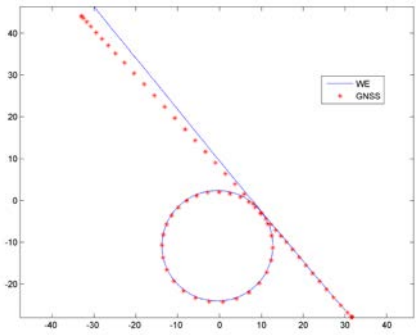
MOBILE LASERSCANNING WHEEL ENCODERS GNSS IMU POSITIONERING LASERSCANNING

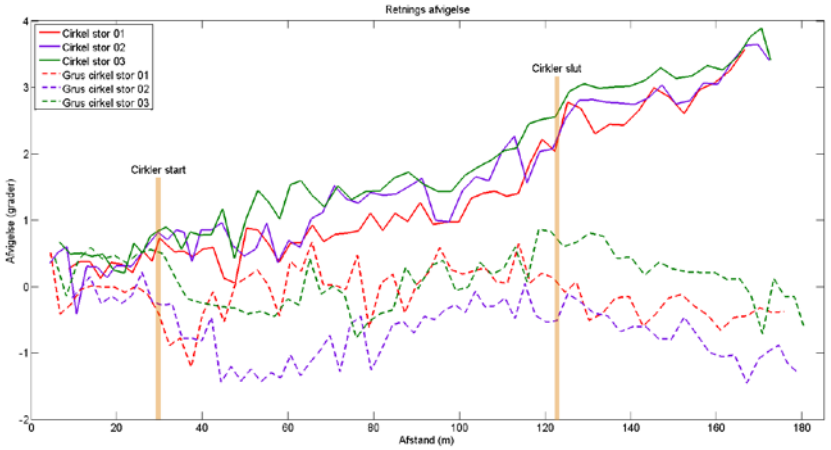
Wheel encoders som positioneringsinstrument

- med udgangspunkt i positionering af mobil laserscanner uden GNSS









Aalborg Universitet
Institut for Planlægning
Landinspektøruddannelsens 10. semester MS
Gruppe land10ms_aal02
7. juni 2012

Institut for Planlægning
Landinspektøruddannelsen 10. semester,
Measurement Science
Aalborg Universitet
Fibigerstræde 11
9220 Aalborg Ø
Tlf.: +45 9635 8341
http://www.lsn.aau.dk

Titel:
Wheel encoders som positioneringsinstrument

Undertitel:
- med udgangspunkt i positionering af mobil laserscanner uden GNSS

Projektperiode:
10. semester
1. februar 2012 - 7. juni 2012

Projektgruppe:
land10ms_aal02

Deltagere:

Daniel Philip Holt

Jonas Lassen Jensen

Sven Møller Heinrichs

Hovedvejleder:
Jens Peter Cederholm

Bivejleder:
Karsten Jensen

Oplagsantal: 6

Sideantal: 97 (145 inklusiv Appendiks)

Bilagsantal: 1 CD

Afsluttet: 7. juni 2012

Synopsis:

Udgangspunktet for denne rapport har været positionering af en mobil laserscanner under GNSS-udfald.

I foranalysen blev vægten lagt på at klarlægge hvorledes positionering normalvis vil blive foretaget af en mobil laserscanner, som udgangssystem blev TOPCON IP-S2 HD anvendt. Foranalysen viste at positionering blev foretaget vha. IMU og Wheel Encoders (WE) under GNSS-udfald. Da projektgruppen tidligere har beskæftiget sig med positionering med IMU, blev det valgt at arbejde videre med WE'er. Det blev undersøgt hvorledes der kan positioners med WE'er og det blev klarlagt, at der kun i begrænset omfang er lavet undersøgelser, som har set på WE'er som positioneringsenhed for et bil-lignende køretøj. På baggrund af dette blev følgende problemformulering opstillet:
"*Hvilke styrker og svagheder findes ved brug af WE'er til positionering?*"

Der blev dertil opstillet et underspørgsmål:
"*Kan teserne om hvornår WE'erne har betydning for positionering med IMU eftervises i TOPCON's system?*"

I Problemanalysen blev vægten først lagt på at klarlægge fejlkilder og udvidet positioneringsalgoritme samt opstille en metode til kalibrering af hjulomkreds og hjulafstand. For at efterprøve indflydelsen af fejlkilderne og kalibreringsmetoden blev der planlagt og gennemført en række tests. Resultatet af disse tests viste umiddelbart at WE'ernes styrke ligger i positionering ved kørsel uden sving.

For at besvare underspørgsmålet og efterprøve styrken blev der opstillet tests til TOPCON's system. Resultatet af disse tests understøttede tesen om WE'ernes styrke, men viste ligeledes at de i det specifikke system blev anvendt til at angive for systemet, hvorvidt det var stationært eller i bevægelse.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Department of Development and Planning
M.Sc. in Measurement Science, 10^{th} semester
Aalborg University
Fibigerstræde 11
9220 Aalborg Ø
Tlf.: +45 9635 8341
http://www.lsn.aau.dk

Title:
Wheel Encoders as Positioning Instrument

Subtitle:
- With Basis in Positioning of a Mobile Laser-scanner Without GNSS

Projectperiod:
10^{th} semester
February 1^{st} 2012 - June 7^{th} 2012

Projectgroup:
land10ms_aal02

Participants:

Daniel Philip Holt

Jonas Lassen Jensen

Sven Møller Heinrichs

Main Supervisor:
Jens Peter Cederholm

Supervisor:
Karsten Jensen

Circulation: 6

Pages: 97 (145 including Appendix)

Enclosures: 1 CD

Completed: June 7^{th} 2012

Abstract:

This basis for this rapport has been positioning of a mobile laser scanner (MLS) with GNSS outtakes.

In the initial analysis the focus was put on how positioning is normally carried out for a MLS, as reference system TOPCON IP-S2 HD was used. The initial analysis showed that positioning was done by IMU and Wheel Encoders (WE) during GNSS outtakes. Since the project group has worked with IMU previously it was chosen to examine WE further. It was studied how it is possible to get positions with WE. It was clarified that there has not been done extensive studies into using WE as a positioning unit for a car-like vehicle. On these grounds the following research question was formulated:
"*Which strengths and weaknesses is there when using WE for positioning?*"

Furthermore the following sub question was formulated:
"*Can the thesis's about when WE got significance for positioning with IMU be shown in TOPCON's system?*"

In the problem analysis the weight was put on first to determine the error sources and an expanded positioning algorithm and also to propose a method for calibration of wheel circumference and base. To determine the influence of the error sources and the calibration method, a number of tests were planned and carried out. The result of these tests showed that offhand the strengths of the WE lies in positioning when driving without turning.

To answer the sub question and verify the strength tests were set up for TOPCON's system. The result of these tests supported the thesis about the strength of the WE, but it also showed that in the specific system they were used to indicate if the car was stationary or moving.

The report content is freely accessible, but publication of the report (with source) may only be made by agreement with the authors.

Forord

Denne rapport er udarbejdet i perioden fra d. 1. februar 2012 til d. 7. juni 2012 af gruppe *land10ms_aal02* på Landinspektøruddannelsens 10. semester på Measurement Science specialiseringen ved Aalborg Universitet. Rapportens indhold henvender sig til personer med kendskab til mobil laserscanning og positionering i bred forstand. Rapporten har fokus på positionering af mobile kortlægningsinstrumenter.

