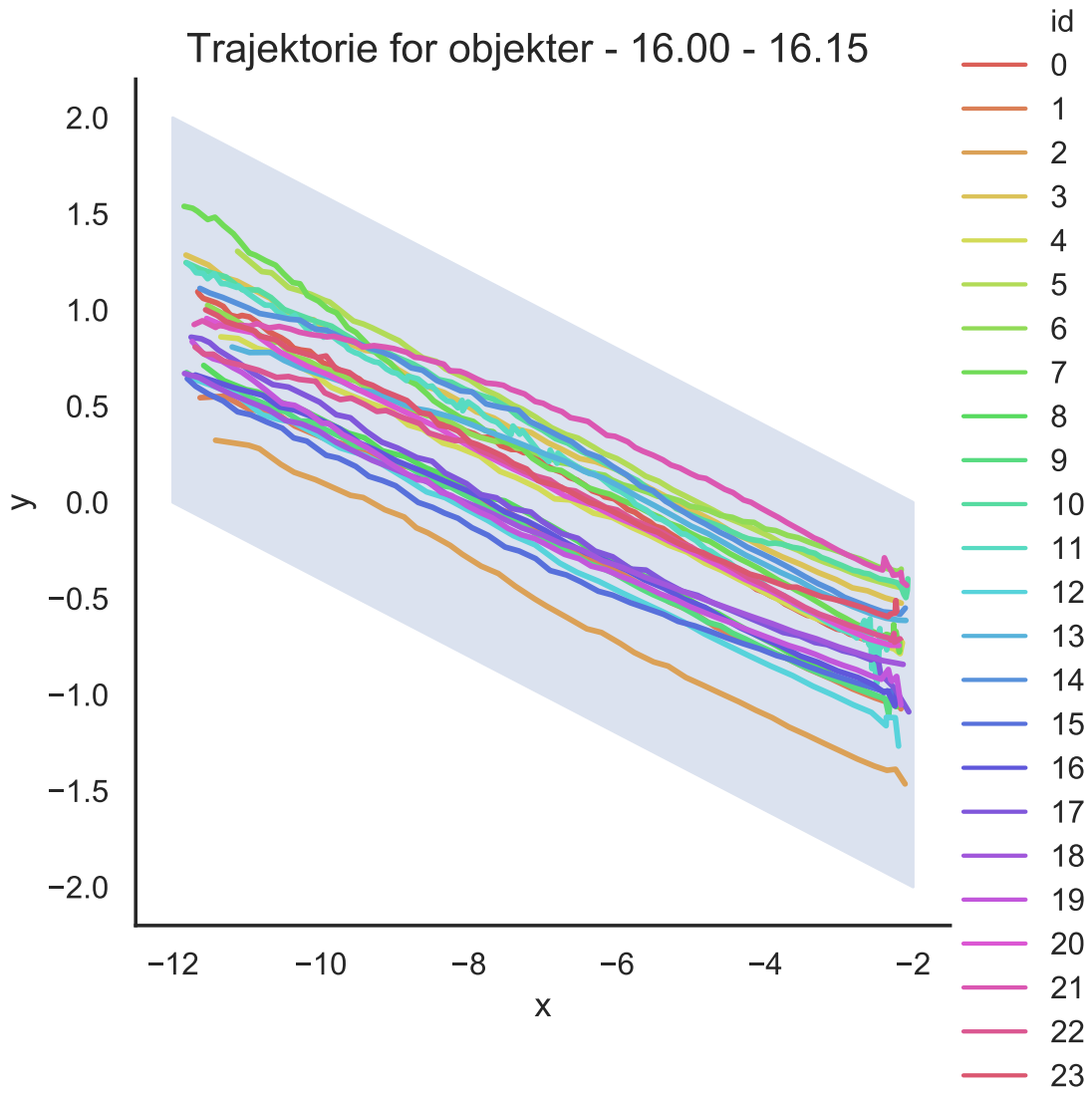
Figur B.9. Trajektorier for detekterede cyklister fra 15.30 til 15.45.

Tidssekvens 10: 15.45 - 16.00 - Trajektorier



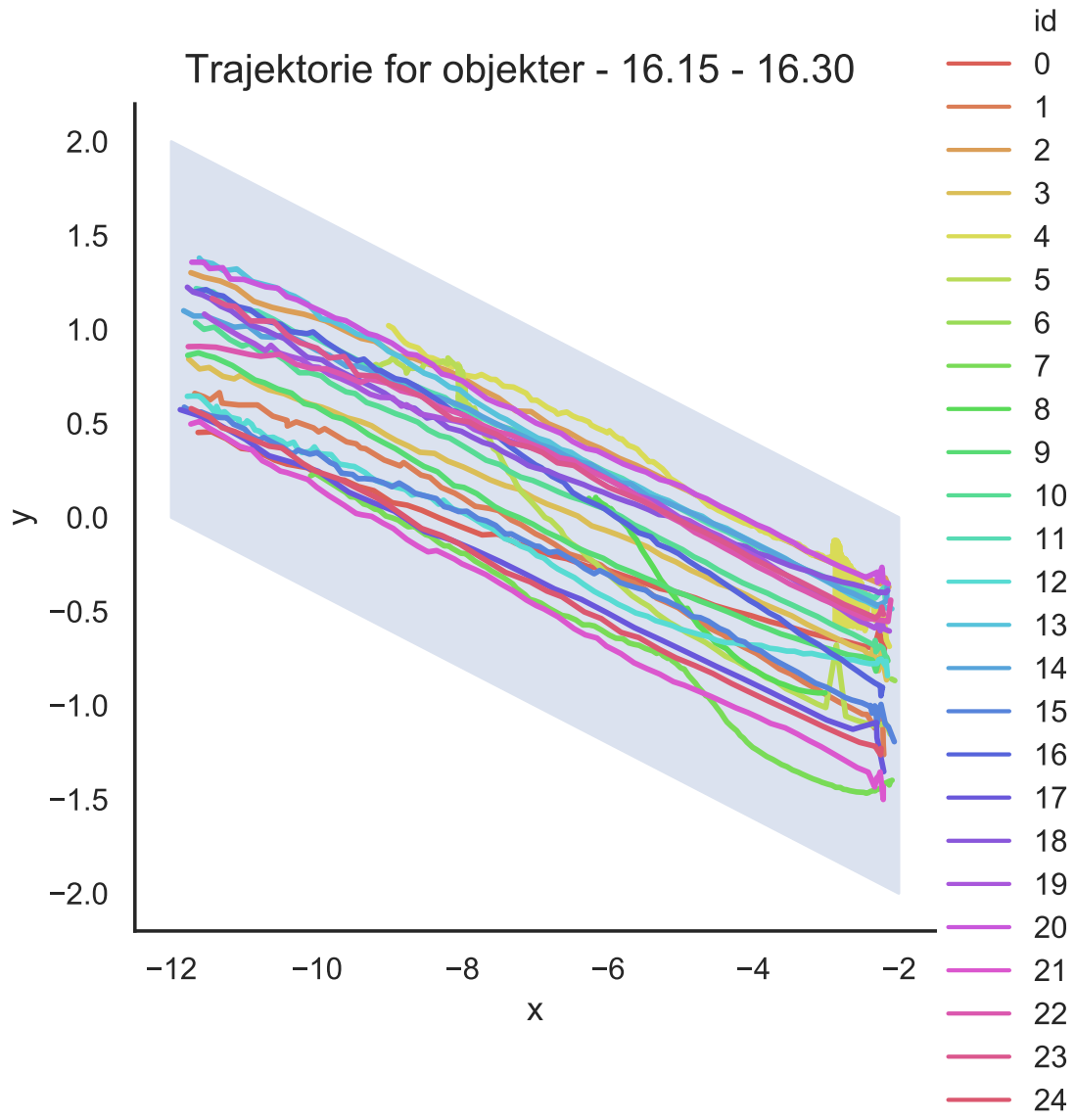
Figur B.10. Trajektorier for detekterede cyklister fra 15.45 til 16.00.

Tidssekvens 11: 16.00 - 16.15 - Trajektorier



Figur B.11. Trajektorier for detekterede cyklister fra 16.00 til 16.15.

Tidssekvens 12: 16.15 - 16.30 - Trajektorier



Figur B.12. Trajektorier for detekterede cyklister fra 16.15 til 16.30.

Hastigheder C

Tidssekvens 1: 8.00 - 8.15 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.1. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 8.00 til 8.15

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	2.94
1	1.69
2	3.73
3	3.51
4	3.43
5	3.61
6	2.80
7	4.29
8	3.73
9	3.62
10	4.25
11	2.64
12	2.75
13	3.19
14	2.74
15	3.11
16	4.68
17	2.62
18	3.15
19	3.10
20	3.46
21	3.22
22	3.29
23	3.78
24	3.89
25	2.93

Af tabel C.1 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 26 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.00 til 8.15. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 1 med 1.69 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 16 med 4.68 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.26 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.31 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 0.64.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.1 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode. Ved kontrol af video er det fundet at cyklisten tilhørende ID 1 cykler meget langsomt og beregnet gennemsnitshastighed på 1.69 m/s er korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 2: 8.15 - 8.30 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.2. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 8.15 til 8.30.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	5.14
1	3.62
2	3.38
3	2.51
4	3.47
5	4.13
6	3.58
7	3.82
8	4.05
9	2.97
10	3.53

Af tabel C.2 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 11 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.15 til 8.30. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 3 med 2.51 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 0 med 5.14 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.58 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.66 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 0.67.

Alle beregnede gennemsnitshastigheder er vurderet korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 3: 8.30 - 8.45 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.3. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 8.30 til 8.45.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	3.34
1	4.34
2	3.83
3	6.06
4	3.14
5	3.30
6	2.67
7	3.44

Af tabel C.3 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 8 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.30 til 8.45. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 6 med 2.67 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 3 med 6.06 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.39 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.77 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.04.

Alle beregnede gennemsnitshastigheder er vurderet korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 4: 8.45 - 9.00 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.4. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 8.45 til 9.00.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	2.82
1	2.40
2	2.07
3	3.88
4	3.39
5	2.93
6	3.72
7	4.33
8	3.44
9	5.96

Af tabel C.4 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 10 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.45 til 9.00. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 2 med 2.07 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 9 med 5.96 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.41 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.49 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.1.