Projektgruppen beskæftigede sig på 1. semester af Landinspektøruddannelsens Measurement Science specialisering med positionering med IMU og integration af inklinometre. På 2. semester blev en laserscanners funktion undersøgt, når denne blev udsat for bevægelse. Dette har projektgruppen valgt at samle op og arbejde videre med i forbindelse med specialet. Efter at have fået kendskab til laserscanning er projektgruppen blevet bekendt med en mobil laserscanner (MLS), hvilket er et relativt nyt instrument inden for laserscanningsområdet. En MLS er kort beskrevet en laserscanner monteret på en mobil enhed, oftest en bil, og tilknyttet flere positioneringsenheder såsom GNSS og IMU.

I forbindelse med projektarbejdet er der modtaget uundværlig hjælp og vejledning fra en række personer, hvem der her rettes en tak til:

- *Kristian Keller, COWI A/S, for idé-pitching og udlån af COWI's Mobile Laserscanner.*
- *Henrik Vad Jensen, for udlån af smallPOS II positioneringssystem.*
- *Anders Otte, for hjælp i forbindelse med den praktiske udførelse af test.*

I rapporten kan der forekomme anvendelse af engelske udtryk, da det er vurderet, at en oversættelse ikke vil have samme betydning eller at der ikke findes danske udtryk herfor.
Der anvendes "punktum"som decimalseparator i stedet for "komma".

Kildehenvisninger er angivet efter Harvard metoden. Det vil sige med forfatterens efternavn, årstal for udgivelse og eventuelt sidetal angivet i kantede parenteser, som vist af dette eksempel [Jensen 2004, s.43]. Ved referencer til hjemmesider angives et fortløbende nummer i kantede parenteser, som for eksempel [3], der henviser til et tilsvarende i kildelisten, hvor de forskellige hjemmesider er alfabetisk ordnet efter sidens ejer.

Figurer, ligninger og tabeller er nummereret fortløbende i hvert kapitel, f.eks. angives figur 10 i kapitel 6, som 'figur 6.10'.

Gennem projektet benyttes to udtryk for spredning; standard afvigelse (std. dev.) og punktspredning (σ_P):

$$Std.dev. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(r_i - \overline{r})^2}{n-1}} \tag{1}$$

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}{2}} \tag{2}$$

[Borre, K., 1993]

En række ord anvendes særligt hyppigt i rapporten hvorfor disse forkortes jf. nedenstående liste:

- IMU = Inertial Measurement Unit
- MLS = Mobil LaserScanner
- WE = Wheel Encoder

Indhold

1 Indledning **1**
1.1 Initierende problemstilling 2

2 Foranalyse **7**
2.1 Positionering af MLS 8
2.1.1 Under optimale GNSS forhold 8
2.1.2 Under ikke-optimale GNSS forhold 9
2.1.3 Under ikke-optimale GNSS forhold, uden WE'er 10
2.1.4 Afrunding 10
2.2 Wheel encoders 10
2.2.1 Odometri 11
2.2.2 Eksempel på positionering fra WE-data 14
2.2.3 2D/3D problematik 14

3 Problemformulering **17**

4 Metode **19**

I Wheel Encoder **21**

5 Problemanalyse **23**
5.1 Sensor 23
5.1.1 Teknisk beskrivelse 23
5.1.2 Montering og smallPOS II 24
5.2 Dataopsamling 26
5.3 Fejlkilder 26
5.3.1 Fejl på hjulomkreds 27
5.3.2 Fejl på hjulafstand 28
5.3.3 Hjulspind 29
5.3.4 Skridning 29
5.3.5 Ujævn overflade 30
5.3.6 Dæktryk 30
5.3.7 Dækslid 32
5.4 Kalibrering 33
5.4.1 Kalibrering af hjulomkreds 34

5.4.2 Kalibrering af hjulafstand . . . 40
5.5 Beregningsmetode til positionering . . . 43
5.6 Databehandling . . . 46

6 Opsummering og opstilling af test **47**

7 Test **51**
7.1 Planlægning af test . . . 51
7.1.1 Cirkler . . . 51
7.1.2 Lige vej . . . 52
7.2 Praktisk udførelse . . . 52
7.2.1 Cirkler på vej med fast belægning . . . 53
7.2.2 Cirkler på vej med grusbelægning . . . 53
7.2.3 Kørsel på lige vej med jævn overflade . . . 56
7.2.4 Kørsel på lige vej med ujævn overflade . . . 57
7.3 Præsentation af resultater . . . 58
7.3.1 Cirkler på vej med fast belægning . . . 58
7.3.2 Cirkler på vej med grusbelægning . . . 63
7.3.3 Kørsel på lige vej med jævn overflade . . . 66
7.3.4 Kørsel på lige vej med ujævn overflade . . . 68
7.4 Sammenligning og vurdering . . . 70
7.5 Afrunding - opstilling af teser for Del II . . . 75

II TOPCON IP-S2 HD **77**

8 Test **79**
8.1 Planlægning af test . . . 79
8.1.1 Simulering af udfald . . . 79
8.1.2 Egen GNSS-reference . . . 80
8.1.3 Opstilling af test . . . 82
8.1.4 Vurderingsgrundlag . . . 82
8.2 Praktisk udførelse . . . 83

9 Resultater **85**
9.1 Præsentation af resultater . . . 85
9.1.1 Med IMU og WE . . . 85
9.1.2 Med IMU uden WE . . . 87
9.2 Vurdering af resultater . . . 88

10 Konklusion **91**

11 Perspektivering **93**

Kildeliste **95**

III Appendiks **1**

A Bilags CD - struktur **3**

B Opbygning af TOPCON IP-S2 HD **5**
B.1 Laserscanner . . . 6
B.2 Kameraer . . . 6
B.3 Positioneringsenheder . . . 7
B.3.1 GNSS-modtager . . . 7
B.3.2 IMU . . . 7
B.3.3 Odometre . . . 7

C smallPOS II **9**
C.1 WE (Heidenhain ROD 420) . . . 9
C.2 Ashtech GPS-modtager, MEMS gyro og MEMS accelerometre . . . 11
C.3 Opsætning af smallPOS II's DIP switch . . . 12

D Specifikationer for Leica TCR 1205+ og RX1210T **13**
D.1 Leica TCR 1205+ . . . 13
D.2 Leica RX1210T . . . 13

E MATLAB-scripts **15**
E.1 smallpos_wepos_circjust.m . . . 15
E.2 kalib_hjulomk.m . . . 22
E.3 kalib_hjulomk_gnss.m . . . 24
E.4 kalib_hjulafstand.m . . . 27
E.5 test_we.m . . . 31
E.6 topcon_test.m . . . 34

F Resultatfiler **45**
F.1 Kalibrering af hjulomkreds . . . 45
F.1.1 20120409 med totalstation . . . 45
F.1.2 20120502 med GNSS . . . 46
F.1.3 20120507 med GNSS . . . 46
F.2 Kalibrering af hjulafstand . . . 47
F.2.1 20120409 . . . 47
F.2.2 20120502 . . . 47
F.2.3 20120507 . . . 48

Indledning 1

Mobil laserscanning er en relativ ny gren indenfor udstyr til mobil kortlægning – en af de første, TruckMAP™kom på markedet i 1995 [Ellum et al., 2002]. Den mobile kortlægning anvendes i dag i mange sammenhænge, hvor den mest kendte er Google Streetview, hvor 3D-modeller skabes af billeder. Forskellen på Googles Streetview og mobil laserscanning ligger i målfasthed. Med en mobil laserscanner (MLS) fås en punktsky, der er målfast, og georeferede billeder, se figur 1.1, mens Google Streetview derimod består af billeder uden bagvedliggende punktsky.



Figur 1.1 – Punktsky med tilhørende billede.



Figur 1.2 – Punktsky af karrebygninger. Venstre side er rå punktsky fra laserscanning og højre side er punktskyen farvelagt med RGB-farver fra billeder.

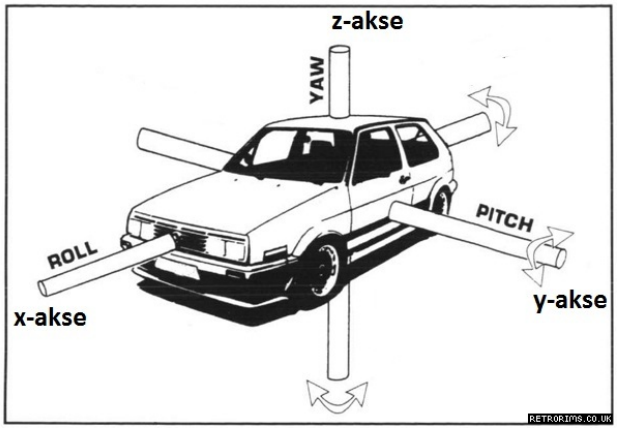
Laserscanning i dag er kendt ved den terrestriske løsning, hvor laserscanneren opstilles på trefod, og kan sammenlignes med reflektorløs afstandsmåling med totalstation. Hvor totalstationen kan foretage en måling med sekunders mellemrum, kan en laserscanner måle op mod 1.333 mio. punkter per sekund afhængig af instrument[1], intensitet af refleksion og vinkel fra retursignal. Hver måling resulterer i et punkt med tre koordinater (x,y,z), og er således en hurtig og nyttig løsning til at lave 3D-modeller af f.eks. bygninger, se figur 1.2. En anden anvendelse er til dokumentation af forholdene i et område forud for vejudvidelse, anlægsarbejde eller renovering.

En anden væsentlig styrke er større sikkerhed for personalet ved opmåling af eksempelvis bygninger, veje, motorvejsbroer eller andre større anlæg foretaget med MLS. Det

[1] Laserscanneren som projektgruppen arbejder med er i stand til at optage op til 1.333 mio. punkter per sekund, jf. appendiks B

er ikke nødvendigt at afspærre veje og operere i rabatten af en motorvej, da opmåling kan ske i bevægelse med den øvrige trafik.

Mobil laserscanning adskiller sig ved at være i bevægelse mens der scannes. Ligesom ved terrestrisk laserscanning og totalstationsmåling skal målingerne knyttes op på et koordinatsystem. Når en MLS er under bevægelse skal positionen løbende opdateres, hvilket gøres ved en kombination af forskellige instrumenter og sensorer. Der benyttes en GNSS-modtager til at give absolutte koordinater og en IMU måler ændring i orientering og acceleration i forhold til køretøjets tre akser, se figur 1.3.



Figur 1.3 – Med køretøjets tre akser forstås x-, y- og z-akserne, der bestemmes af IMU'en. ©Retrorims.co.uk

I et MLS system findes ligeledes kameraer, som også orienteres ved hjælp af GNSS- og IMU observationer. Billeder kan dermed enten bruges til at farvelægge punktskyen, hvor hvert punkt fra laserscanningen får en farvekode fra pixels i billedet eller billedet lægges i sin helhed ind på punktskyen, jf. figur 1.1 og 1.2.

Generelt består MLS systemer af en laserscanner og en GNSS-modtager, derudover varierer det om der også findes IMU, inklinometre, hastighedssensor og WE'er. Tabel 1.1 på modstående side viser en oversigt over forskellige MLS systemer, hvor det ses at de anvendte sensorer udover GNSS varierer.

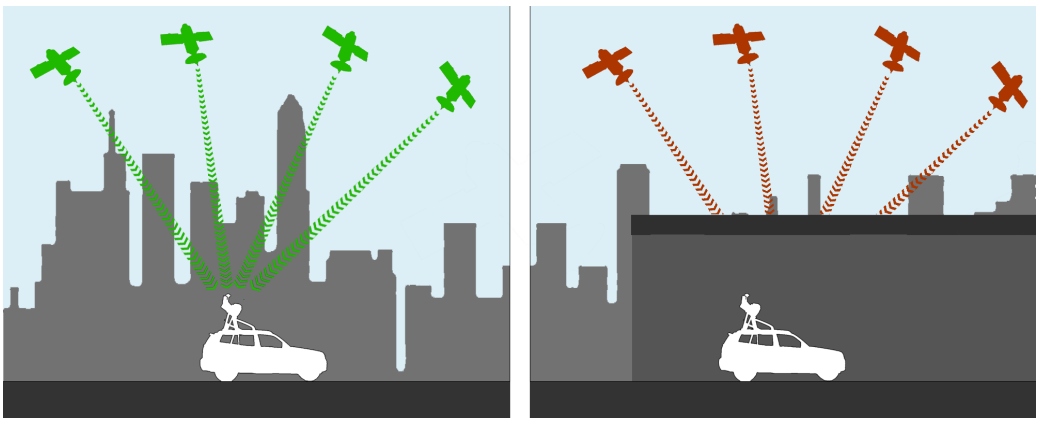
1.1 Initierende problemstilling

Den almindelige anvendelse af MLS systemer, hvor alle sensorer indgår i dataopsamlingen og anvendes på den måde de er tiltænkt, er efterprøvet af både producenterne og brugerne/køberne af systemerne. Producenter beskriver udelukkende hvilke nøjagtigheder, de kan stå inde for, hvis data opsamles under optimale forhold. Definitionen af hvad der er optimalt kan variere fra producent til producent, men på grund af

MLS system	Laserscanner	Positioneringsinstrumenter
Streetmapper	Riegl	GNSS + IMU + hastighedssensor
VLMS	Sick LMS 200	GNSS + IMU + WE
TITAN	Riegl	GNSS + IMU
Optech LYNX	LYNX	GNSS + IMU
FGI ROAMER	FARO LS	GNSS + IMU
RAMSYS	Leica HDS 4500	GNSS + inklinometre
POSLAS-PANCAM	3D LS	GNSS + IMU
TOPCON IP-S2 HD	Velodyne	GNSS + IMU + WE

Tabel 1.1 – Forskellige MLS systemer [Vosselman et al., 2010].

GNSS-observationernes afgørende betydning for positionering, er det nødvendigt at have gode GNSS-forhold under hele dataopsamlingen. Producenter er dog bevidste om at det langt fra kan lade sig gøre, at have god GNSS-modtagelse til alle tidspunkter, derfor tages der i nøjagtighedsbeskrivelserne højde for mindre GNSS-udfald f.eks. i forbindelse med kørsel gennem mindre tunneller og kørsel i urban canyons[2], se figur 1.4.