Alle beregnede gennemsnitshastigheder er vurderet korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 5: 14.30 - 14.45 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.5. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 14.30 til 14.45.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	3.77
1	3.40
2	3.51
3	4.99
4	3.50
5	3.45
6	2.99
7	3.52
8	3.26
9	3.22
10	3.50
11	2.39
12	3.18
13	4.66
14	2.53
15	3.69
16	3.08
17	3.12
18	2.91

Af tabel C.5 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 19 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 14.30 til 14.45. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 11 med 2.39 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 3 med 4.99 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.40 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.40 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 0.61.

Alle beregnede gennemsnitshastigheder er vurderet korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 6: 14.45 - 15.00 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.6. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 14.45 til 15.00.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	3.38
1	5.73
2	3.64
3	3.29
4	2.50
5	3.66
6	3.36
7	4.68
8	4.70
9	2.14
10	3.39
11	2.71
12	2.59
13	3.25
14	5.46
15	4.79
16	4.33
17	4.56
18	2.67
19	1.60
20	2.48
21	3.45
22	2.82
23	2.73

Af tabel C.6 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 24 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 14.45 til 15.00. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 19 med 1.60 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 1 med 5.73 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.37 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.49 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.06.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.6 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 19 er en ladcykel der cykler langsomt frem mod rødt lys. Den beregnede gennemsnitshastighed for ID 19 er derfor korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 7: 15.00 - 15.15 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.7. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 15.00 til 15.15.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	3.56
1	5.29
2	2.33
3	3.15
4	3.14
5	6.50
6	2.94
7	3.22
8	2.93
9	3.56
10	3.99
11	1.84

Af tabel C.7 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 12 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.00 til 15.15. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 11 med 1.84 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 5 med 6.50 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.18 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.54 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.26.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.7 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 11 cykler langsomt frem grundet rødt lys. Den beregnede gennemsnitshastighed for ID 11 er derfor korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 8: 15.15 - 15.30 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.8. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 15.15 til 15.30.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	2.72
1	5.61
2	3.41
3	3.25
4	3.18
5	3.73
6	4.45
7	3.26
8	4.63
9	3.41
10	2.43
11	4.42
12	2.91
13	3.10
14	2.52
15	1.91
16	3.46
17	6.57
18	3.75
19	2.81
20	2.66
21	4.16
22	3.20
23	3.71
24	2.13

Af tabel C.8 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 25 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.15 til 15.30. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 15 med 1.91 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 17 med 6.57 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.26 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.5 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.05.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.8 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 15 cykler langsomt frem mod rødt lys. "Cyklist"med ID 17 er en knallert og derfor forventeligt at denne kører hurtigere end acceptinterval fastsat for cyklister. Beregnede gennemsnitshastigheder for ID 15 og 17 er derfor korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 9: 15.30 - 15.45 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.9. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 15.30 til 15.45.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	2.78
1	2.73
2	2.89
3	4.19
4	2.31
5	1.71
6	4.42
7	2.87
8	2.05
9	2.65
10	1.51
11	3.87
12	3.24
13	2.81
14	2.94
15	3.56
16	2.45
17	2.30
18	2.54
19	1.92
20	1.24
21	2.45
22	4.04
23	1.36
24	3.10
25	2.75
26	2.75
27	5.14
28	2.58
29	3.26
30	3.54

Af tabel C.9 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 31 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.30 til 15.45. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 20 med 1.24 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 17 med 5.14 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 2.75 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 2.84 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 0.89.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.9 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 5, 10, 19, 20 og 23 cykler langsomt frem mod rødt lys. Beregnede gennemsnitshastigheder for ID 5, 10, 19, 20 og 23 er derfor korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 10: 15.45 - 16.00 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.10. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 15.45 til 16.00.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	3.49
1	4.41
2	3.40
3	2.97
4	2.98
5	2.63
6	2.41
7	4.57
8	9.19
9	3.67
10	2.98
11	3.57
12	2.95
13	3.67
14	3.56
15	2.94
16	4.11
17	4.00
18	3.63

Af tabel C.10 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 19 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.45 til 16.00. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 6 med 2.41 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 8 med 9.19 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.56 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.74 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.44.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.10 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 8 er en knallert og en højere hastighed er derfor forventet. Den beregnede gennemsnitshastighed for ID 8 er derfor korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 11: 16.00 - 16.15 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.11. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 16.00 til 16.15.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	1.86
1	5.95
2	4.42
3	4.46
4	4.67
5	3.55
6	2.83
7	2.43
8	5.24
9	3.19
10	2.39
11	1.76
12	5.33
13	4.83
14	3.60
15	4.02
16	4.89
17	4.06
18	5.43
19	3.40
20	6.68
21	2.30
22	3.54
23	2.94

Af tabel C.11 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 24 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 16.00 til 16.15. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 11 med 1.76 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 20 med 6.68 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.81 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.91 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.32.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.11 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 0 er en langsomt cyklende ældre cyklist, ID 11 er en langsomt cyklende ladcykel og ID 20 er en hurtigt cyklende person på en racercykel. Beregnede gennemsnitshastigheder for ID 0, 11 og 20 er derfor korrekt og retvisende. De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

Tidssekvens 12: 16.15 - 16.30 - Beregnede gennemsnitshastigheder

Tabel C.12. Beregnede gennemsnitshastighed i tidsrummet 16.15 til 16.30.

ID	Gennemsnitshastighed [m/s]
0	4.54
1	2.80
2	4.67
3	3.54
4	0.82
5	1.31
6	
7	1.28
8	1.59
9	3.46
10	3.13
11	4.68
12	1.89
13	3.17
14	3.48
15	2.25
16	2.72
17	6.86
18	2.89
19	2.69
20	3.10
21	3.03
22	4.03
23	4.06
24	4.73

Af tabel C.12 ses beregnede gennemsnitshastigheder for de 25 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 16.15 til 16.30. Den mindste beregnede gennemsnitshastighed i tidssekvensen er ID 4 med 0.82 m/s og den maksimalt beregnede gennemsnitshastighed er ID 17 med 6.86 m/s. Median for gennemsnitshastigheder er 3.12 m/s og gennemsnittet af beregnede gennemsnitshastigheder er 3.20 m/s. Standardafvigelsen for beregnede gennemsnitshastigheder er 1.35.

ID'er og hastigheder med orange på figur C.12 er undersøgt, da disse er udenfor fastlagt acceptinterval i metode. ID med rød er ikke beregnet og derfor undersøgt.

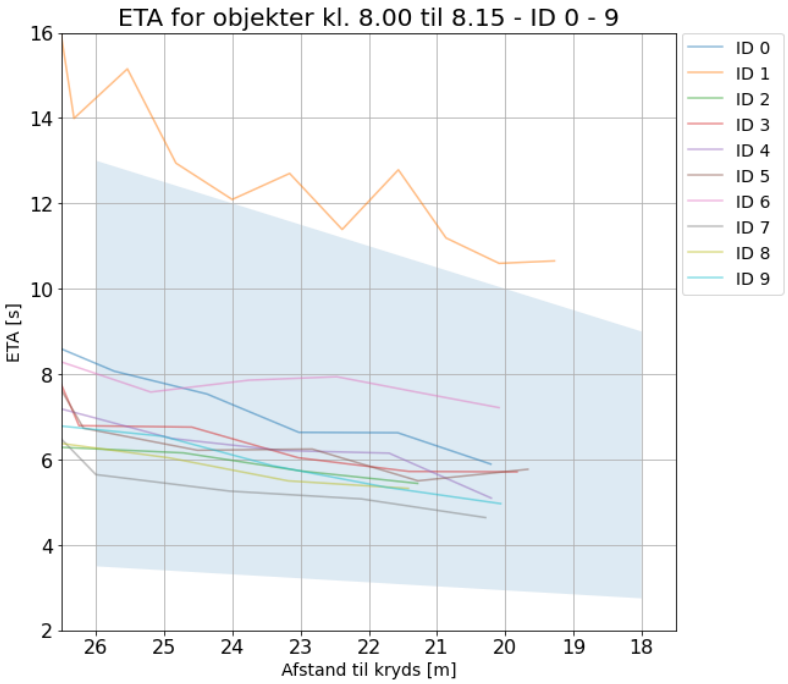
Ved kontrol af video er det fundet at ID 4, 5, 7 og 8 er en gruppe tætkørende cyklister der tilnærmelsesvis stopper for at kigge op i mod kamera og LiDAR. ID 6 er en fejldetektering som følge af ID 4 og ID 7 cykler så tæt at de er detekteret som ét objekt. ID 6 er kun detekteret i 2 frames, og da hastighed er beregnet ud fra 0.5 sekunds intervaller (hver 10. frame) kan en gennemsnitshastighed for ID 6 ikke blive beregnet, da denne er en fejldetektering. ID 12 er en langsomtkørende cyklist der sænker farten frem i mod krydset grundt rødt lys. ID 17 er en knallert og en højere hastighed er derfor forventet.

Beregnede gennemsnitshastigheder for ID 4, 5, 7, 8, 12 og 17 er korrekte og retvisende. Objekt ID 6 er en fejldetektering.

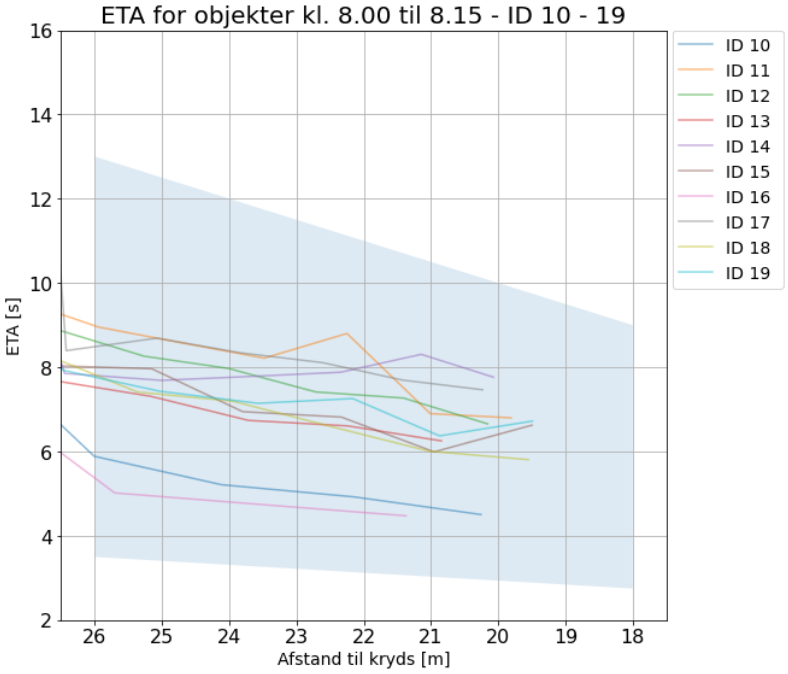
De øvrige beregnede gennemsnitshastigheder er accepteret som korrekte og retvisende da de er inden for fastlagt acceptinterval i metode.

ETA D

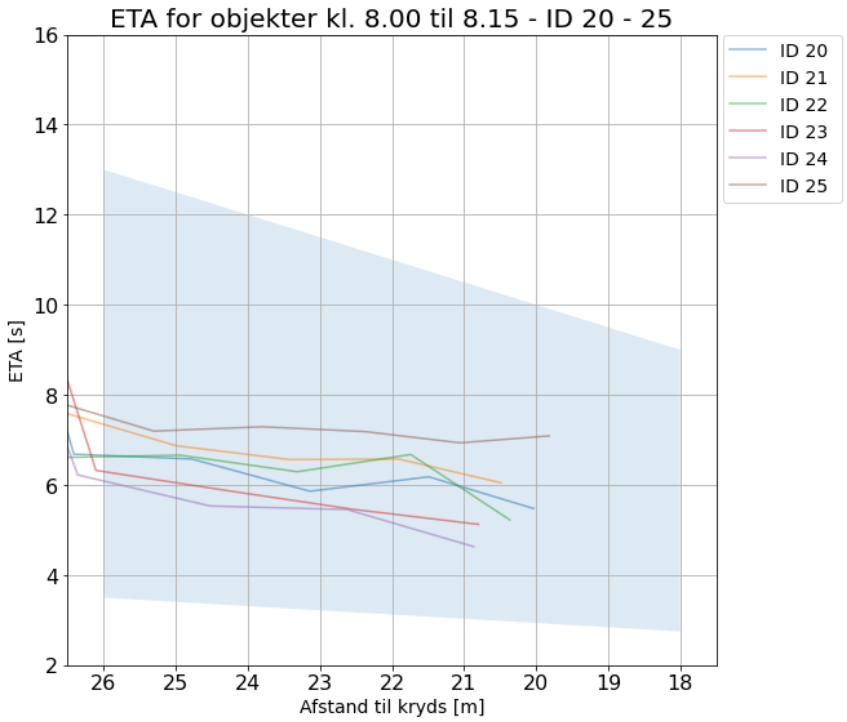
Tidssekvens 1: 8.00 - 8.15 - ETA



Figur D.1. ETA for detekterede cyklister fra 8.00 til 8.15 ID 0 - 9.



Figur D.2. ETA for detekterede cyklister fra 8.00 til 8.15 ID 10 - 19.



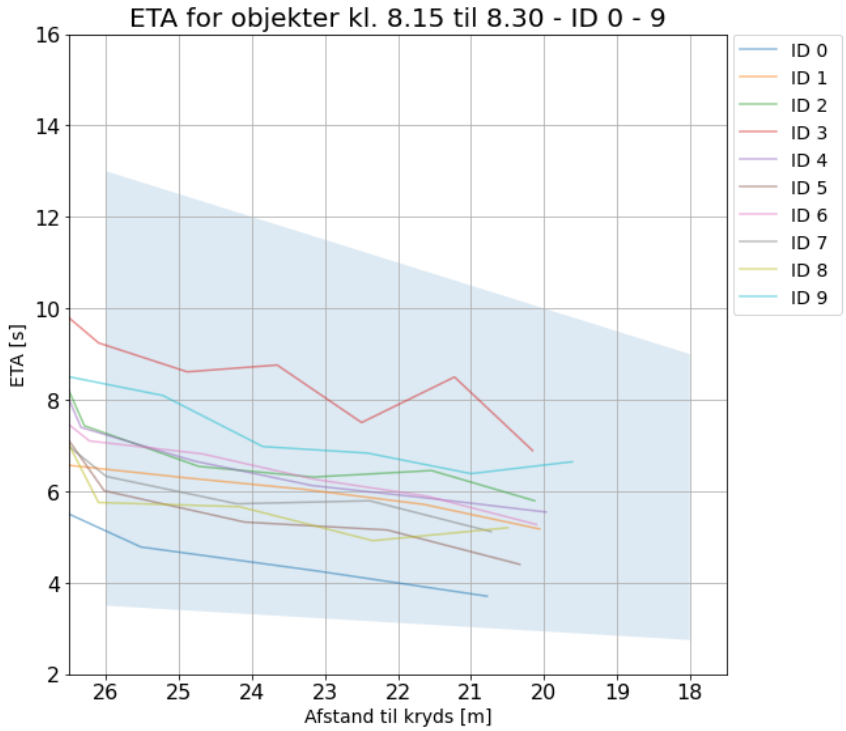
Figur D.3. ETA for detekterede cyklister fra 8.00 til 8.15 ID 20 - 25.

Af figur D.1, D.2 og D.3 ses beregnede ETA'er for de 26 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.00 til 8.15. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 1, er inden for dette område.

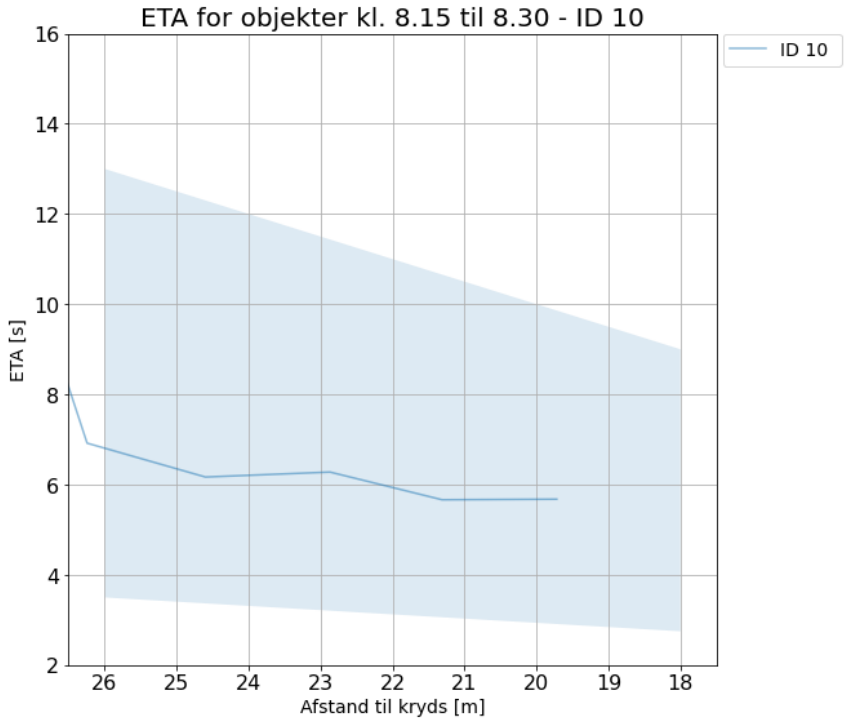
Ved kontrol af video er det fundet at ID 1 er en langsomtkørende cyklist, og ETA kurveforløbet for ID 1 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

Tidssekvens 2: 8.15 - 8.30 - ETA



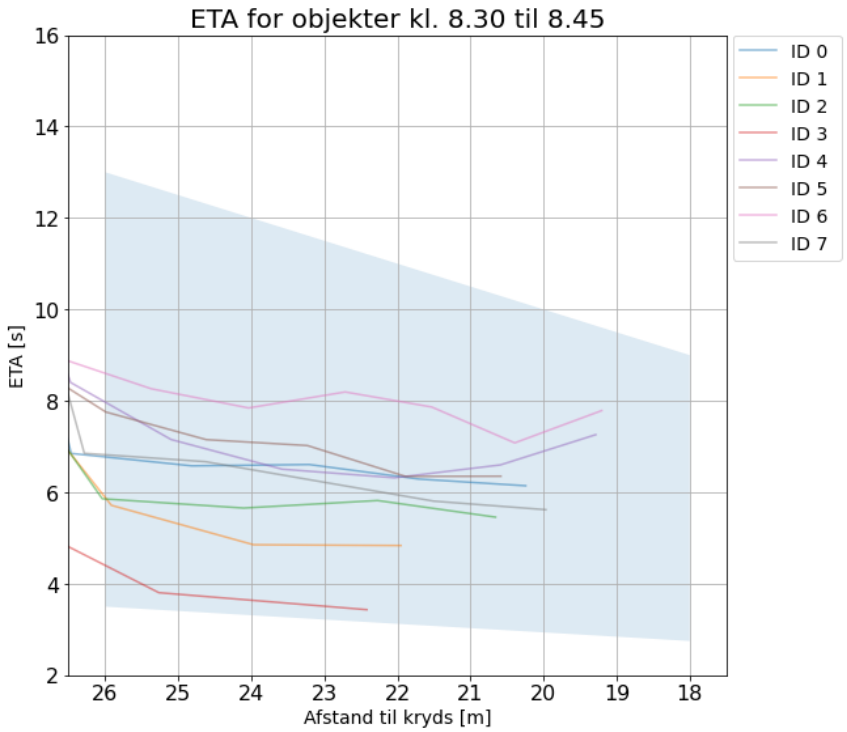
Figur D.4. ETA for detekterede cyklister fra 8.15 til 8.30 ID 0 - 9.



Figur D.5. ETA for detekterede cyklister fra 8.15 til 8.30 ID 10.