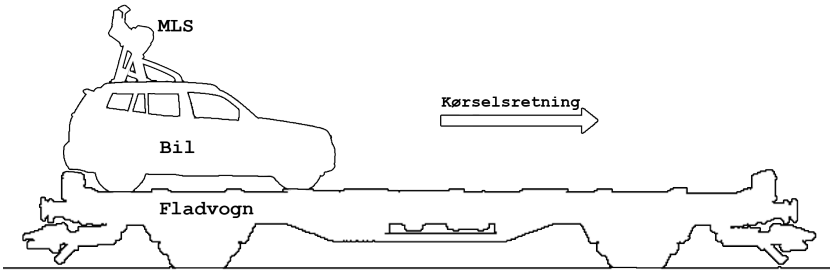
Figur 1.4 – Visualisering af normaltilfældet for et GNSS-udfald. GPS/GNSS-signalet mistes ved indkørsel i tunnel, hvor IMU og WE'er tager over indtil signalet fra GPS/GNSS igen modtages. [Szadkowski, 2011]

Producenterne kan ikke tage højde for alle tænkelige typer anvendelse af deres systemer og på grund af MLS systemernes endnu begrænsede udbredelse, er der ikke på nuværende tidspunkt foretaget et tilstrækkeligt antal eksterne undersøgelser til dokumentation af, hvad der sker med nøjagtigheden i forskellige anvendelsessituationer, der afviger fra den tiltænkte. MLS systemernes brugere efterlades derfor med spørgs-

[2]Område i byer med høj bebyggelse, der har kløftelignende effekt så antallet af synlige satellitter begrænses [8].

målet om hvad der kan forventes af nøjagtigheden i deres specifikke anvendelsessituationer.

I forbindelse med den manglende kendskab til MLS systemernes nøjagtigheder i forskellige situationer, blandt andet hvor observationerne fra en sensor ikke er tilgængelige, er projektgruppen blevet præsenteret for en aktuel problemstilling hos COWI, der har anskaffet en TOPCON IP-S2 HD[3]. Problemstillingen er blevet præsenteret af Kristian Keller, der seniorspecialist ved afdeling for Kort og Geodata hos COWI. Kristian Keller har ansvar for opmåling med MLS og udvikling af nye forretningsområder. I dialog med nye mulige kunder er der opstået interesse for at flytte MLS systemet over på en fladvogn og foretage laserscanning af togtunneller. Opstillingen med MLS på fladvogn ses af figur 1.5.



Figur 1.5 – Illustration af hvordan køretøj og MLS monteres på en fladvogn, der skal køres gennem et tunnelforløb.

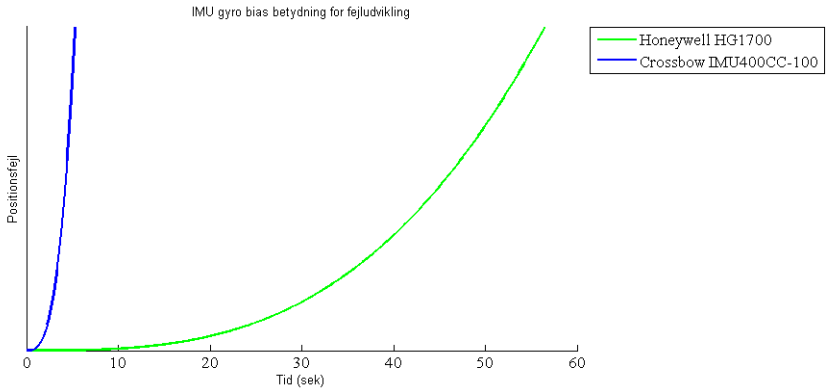
Problemstillingen med fladvognen er tilsvarende den, der opstår når MLS monteres på en båd, da det ikke er muligt at indhente positioneringsdata fra WE'erne, når hjulene ikke er i bevægelse under dataopsamling. Udover WE'erne er der i tunnelen heller ikke GNSS tilgængelig, hvilket betyder at positioneringsdata udelukkende kommer fra IMU.

Projektgruppen har tidligere arbejdet med positionering med low-cost IMU[4], hvilket er tilsvarende de IMU'er, som anvendes i MLS systemer, dog var den IMU projektgruppen arbejdede med af en væsentligt ringere kvalitet. Som eksempel oplyses fejlen på IMU'ens gyro bias for TOPCON's system at være 3°/t, mens IMU'en projektgruppen tidligere har arbejder har et gyro bias på 1°/s. Forskellen i fejludviklingen er illustreret i figur 1.6.

Den ringere kvalitet har særligt betydning for IMU'ens fejlophobning over tid og i MLS systemernes IMU'er sker dette betydeligt langsommere end hvad det var tilfældet med

[3] En nærmere gennemgang af dette system er at finde i appendiks B.

[4] Low-cost betyder i denne sammenhæng, at IMU er bygget af standard komponenter modsat IMU til militær anvendelse, rumfart eller andet, hvor det er muligt og nødvendigt at anvende langt dyrere komponenter. TOPCON's systemets IMU er dog en god low-cost IMU.



Figur 1.6 – Fejludvikling på positionen for henholdsvis TOPCON IP-S2 HD (Honeywell) og projektgruppen 7. semester (Crossbow).

den IMU, projektgruppen har arbejdet med. Fejlophobningens hastige udvikling skyldes beregningsgangen fra IMU-observationer til position. En fejl i IMU'en vokser hurtigt som konsekvens af matematikken der anvendes. IMU'en i TOPCON's system er som nævnt low-cost, men selv hvis der anvendes en betydelig dyrere IMU vil der stadig ske fejlophobning over tid.

På baggrund af COWI's aktuelle problemstilling og den forudgående kendskab projektgruppen har til IMU og laserscanning, er det interessant at arbejde videre med WE'er og det sammenspil disse har med IMU i forbindelse med positionering, når GNSS ikke er tilgængeligt.

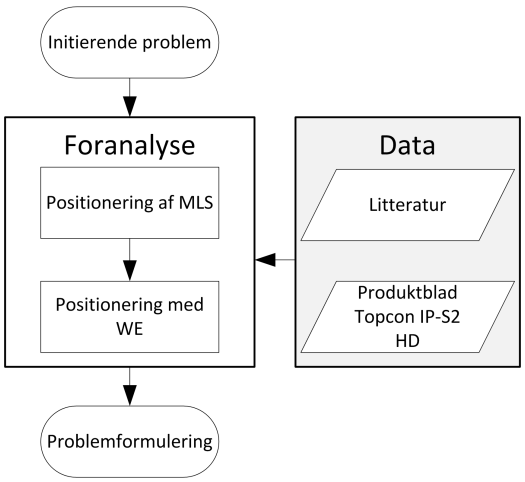
For at belyse problemstillingen yderligere opstilles en initierende problemstilling, der søges besvaret gennem foranalysen:

Hvorledes positioneres en mobil laserscanner og hvordan beregnes positioner fra målinger fra wheel encoders?

I foranalysen søges der svar på hvordan MLS systemer positioneres under almindelige omstændigheder og i forhold til COWI's problemstilling.

Foranalyse 2

For at sikre at foranalysen klarlægger den initierende problemstilling og indsnævrer til problemformuleringen opstilles en struktur for foranalysen, se figur 2.1.



Figur 2.1 – Foranalysens struktur

Først klarlægges hvordan positionering af en MLS foretages. Der tages udgangspunkt i TOPCON IP-S2 HD og dets instrumenter, sensorer og specifikationer, mens beskrivelsen af positioneringsmetoderne vil være af generel karakter. Der vil blive skelnet mellem forskellige situationer som påvirker hvordan TOPCON's system positioneres.

Da den initierende problemstilling har baggrund i COWI's aktuelle problemstilling, hvor TOPCON's system placeres på en fladvogn og observationerne fra WE'erne mistes. WE'erne indgår i positioneringen, men hvordan de indgår er ikke oplyst fra producenten. Derfor undersøges det hvordan WE'er anvendes til positionsberegning. Viden er opnået gennem litteratursøgning.