Af figur D.4 og D.5 ses beregnede ETA'er for de 11 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.15 til 8.30. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb er inden for dette område. Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

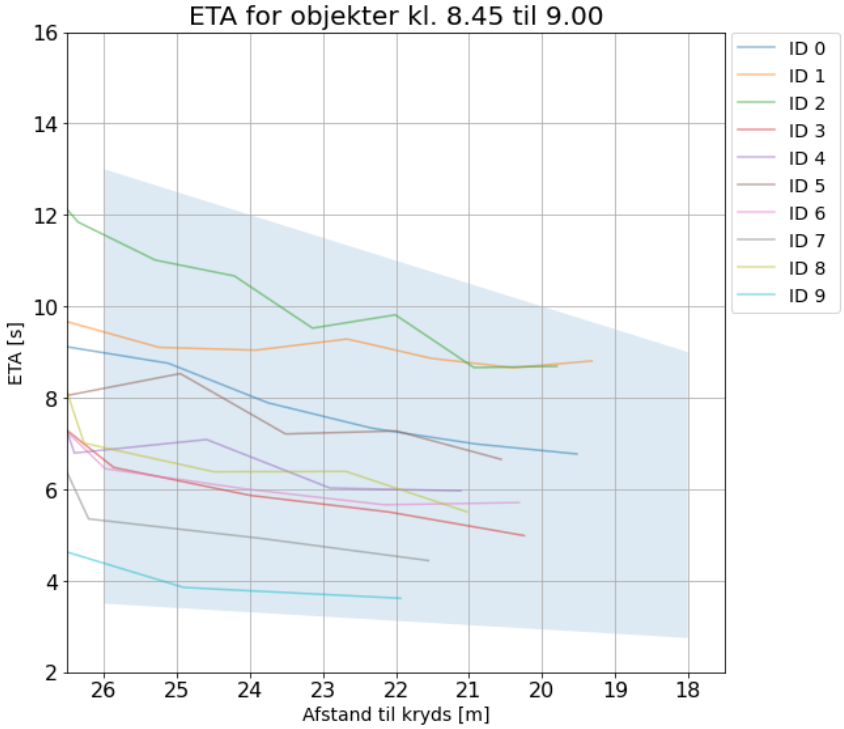
Tidssekvens 3: 8.30 - 8.45 - ETA



Figur D.6. ETA for detekterede cyklister fra 8.30 til 8.45.

Af figur D.6 ses beregnede ETA'er for de 8 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.30 til 8.45. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb er inden for dette område. Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

Tidssekvens 4: 8.45 - 9.00 - ETA

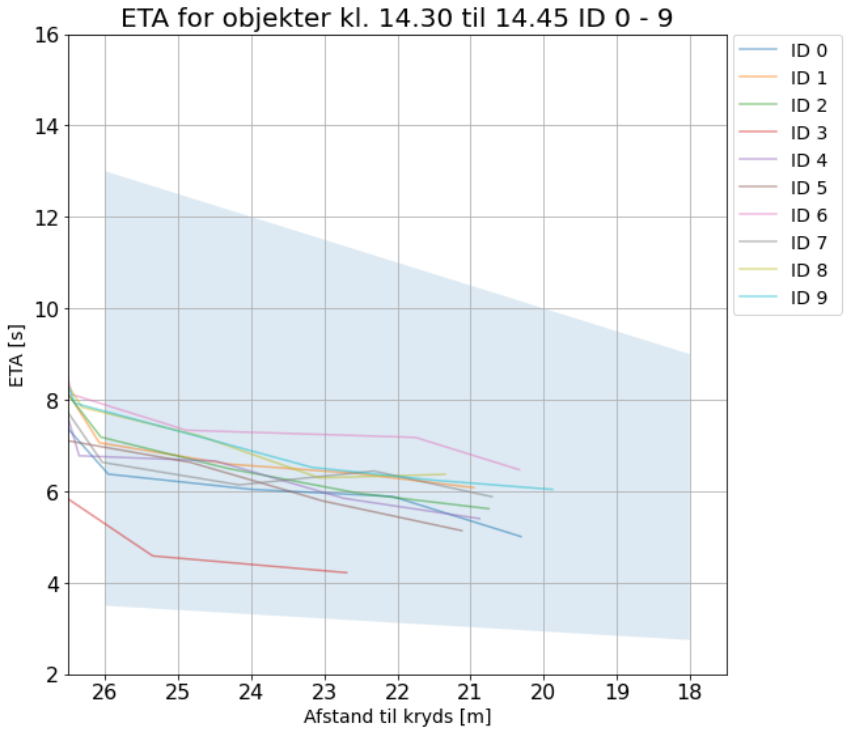


Figur D.7. ETA for detekterede cyklister fra 8.45 til 9.00.

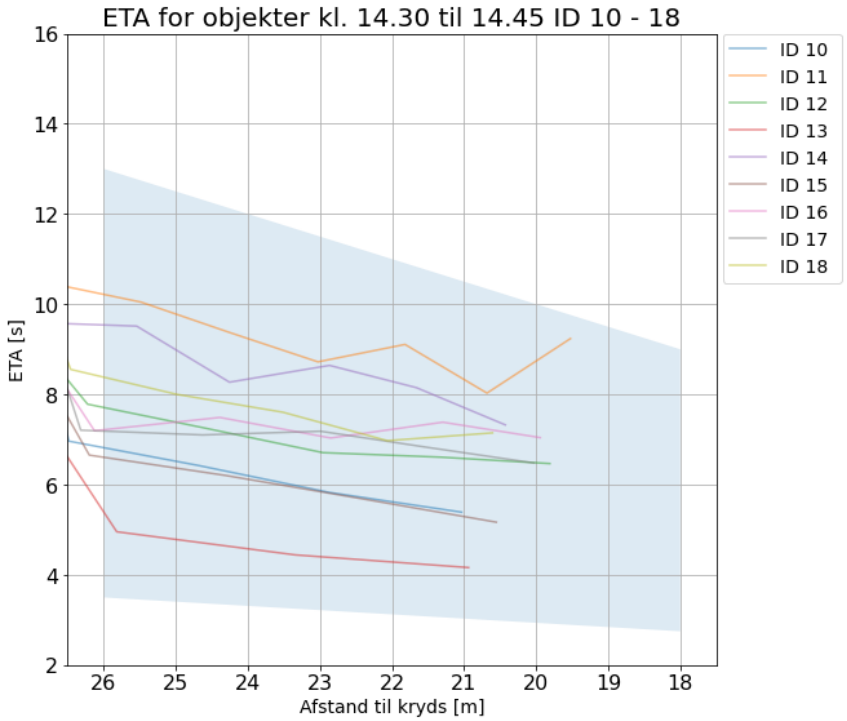
Af figur D.7 ses beregnede ETA'er for de 10 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 8.45 til 9.00. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb er inden for dette område.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

Tidssekvens 5: 14.30 - 14.45 - ETA



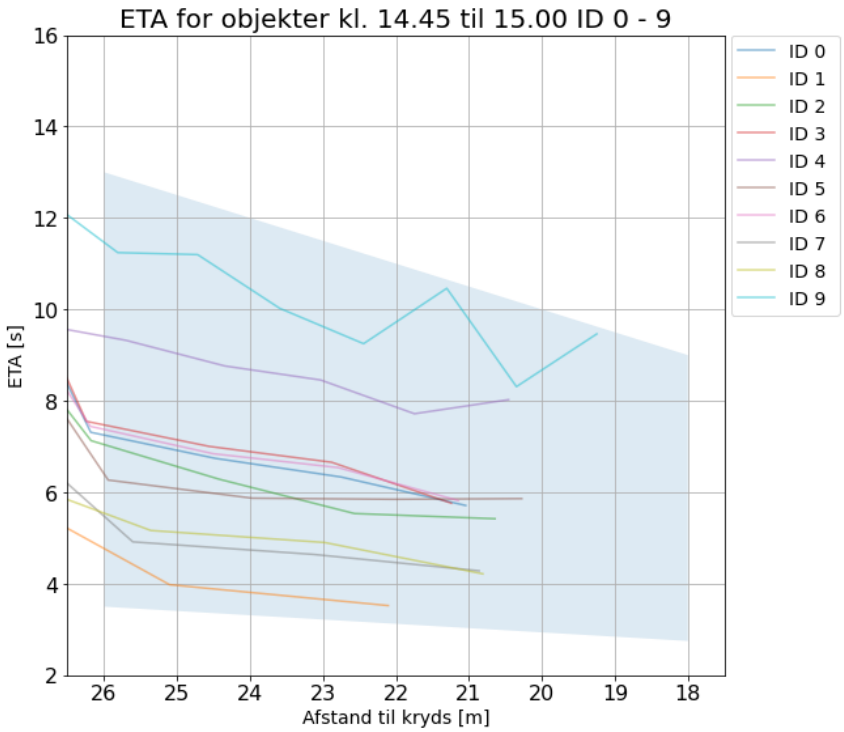
Figur D.8. ETA for detekterede cyklister fra 14.30 til 14.45 ID 0 - 9.



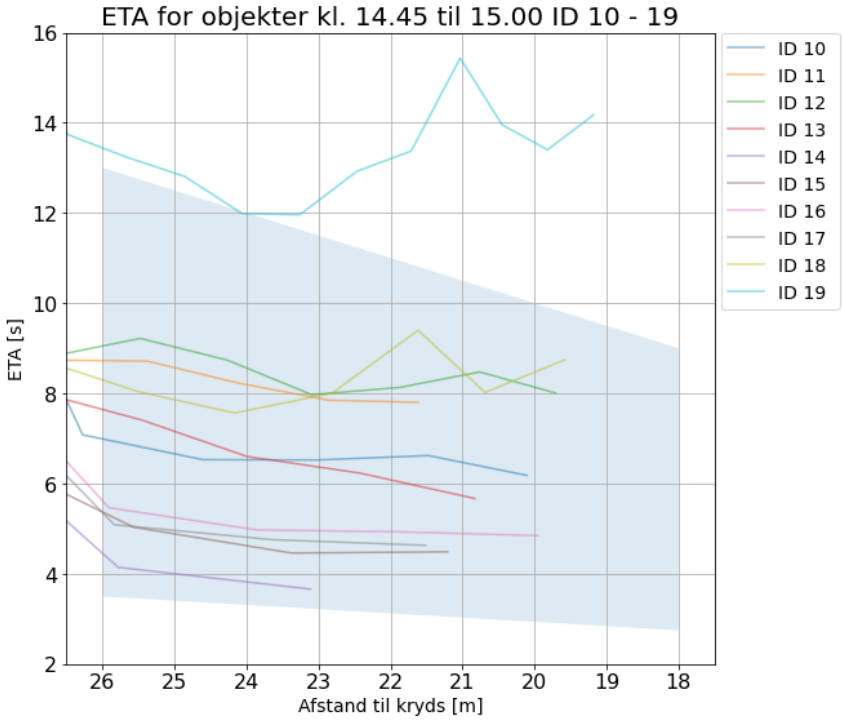
Figur D.9. ETA for detekterede cyklister fra 14.30 til 14.45 ID 10 - 18.

Af figur D.8 og D.9 ses beregnede ETA'er for de 19 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 14.30 til 14.45. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb er inden for dette område. Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

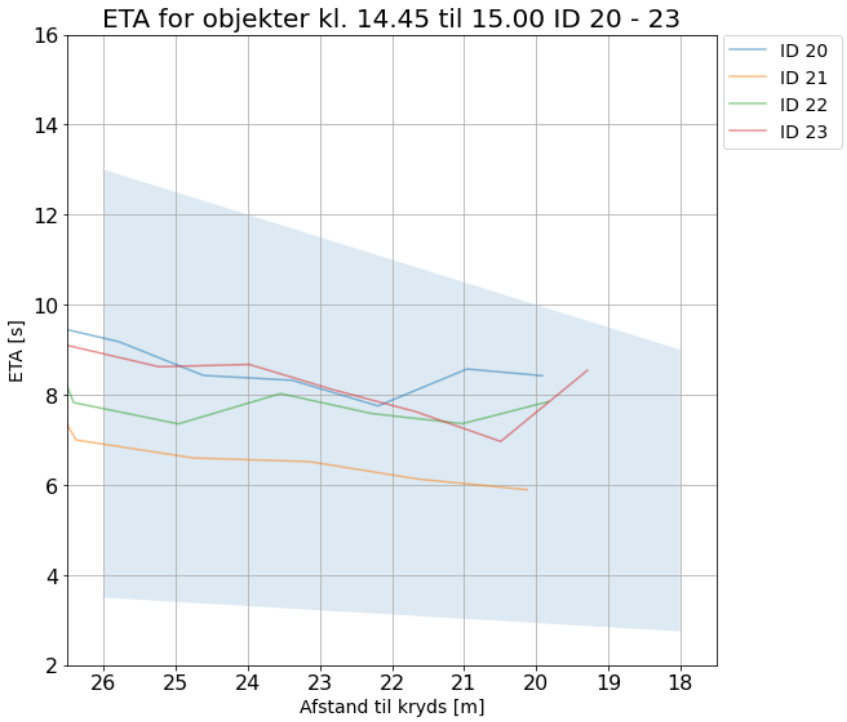
Tidssekvens 6: 14.45 - 15.00 - ETA



Figur D.10. ETA for detekterede cyklister fra 14.45 til 15.00 ID 0 - 9.



Figur D.11. ETA for detekterede cyklister fra 14.45 til 15.00 ID 10 - 19.



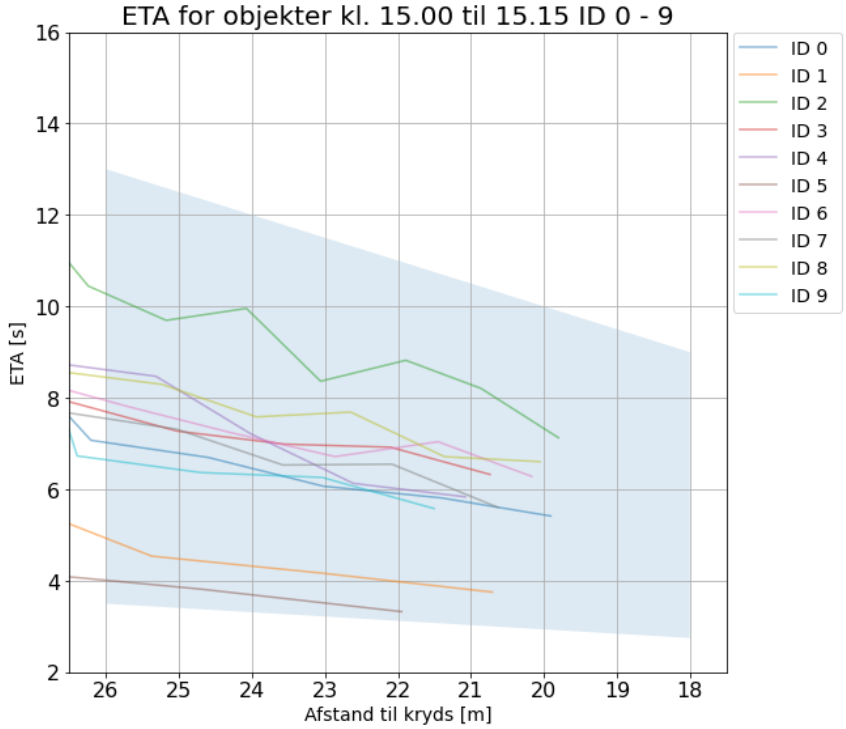
Figur D.12. ETA for detekterede cyklister fra 14.45 til 15.00 ID 20 - 23.

Af figur D.10, D.11 og D.12 ses beregnede ETA'er for de 24 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 14.45 til 15.00. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 19, er inden for dette område.

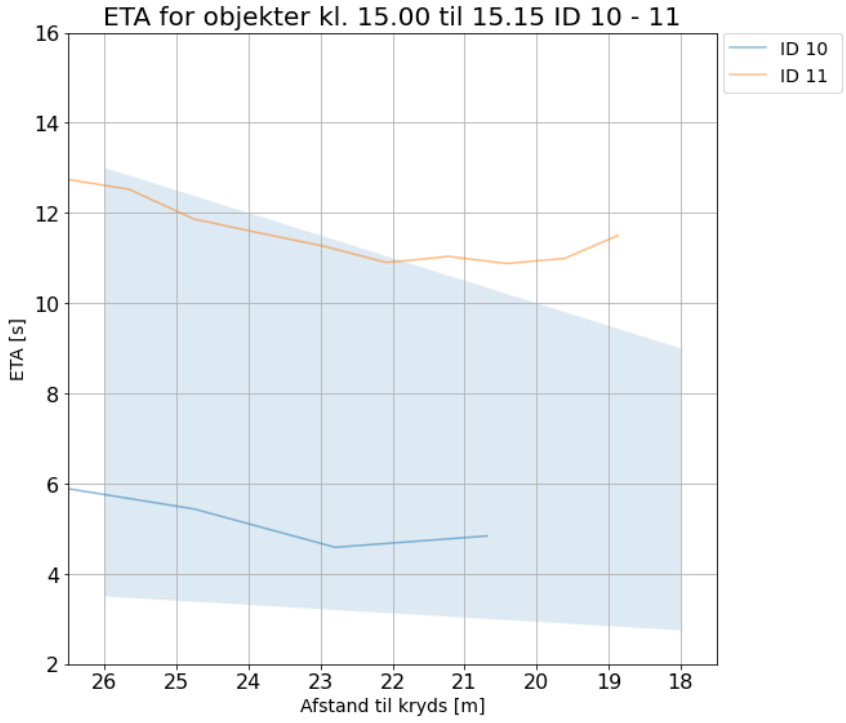
Ved kontrol af video er det fundet at ID 19 er en ladcykel der cykler langsomt frem i mod krydset og tager farten af når den nærmer sig krydset grundet rødt lys. ETA kurveforløbet for ID 19 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

Tidssekvens 7: 15.00 - 15.15 - ETA



Figur D.13. ETA for detekterede cyklister fra 15.00 til 15.15 ID 0 -9.



Figur D.14. ETA for detekterede cyklister fra 15.00 til 15.15 ID 10 - 11.

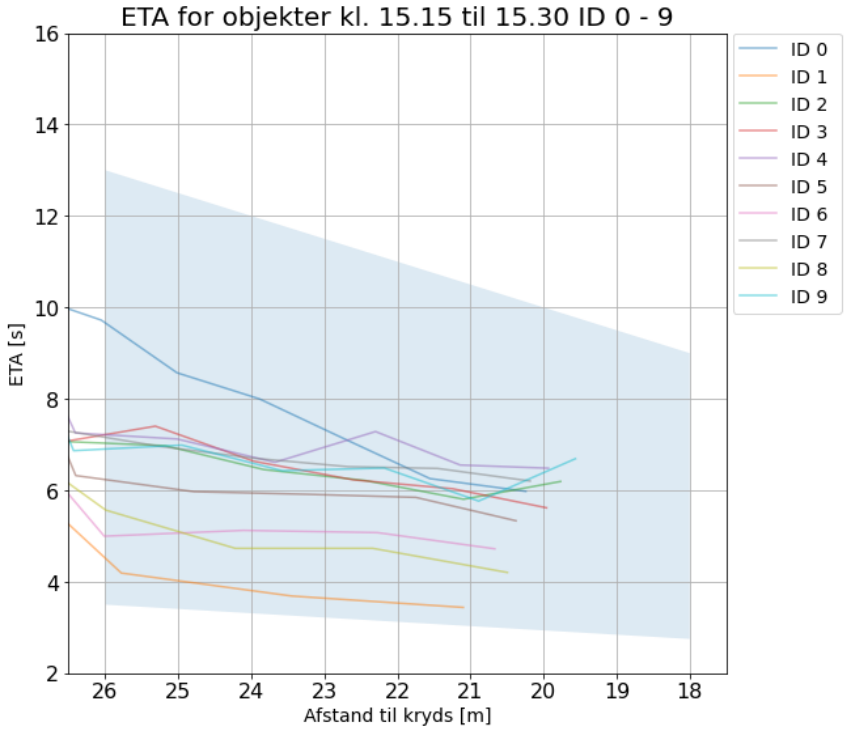
Af figur D.13 og D.14 ses beregnede ETA'er for de 12 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.00 til 15.15. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 11, er inden for dette område.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 11 cykler langsomt frem i mod krydset og tager

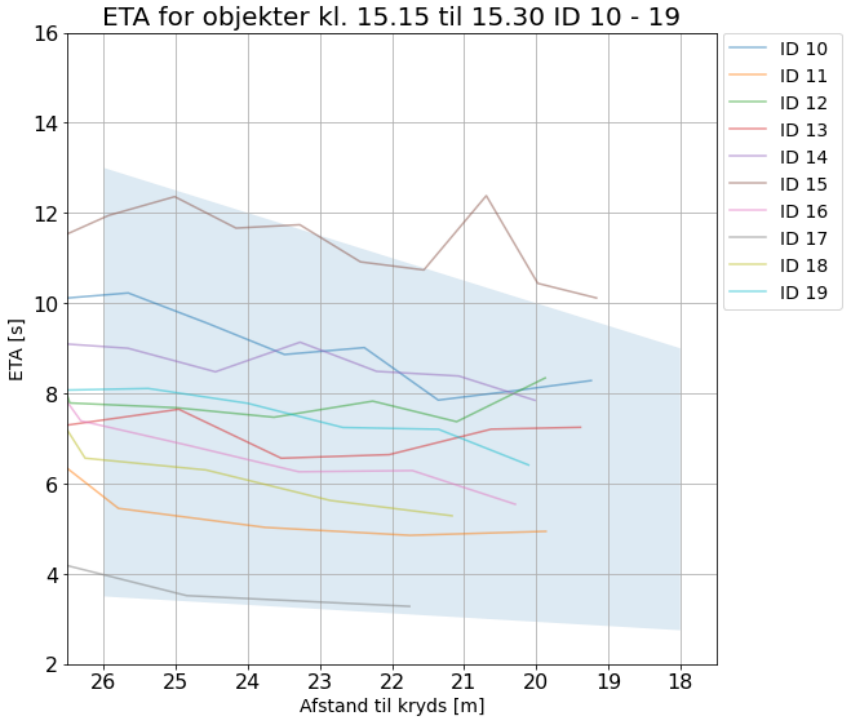
farten af når denne nærmer sig krydset grundet rødt lys. ETA kurveforløbet for ID 19 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