Når viden om positionering af en MLS er opnået og mere specifikt med WE'er, vil der blive opstillet en problemformuleringen.

2.1 Positionering af MLS

Af sensorer til positionering af TOPCON IP-S2 HD består af en dobbelt frekvent GNSS-modtager, en low-cost IMU samt to WE'er. Data indsamlet fra sensorerne bliver i systemet tidsstemplet af et højpræcisions ur, hvorved der opnås sammenknytning af disse. Tidsstempling er yderst vigtigt i denne sammenhæng, da laserscanneren indsamler op til 1.333 mio. punkter i sekundet og hvert enkelt punkts position bestemmes ud fra viden om, hvor scanneren var i lige netop det øjeblik punktet blev scannet.

I det efterfølgende vil positionering med TOPCON's system i tre forskellige situationer blive beskrevet.

Under optimale GNSS forhold – udsynet til himmelen er tilgængelig (eventuelt forekommer kortvarige afbrydelser).

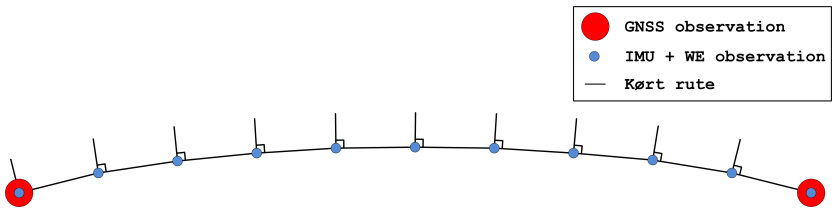
Under ikke-optimale GNSS forhold – signalet mistes i adskillige epoker.

Udover disse to situationer vil der være følgende situation som COWI forestiller sig:

Under ikke-optimale GNSS forhold, uden WE'er – MLS monteres på en togvogn, hvorfor WE'er ikke indgår i sensorerne.

2.1.1 Under optimale GNSS forhold

GNSS-data opsamles kontinuert eventuelt med få kortvarige afbrydelser med en frekvens på 10 Hz. Samtidig opsamles data fra både IMU og WE'er, hvilket for IMU'en sker med en frekvens på 100 Hz [TOPCON, 2010]. Mens GNSS-modtageren giver absolutte positioner, anvendes en kombination af IMU og WE'er til at beskrive, hvordan køretøjet bevæger sig imellem GNSS-epokerne og beregne køretøjets orientering, hvilket ikke kan opnås med GNSS alene[1], se figur 2.2.



Figur 2.2 – Illustration af hvordan IMU og WE'er giver positioneringsinformationer mellem GNSS-observationerne.

IMU'en giver mulighed for at beregne systemets bevægelse og orientering, mens WE'erne giver mulighed for at korrigere afstanden samt retningen der observeres mellem

[1] GNSS kan anvendes til at beregne yaw og pitch, men ikke roll. For illustration af pitch, roll og yaw se figur 1.3.

GNSS-epokerne. I følge [TOPCON, 2010] anvendes de tre forskellige sensorer til at foretage redundant positionering med høj nøjagtighed. Det uddybes at WE'erne anvendes til at beregne bilens retning samt forbedre positioneringen [TOPCON, 2011], mere herom i afsnit 2.2.

Generelt foregår positioneringsprocessen ikke i real tid, hvilket betyder at data blot indsamles under kørslen og først processeres efter endt kørsel. Dette betyder for GNSS-modtageren, at der opsamles dobbelt frekvent data under kørslen og efter endt kørsel hentes referencedata fra en virtuel reference, der oprettes tæt på det geografiske område, hvori data er opsamlet. Reference data hentes i COWI's tilfælde fra GPSnet.dk [2].

2.1.2 Under ikke-optimale GNSS forhold

I tilfælde af dårlig eller manglende GNSS-modtagelse er den største forskel at kun IMU og WE'er anvendes til positionering.

Positionering med IMU alene sker ved at der i sidste kendte punkt registreres en retningsændring og en acceleration. Retningsændringen fortæller hvor accelerationen er sket imod, hvilket ud fra en række beregninger giver en ny position. IMU'en registrerer retningsændring omkring og accelerationer langs tre akser, hvorfor positionen kan udregnes i 3D. Sådan fortsættes beregningsgangen, hvor det nye koordinatsæt nu bliver sidste kendte punkt som der skal regnes fra.

Da IMU'en ikke er fejlfri vil det nye koordinatsæt have en fejl påhæftet, og det vil følge med gennem næste beregning, se figur 1.6. Fejlen ophober sig dermed og hver gang et nyt koordinatsæt udregnes er nøjagtigheden dårligere end det forriges, dette kaldes drift. På grund af driften over tid, forværres fejlen på positionerne ifølge teorien med tiden i tredje [Nebot et al. 1997].

WE'er har tilsvarende egenskaber fordi også disse måler relativt i forhold til det foregående, hvilket medfører at fejlene også akkumuleres over tid, som funktion af afstand.

Tabel 2.1 på næste side fra [TOPCON, 2010] viser hvor meget nøjagtigheden falder ved forskellige GNSS-udfaldstider, hvor der alene anvendes IMU og WE'er til positionering. Tabellen viser tydeligt at GNSS-udfaldene har størst betydning for 2D-positionsfejlene, disse er også en konsekvens af at headingen forværres væsentligt mere end roll og pitch.

GNSS-udfaldstid	Positionsfejl (m)		Orienterings fejl (grader)		
	2D	Kote	Roll	Pitch	Heading
0 s	0.015	0.025	0.025	0.025	0.050
15 s	0.025	0.025	0.025	0.025	0.060
30 s	0.055	0.030	0.030	0.030	0.075

Tabel 2.1 – TOPCON IP-S2 HD: Resultaterne af tabellen er beregnet med kritieriet, at der har været mindst 100 sekunders god GNSS-modtagelse (fixed ambiguities) før og efter udfaldene. Ligeledes ligger der mindst 30 udfaldstest til grund for hver af testene. [TOPCON, 2010]

2.1.3 Under ikke-optimale GNSS forhold, uden WE'er

I COWI's aktuelle problemstilling, hvor systemet anvendes på en togvogn til at scanne tunneller, vil det alene være IMU'en som anvendes til positionering. GNSS-signalet vil være blokeret af tunnelen og WE'erne vil ikke være monteret på togvognen. Nøjagtigheden er ikke opgivet fra TOPCON, men det formodes at nøjagtigheden er ringere end angivet i tabel 2.1, hvor WE'erne er med.

IMU'en anvendes selvstændigt til positionering samt orientering af TOPCON's system, når WE'erne ikke er tilgængelige.

2.1.4 Afrunding

TOPCON's system anvender som nævnt ovenfor udover IMU og WE'er til at bestemme positionen og retningen af systemet imellem GNSS-epoker og ved GNSS-udfald, jf. [TOPCON, 2011]. Projektgruppen har tidligere opnået viden indenfor positionering med IMU, men har ikke kendskab til hvorledes der kan positioneres med WE'er. Det findes derfor relevant at gennemgå hvorledes der grundlæggende kan kommes fra at WE'er måler afstande til at der kan bestemmes position og retning for TOPCON's system.