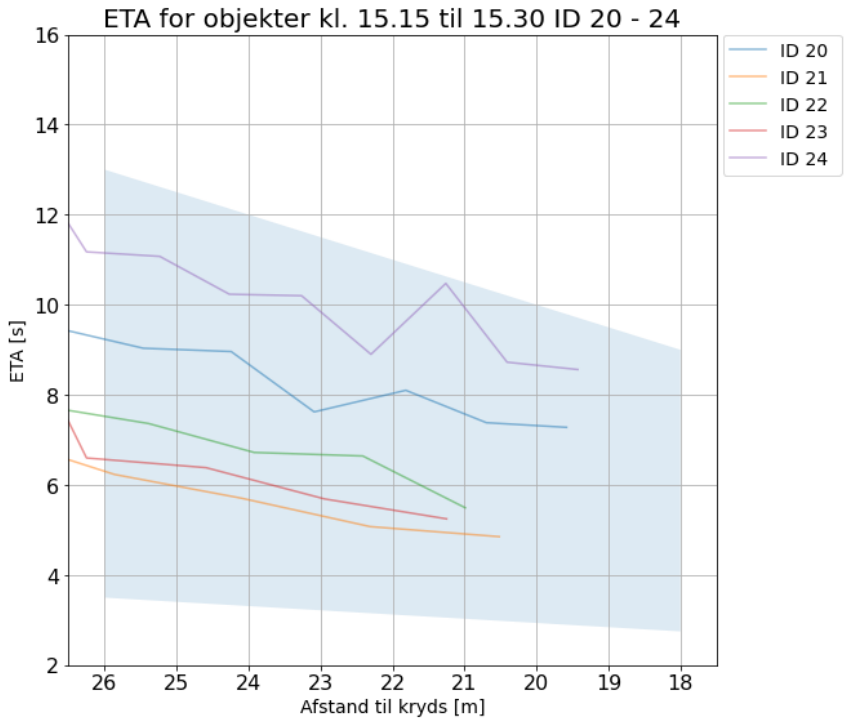
Tidssekvens 8: 15.15 - 15.30 - ETA



Figur D.15. ETA for detekterede cyklister fra 15.15 til 15.30 ID 0 - 9.



Figur D.16. ETA for detekterede cyklister fra 15.15 til 15.30 ID 10 - 19.



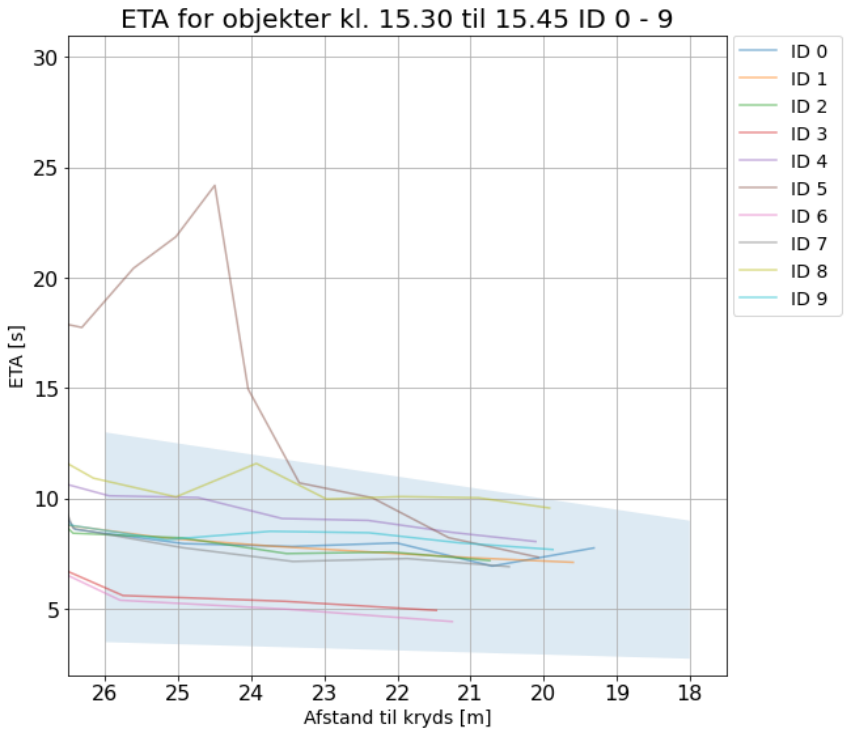
Figur D.17. ETA for detekterede cyklister fra 15.15 til 15.30 ID 20 - 24.

Af figur D.15, D.16 og D.17 ses beregnede ETA'er for de 25 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.15 til 15.30. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 15, er inden for dette område.

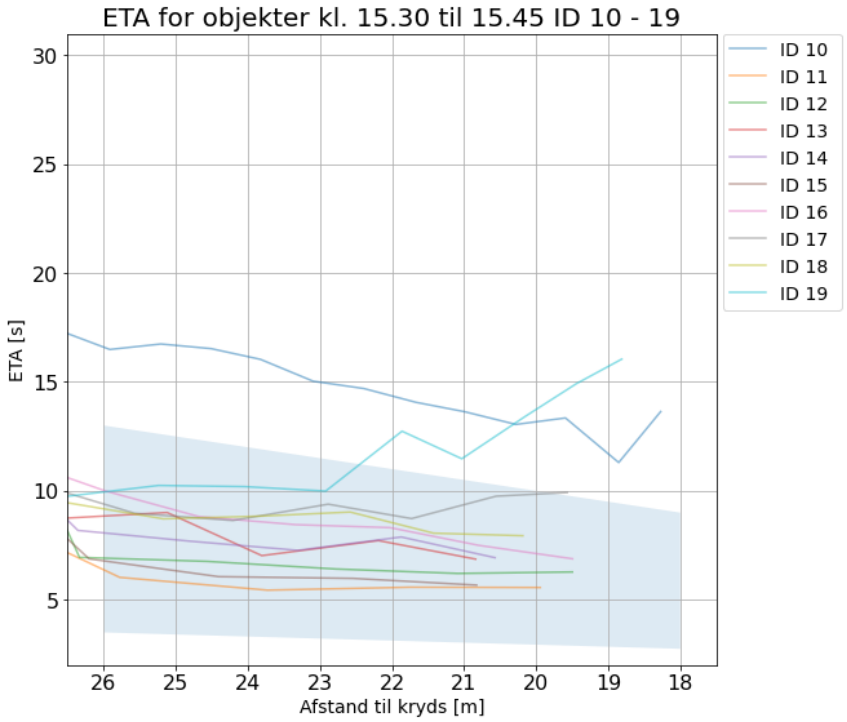
Ved kontrol af video er det fundet at ID 15 cykler langsomt frem i mod krydset og tager farten af når denne nærmer sig krydset grundet rødt lys. ETA kurveforløbet for ID 15 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

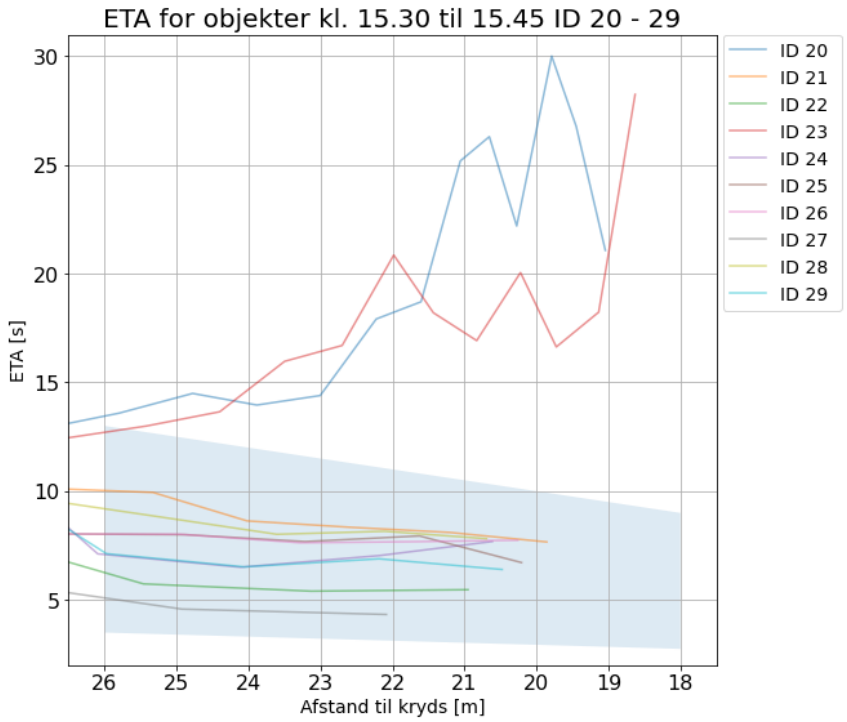
Tidssekvens 9: 15.30 - 15.45 - ETA



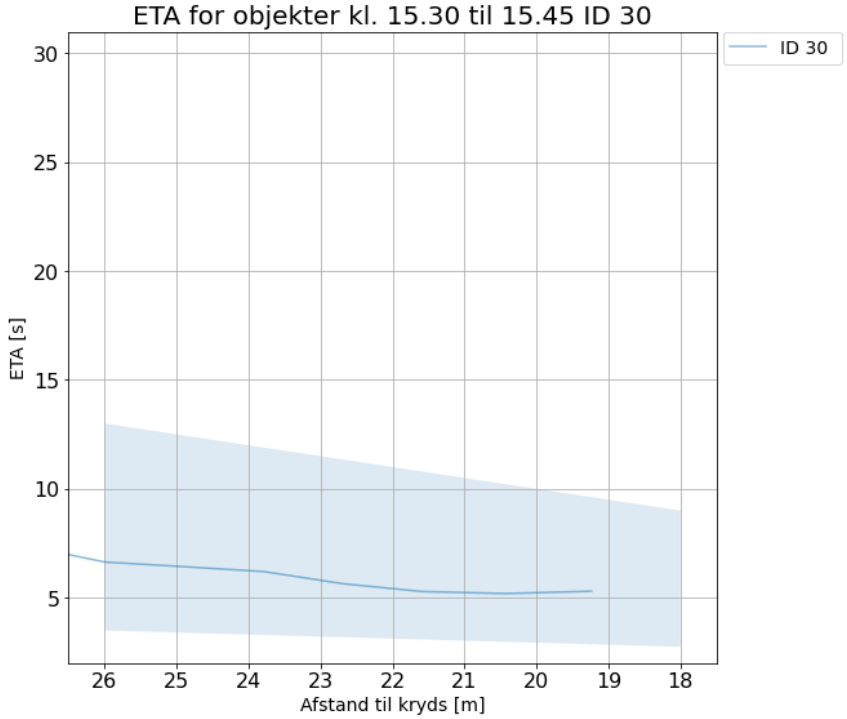
Figur D.18. ETA for detekterede cyklister fra 15.30 til 15.45 ID 0 - 9.