2.2 Wheel encoders

WE'er indgår som nævnt i sensorerne for TOPCON IP-S2 HD, men hvad kan disse bibringe til positionering af TOPCON's system? Med WE'er tælles hjulrotationer, og dele heraf, dette kan i samspil med viden om hjulets radius anvendes til at beregne hvor langt hjulet har bevæget sig, dette kaldes odometri[2].

[2]Ordet stammer fra de Græske ord *hodós* ("vej eller sti") og *métron* ("måling"). [1]

2.2.1 Odometri

Odometri er bestemmelse af afstande ved hjælp af instrumenter. Odometre anvendes i mange sammenhænge, det mest almindelige kendte eksempel er nok odometeret i biler, som viser hvor langt bilen har kørt. Litteratursøgning viser at odometri i høj grad er anvendt inden for autonome robotsystemer til positionering. Der er inden for dette felt gjort en række undersøgelser om WE'eres funktionsområde og fejlkilder, men det er i relation til opbygningen af robotter som på mange måder adskiller sig fra en bil. De styrende hjuls placering i robotter adskiller sig fra en bils, hvor forhjulene er de styrende. Den anderledes placering af de styrende hjul på robotter skyldes, at de ofte er to- eller trehjulede[3]. Disse forskelligheder medfører at undersøgelserne ikke direkte kan overføres til denne rapports problemstilling. Artiklen [Chung et al., 2008] beskriver dog kalibrering af WE'er i en *"car-like mobile robot"*, hvorfor matematikken for afstandsberegning og positionering beskrevet heri vil blive anvendt i denne rapport og blive beskrevet nedenfor.

Afstandsberegning

I TOPCON IP-S2 HD er der monteret to WE'er [Kübler, 2012], et på hvert baghjul. Hver af disse WE'er tæller 10000 ticks per fulde rotation, det vil sige at for hver gang hjulet har drejet én omgang er udlæsningen steget med 10000. For at kunne beregne afstande skal hjulets radius (R) være kendt. Ud fra viden om antal ticks per omgang og viden om hjulets størrelse kan det beregnes hvor langt hjulet har bevæget sig ud fra formel 2.1.

$$S = R\frac{2\pi}{N}\Delta N \tag{2.1}$$

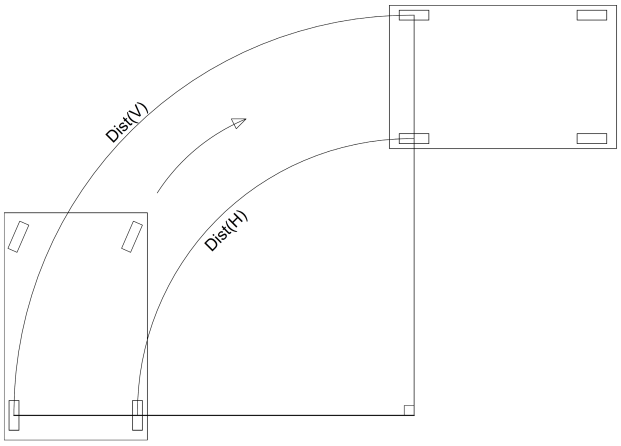
[Chung et al., 2008]

hvor,
S er afstanden.
R er radius på hjulet.
N er antallet af ticks per fulde rotation.
ΔN er det aflæste antal ticks.

[3] En beskrivelse af forskellige opbygninger af autonome robotter kan ses i [Borenstein et al., 1996].

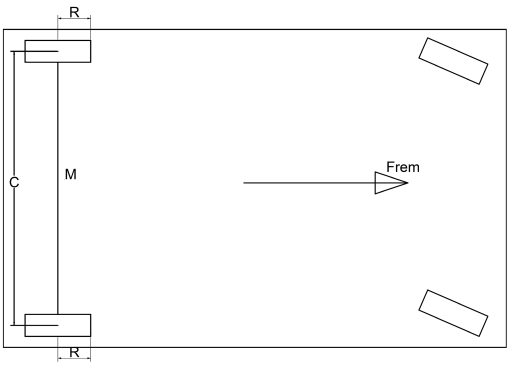
Positionering

Hver WE måler antal ticks, der er blevet kørt i en given epoke med et fast interval. Hvis bilen er drejet i epoken vil det ene af hjulene have bevæget sig længere end det andet, se figur 2.3, og dette vil derfor kunne aflæses i dataene.



Figur 2.3 – Illustration af forskel i målt distance for hhv. højre og venstre WE. Venstre hjul har kørt længst og vil derfor udlæse et højere antal ticks.

Udover viden om hjulenes radius (R) og antal ticks per rotation skal afstanden mellem hjulene være kendt (C). Ud fra dette er det muligt at beregne en position (2D) samt en retningsvinkel for køretøjet. Positionen vil være for midtpunktet imellem baghjulene (M), se figur 2.4.



Figur 2.4 – Illustration af bil og værdierne C, M og R.

Dette gøres ved først at beregne den afstand det enkelte hjul har bevæget sig i epoken ved hjælp af formel 2.1.

Da det er punktet M, midt imellem de to hjul, som beregnes, regnes afstanden for epoken ud til at være midlet af de to afstande, se formel 2.2. Dette gøres ud fra en antagelse om at buestykker, grundet de korte epoker, rimeligvis kan betragtes som værende linjestykker. Retningsvinklen kan herefter beregnes, se formel 2.3.

$$S_M = \frac{S_v + S_h}{2} \tag{2.2}$$

[Chung et al., 2008]

hvor,
S_M er afstanden for midterpunktet.
S_v er afstanden for venstre hjul.
S_h er afstanden for højre hjul.

$$\phi_M = \frac{S_v - S_h}{C} \tag{2.3}$$

[Chung et al., 2008]

hvor,
ϕ_M er ændringen til retningsvinklen for midtpunktet. (Radianer)
C er afstanden imellem midten af de to hjul.
S_v er afstanden for venstre hjul.
S_h er afstanden for højre hjul.

Ud fra denne retning (ϕ_M) og afstand kan der beregnes XY-koordinater ud fra nedenstående formler.

$$X_{M(t)} = X_{M(t-1)} + S_{M(t)} \cos(\phi_{M(t-1)} + \Delta\phi_{M(t)}/2) \tag{2.4}$$

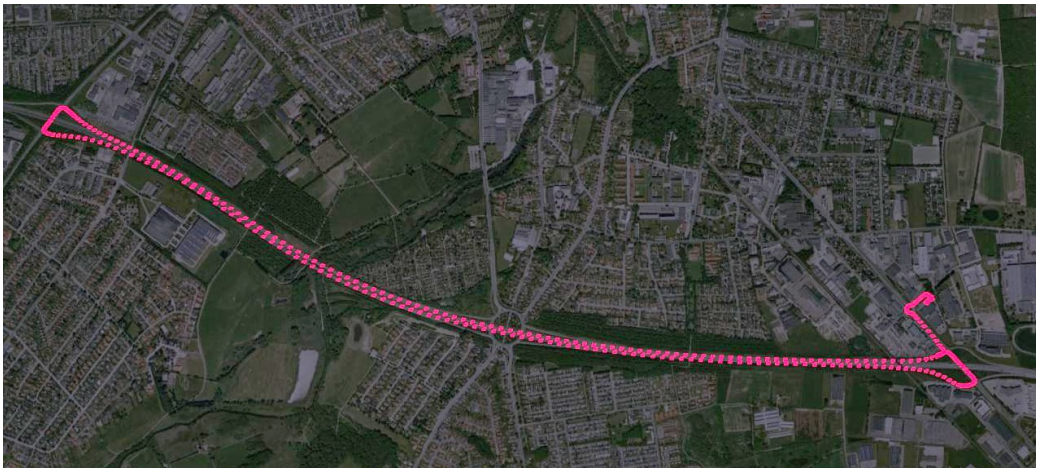
$$Y_{M(t)} = Y_{M(t-1)} + S_{M(t)} \sin(\phi_{M(t-1)} + \Delta\phi_{M(t)}/2) \tag{2.5}$$

[Chung et al., 2008]

hvor,
$X_{M(t)}$ og $Y_{M(t)}$ er X- eller Y-koordinatet efter epoken.
$X_{M(t-1)}$ og $Y_{M(t-1)}$ er X- eller Y-kordinatet fra forrige epoke.
$S_{M(t)}$ er afstanden i epoken.
$\phi_{M(t-1)}$ er retningsvinklen for midtpunktet. (Radianer)
$\Delta\phi_{M(t)}$ er ændringen til retningsvinklen. (Radianer)

2.2.2 Eksempel på positionering fra WE-data

For at efterprøve matematikken i afsnit 2.2.1, foretog projektgruppen en simpel test af positionering ud fra WE-data. Testen blev foretaget på et datasæt leveret af COWI, ruten er vist i figur 2.5.



Figur 2.5 – Rute plottet i Google Earth.

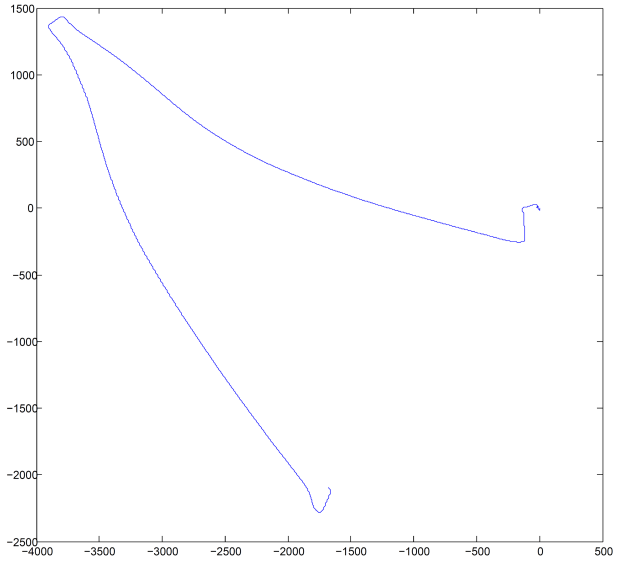
Testen blev udført med udgangspunkt i den leverede data fra WE'erne, viden om hjulenes radius på 0.3500 m og beregnet hjulafstand på 1.8788 m[4]. Testen resulterede i plottet vist i figur 2.6.

Plottet viser den rute, som kan beregnes ud fra de oplysninger, der var til rådighed om bilen og WE'erne. Det lader ved sammenligning med figur 2.5 til at ruten kan genfindes i plottet, på trods af at slutpunktet afviger med omkring 2500 m. Grunden til afvigelsen kan muligvis findes i fejl i de oplysninger, som testen er udført på grundlag af. Radius og hjulafstand er vigtige at kende præcist for at opnå bedst mulige resultat for positioneringen, hvorfor det er nødvendigt at kalibrere disse før indsamling af data, jf. [Chung et al., 2008].

2.2.3 2D/3D problematik

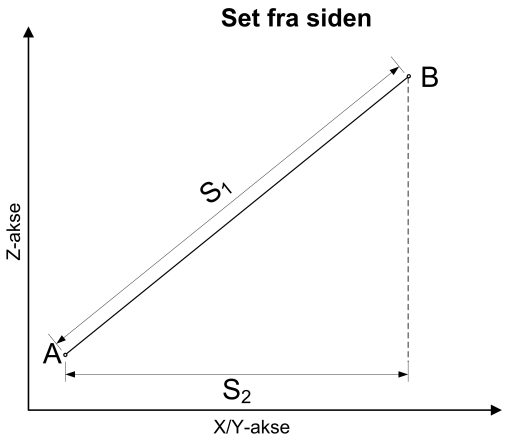
Når positioner beregnes ud fra WE-observationer, skal man være opmærksom på hvad målingerne beskriver. WE'en måler en afstand og det er den kørte afstand. Ved anvendelse af to WE'er kan der yderligere beregnes retning og dermed kan der udregnes positioner i 2D.

[4] Beregnet på baggrund af to koordinatsæt fra indstillingsfil.

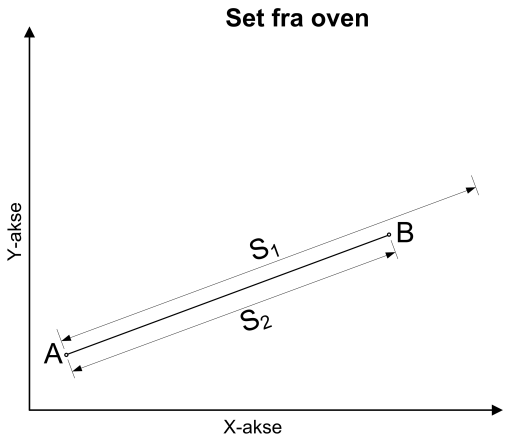


Figur 2.6 – MATLAB test plot. (enheden er meter)

Til beskrivelse af problematikken ved at anvende afstande fra WE'er anvendes figur 2.7. Hvis et køretøj kører fra punkt A op ad en bakke til punkt B, har køretøjet bevæget afstandend S_1, hvilket er længere end den vandrette afstand mellem A og B (S_2). WE'erne har målt den kørte distance direkte mellem A og B, men WE-data indeholder ingen oplysninger om højdeforskellen mellem A og B. De manglende oplysninger om højde giver problemer ved beregning af koordinater til den kørte rute. Figur 2.8 viser problematikken i et XY-koordinatsystem.



Figur 2.7 – Den tilbagelagte afstand målt med WE'er, S_1 og 2D-afstanden S_2.



Figur 2.8 – Forskellen mellem afstand S_1 og S_2, som konsekvens af de manglende højdeinformationer.

Hvis den målte afstand direkte oversættes til et 2D-system, vil afstanden mellem A og B således være målt for langt. Det er ikke muligt med WE'er alene at korrigere for højdeforskel i målingerne.

Problemformulering 3

Foranalysen har givet svar på hvorledes en MLS positioneres under forskellige forhold, der både har generel karakter, men også under forhold der er defineret af COWI's ønske om at anvende TOPCON's system monteret på en fladvogn til kortlægning af tunnelrør. Den beregningsmæssige integration af WE'er kendes ikke i de kommercielle MLS systemer, hvorfor der ikke umiddelbart kan gives svar på, hvilken betydning for nøjagtigheden COWI's tiltænkte anvendelse uden WE'er har. WE'er bliver interessante i forbindelse med denne tiltænkte anvendelse, fordi de netop ikke længere er en del af systemet og betydningen for nøjagtigheden af positioneringen ikke kendes.

Positionering med WE'er er kendt fra autonom navigation af robotter og det har ikke været muligt at finde undersøgelser af under hvilke forhold, det er fordelagtigt at anvende WE'er, hvis disse monteres på et bil-lignende system. Robotsystemer har nogle andre bevægelsesmæssige egenskaber end en bil, hvilket gør, at de to systemer ikke direkte kan sammenlignes. Samtidig er der gennem undersøgelsen af positionering med WE'er skabt interesse for at undersøge disse nærmere, da projektgruppen ser potentiale i anvendelse af disse umiddelbart simple sensorer.