Figur D.19. ETA for detekterede cyklister fra 15.30 til 15.45 ID 10 - 19.



Figur D.20. ETA for detekterede cyklister fra 15.30 til 15.45 ID 20 - 29.



Figur D.21. ETA for detekterede cyklister fra 15.30 til 15.45 ID 30.

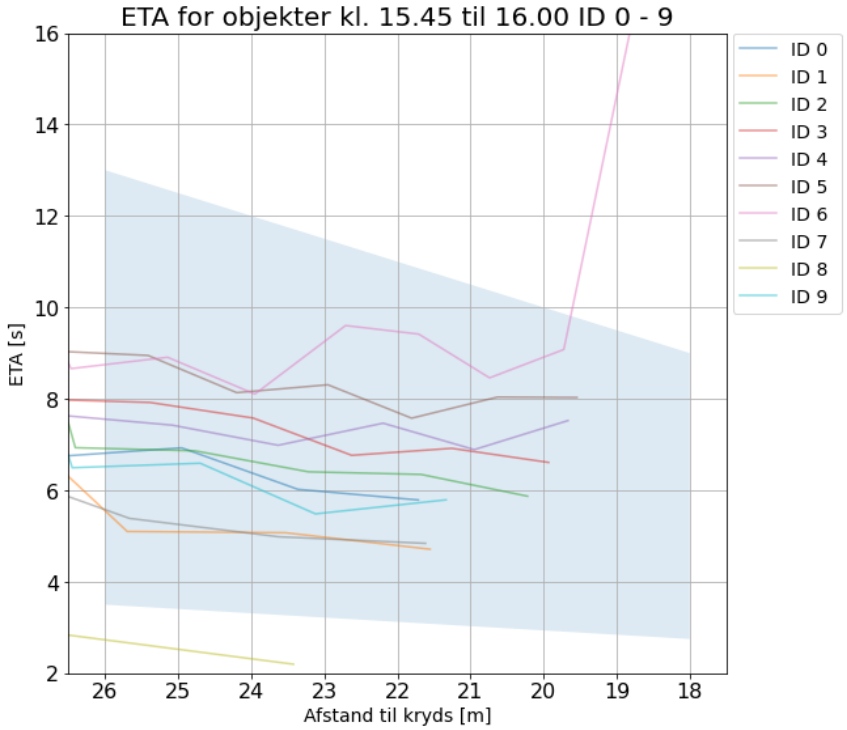
Af figur D.18, D.19, D.20 og D.21 ses beregnede ETA'er for de 31 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.30 til 15.45. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 5, 10, 19, 20 og 23, er inden for dette område.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 10, 19, 20 og 23 er langtsomtkørende cykler som tager farten af hen i mod krydset grundt rødt lys. Cyklist med ID 5 cykler langsomt ind

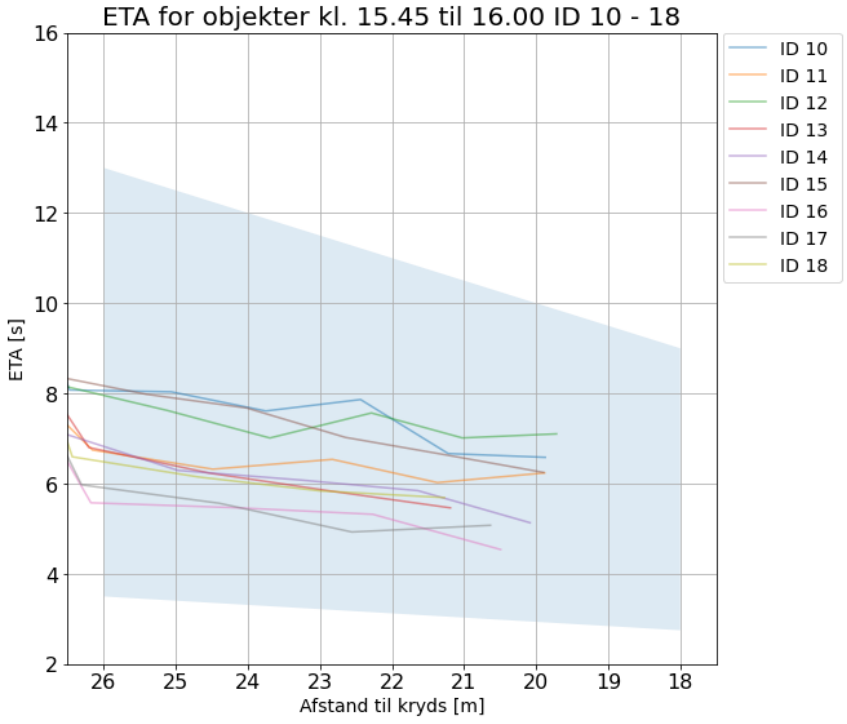
i analyseområdet og accelerer derefter ved skift til grønt lys. ETA kurveforløbet for ID 5, 10, 19, 20 og 23 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

Tidssekvens 10: 15.45 - 16.00 - ETA



Figur D.22. ETA for detekterede cyklister fra 15.45 til 16.00 ID 0 - 9.



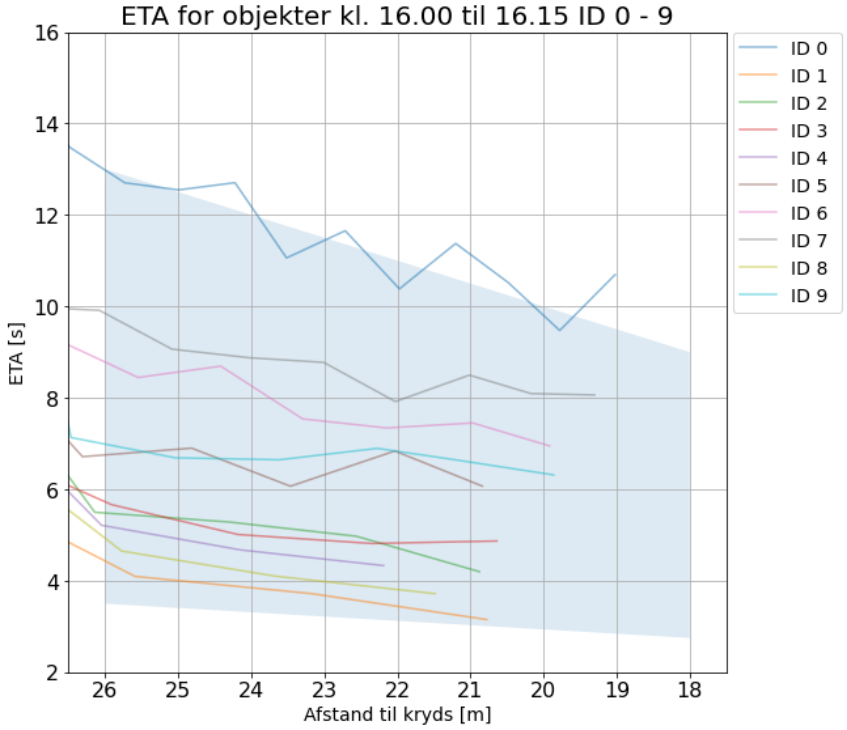
Figur D.23. ETA for detekterede cyklister fra 15.45 til 16.00 ID 10 - 18.

Af figur D.22 og D.23 ses beregnede ETA'er for de 19 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 15.45 til 16.00. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 6 og 8, er inden for dette område.

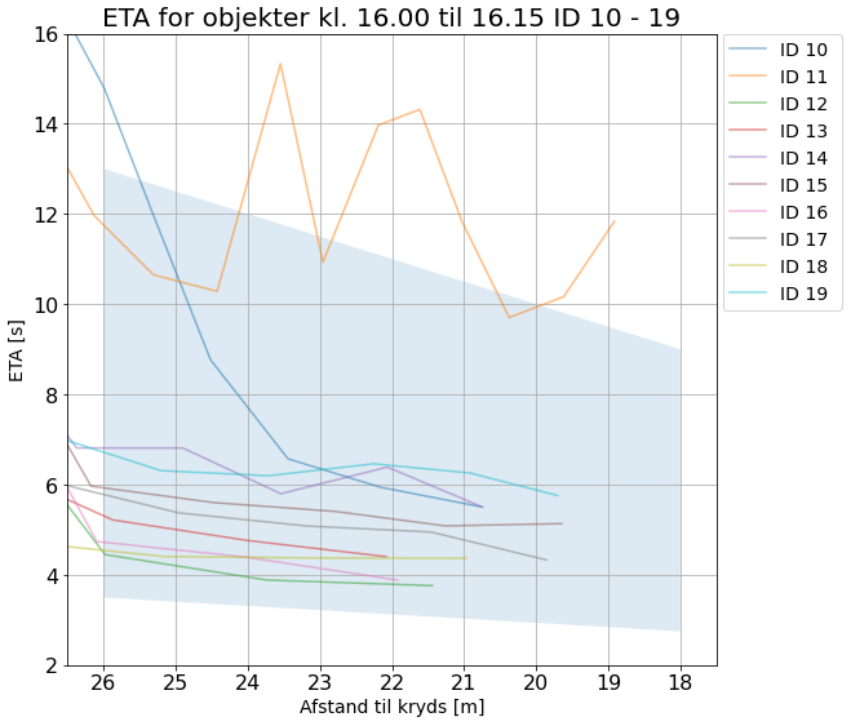
Ved kontrol af video er det fundet at ID 6 tilnærmelsesvis stopper i analyseområdet, hvilket fører til at ETA stiger kraftigt. ID 8 er en knallert og en lavere ETA er derfor forventet. ETA kurveforløbet for ID 6 og 8 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

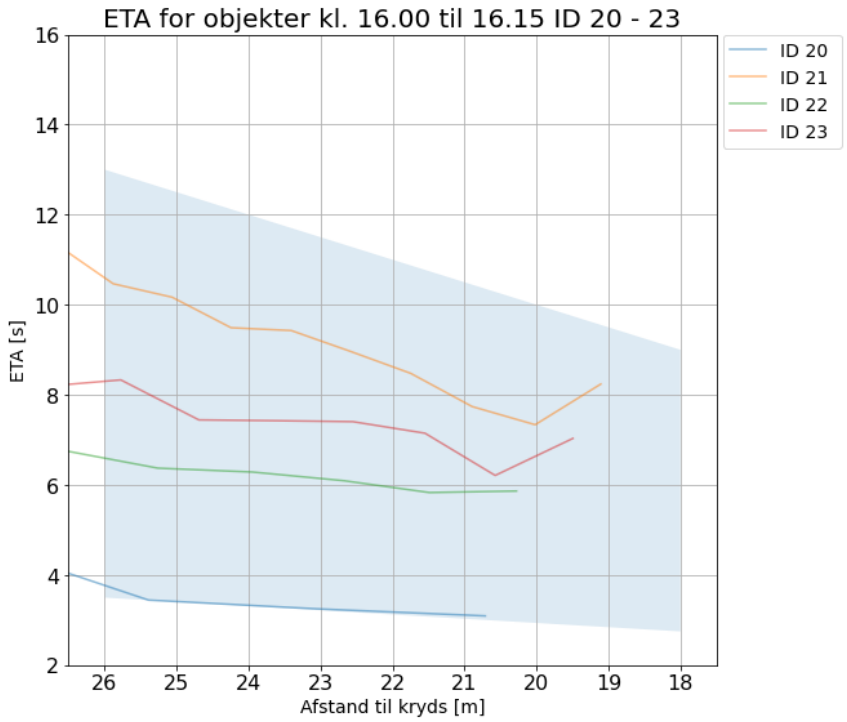
Tidssekvens 11: 16.00 - 16.15 - ETA



Figur D.24. ETA for detekterede cyklister fra 16.00 til 16.15 ID 0 - 9.



Figur D.25. ETA for detekterede cyklister fra 16.00 til 16.15 ID 10 - 19.



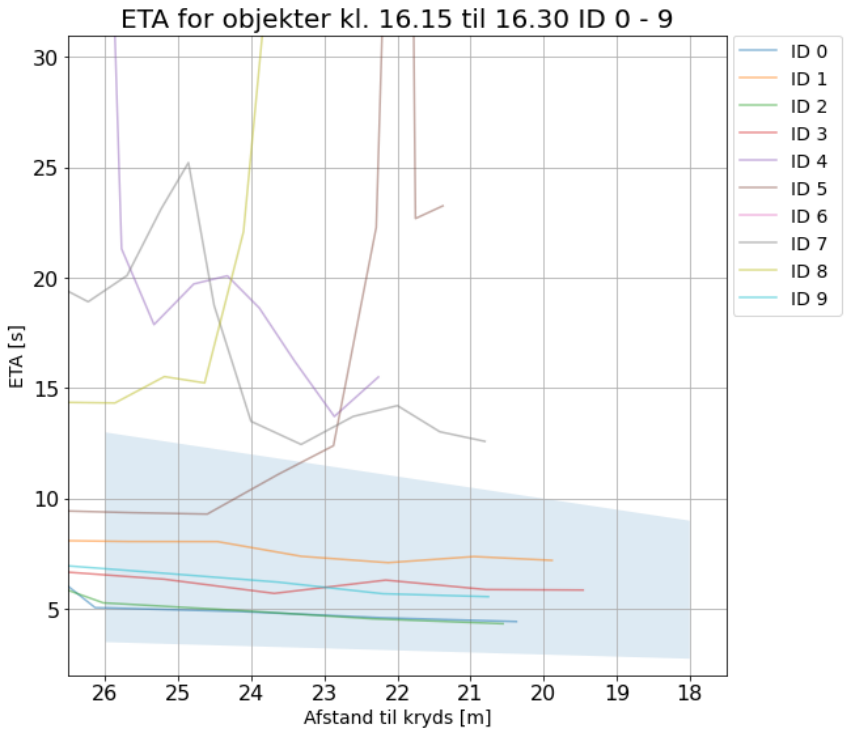
Figur D.26. ETA for detekterede cyklister fra 16.00 til 16.15 ID 20 - 23.

Af figur D.24, D.25 og D.26 ses beregnede ETA'er for de 24 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 16.00 til 16.15. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 0, 10, 11 og 20, er inden for dette område.

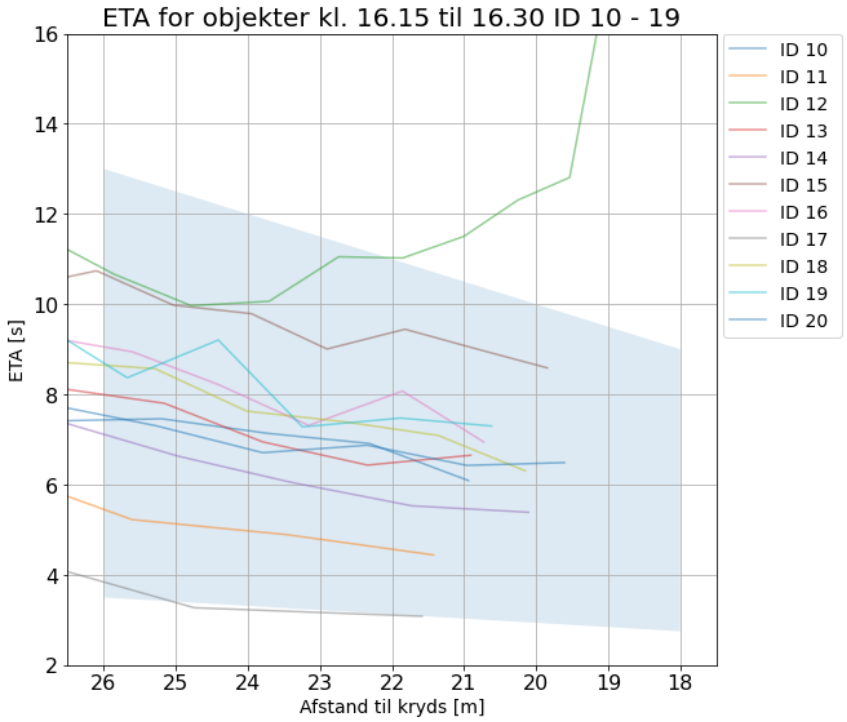
Ved kontrol af video er det fundet at ID 0 og 11 er langsomtkørende cyklister der kører langsomt frem i mod kryds grundet rødt lys. ID 10 kører langsomt ind i analyseområdet og accelerer derefter grundt skift til grønt lys. ID 20 er en hurtigt cyklende person på en racercykel. ETA kurveforløb for ID 0, 10, 11 og 20 stemmer overens med dette.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.

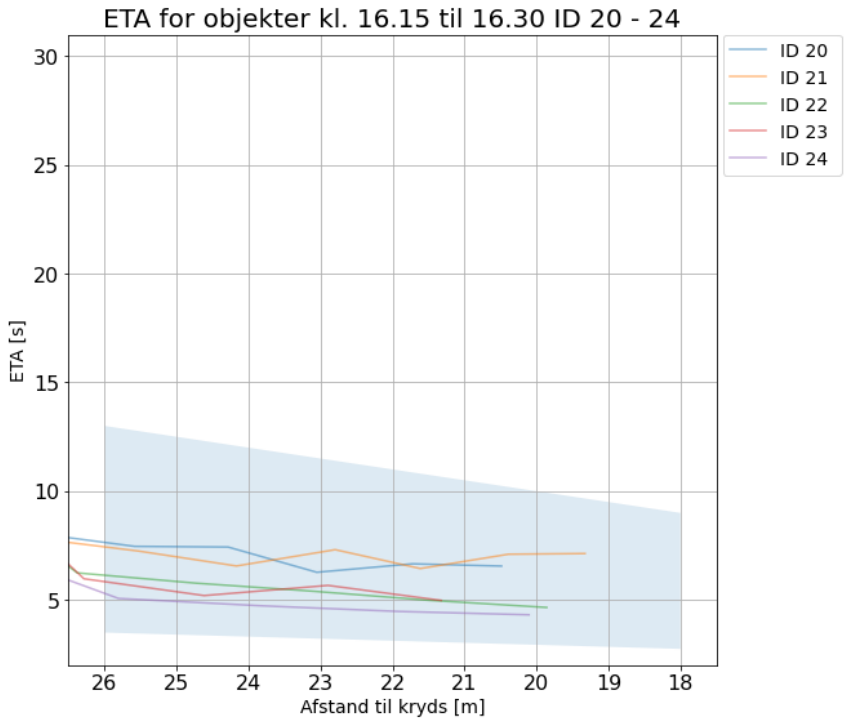
Tidssekvens 12: 16.15 - 16.30 - ETA



Figur D.27. ETA for detekterede cyklister fra 16.15 til 16.30 ID 0 - 9.



Figur D.28. ETA for detekterede cyklister fra 16.15 til 16.30 ID 10 - 19.



Figur D.29. ETA for detekterede cyklister fra 16.15 til 16.30 ID 20 - 24.

Af figur D.27, D.28 og D.29 ses beregnede ETA'er for de 25 cyklister der er detekteret i tidssekvensen 16.15 til 16.30. Acceptområde for kurveforløb er vist med lyseblå og alle kurveforløb, undtagen ID 4, 5, 6, 7, 8, 12 og 17 er inden for dette område.

Ved kontrol af video er det fundet at ID 4, 7 og 8 stopper inden for analyseområdet og vinker til kameraet. At stoppe indenfor analyseområdet gør at beregnet ETA går mod uendeligt. ID 5 er en langsomtkørende cyklist der tilnærmelsesvis stopper. ID 6 er en fejldetektering af ID 4 og 7, hvor disse er kørt tæt og ID 6 er kun detekteret i 2 frames. ID 12 tager farten af hen i mod krydset og kommer til standsning inden for analyseområdet. ETA kurveforløb for ID 4, 5, 7, 8 og 12 stemmer overens med dette. ID 6 er en fejldetektering og der kan ikke beregnes en ETA for denne.

Alle ETA kurveforløb i tidssekvensen, undtagen ID 6, er korrekte og retvisende for den reelle bevægelse af cyklisterne.