Projektgruppens interesse i at undersøge WE'ernes egenskaber kombineres med muligheden for at undersøge, hvilken betydning det har for en MLS, når denne ønskes monteret på en fladvogn og anvendes til at laserscanne et tunnelrør.

For at undersøge WE'er uden påvirkning fra andre sensorer eller skjulte beregningsalgoritmer, der kan være en del af kommercielle MLS systemer, ønskes WE'erne isoleret fra en MLS og undersøgt separat. Problemformuleringen opstilles som følgende:

Hvilke styrker og svagheder findes ved brug af WE'er til positionering?

TOPCON IP-S2 HD tillader udtræk af rå WE-data, men da systemet er i kommerciel anvendelse af COWI er tilgængeligheden ikke tilstrækkelig i forhold til det formodede omfang af projektarbejdet. I stedet har det været muligt at låne smallPOS II systemet af Henrik Vad Jensen, Vejdirektoratet, under projektperioden. SmallPOS II er en velegnet erstatning for TOPCON's system, da systemet indeholder WE'er og giver mulighed for rå og tidsstemplede dataudlæsninger fra disse. Nærmere gennemgang af smallPOS II er at finde i appendiks C.

Underspørgsmål
Gennem undersøgelse af hvilke styrker og svagheder WE'er har til positionering kan der efterfølgende opstilles teser om, hvilken betydning WE'er har i et MLS system, når positionering afhænger alene af WE'erne og IMU. Disse teser kan derefter forsøges eftervist i TOPCON IP-S2 HD, hvorfor følgende underspørgsmål opstilles:

> Kan teserne om hvornår WE'erne har betydning for positionering med IMU eftervises i TOPCON IP-S2 HD?

Formålet med at eftervise teserne om hvornår WE'erne har betydning for positioneringen i TOPCON's system er at give grundlag for udtalelse om, hvad der i givet fald vil ske med hensyn til positioneringen af TOPCON's system, hvis dette monteres på en fladvogn, der køres igennem en tunnel. Denne fremgangsmåde anvendes, da det for projektgruppen ikke er muligt at foretage en praktisk test af en MLS monteret på en fladvogn. Undersøgelsen kan derfor betragtes som initierende for, om COWI skal anvende metoden til opmåling af tunnelrør.

Metode 4

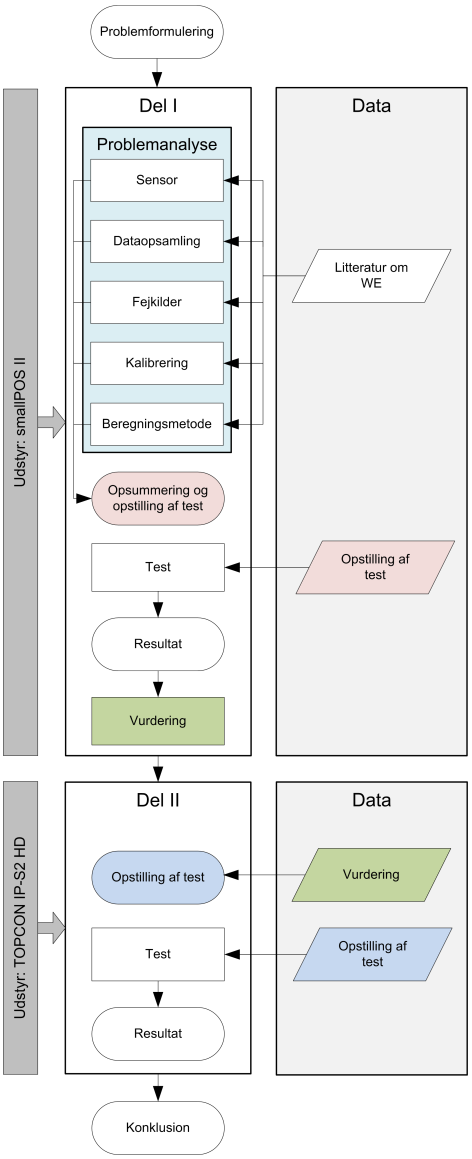
I foranalysen er positionering med TOPCON IP-S2 HD blevet undersøgt og der er opstået særlig interesse for systemets WE'er. Med problemformuleringen flyttes fokus derfor fra TOPCON's system til specifikt at omhandle WE'er, hertil anvendes smallPOS II. WE'erne i smallPOS II kan monteres på et vilkårligt køretøj, hvilket gør det særligt anvendeligt. TOPCON's system ønskes dog stadig undersøgt, men dette bliver sekundært.

Anvendelse af de to forskellige systemer afspejler sig i rapportens opbygning efter Problemformuleringen, der opdeles i to; Del I med vægt på WE'er i smallPOS II og Del II med vægt på WE'er i TOPCON IP-S2 HD. Strukturen ses af figur 4.1.

Del I
Formålet med Del I er, at belyse i hvilke situationer WE'er har styrker og svagheder. Indledningsvist undersøges WE'ernes funktion som *Sensor*, hvilket består i beskrivelse af sensorernes tekniske specifikationer og opbygning samt en beskrivelse af opbygningen af smallPOS II. Efterfølgende vil *Dataopsamling* fra smallPOS II blive beskrevet. Efter beskrivelsen af dataopsamling vil de *Fejlkilder*, der påvirker WE'ernes observationer, blive beskrevet. Da det er muligt at foretage *Kalibrering* og derved minimere eller fjerne nogle af fejlkilderne, vil en kalibreringsmetode og dennes implementering bliver præsenteret. Metoden, der bliver anvendt til for at komme fra de rå sensor observationer fra WE'er til positioneringsdata, beskrives i *Beregningsmetode til positionering*.

På baggrund af de indledende undersøgelser i Problemanalysen i Del I foretages en opsamling af hvilken betydning *Sensor, Dataopsamling, Fejlkilder, Kalibrering* og *Beregningsmetode til positionering* har for anvendelse af WE'er til positionering i afsnittet *Opsummering og opstilling af test.* Opsummeringen danner grundlag for at opstille praktiske tests, der har til formål at belyse styrker og svagheder ved anvendelse af WE'erne.

Resultaterne fra de praktiske test vil give ny viden om WE'erne og på den baggrund vil være det muligt at opstille nye teser, der skal ligge til grund for Del II. Teserne til Del II vil omhandle hvorledes det kan antages at WE'erne i TOPCON's system anvendes i tilfælde af GNSS-udfald.



Figur 4.1 – Struktur for Del I og Del II.

Del II

Formålet med Del II, er at eftervise de nye teser, ved at teste dem på TOPCON IP-S2 HD. Del II kombinere den initierende problemstilling, der blev opstillet af Kristian Keller (COWI) og de opnåede erfaringer fra Del I. Vurderingen af resultaterne af testene i Del I muliggør opstilling af teser til test af TOPCON's system. Udformningen af testene bliver behandlet og beskrevet inden selve udførelsen for at sikre at alle overvejelser er gjort. Resultaterne af testene i Del II anvendes til at vurdere om de opstillede teser kan eftervises i et kommercielt MLS system.

Del I

Wheel Encoder

Problemanalyse 5

I Problemanalysen i Del I anvendes smallPOS II til at undersøge WE'er for at klarlægge styrker og svagheder. Disse anvendes til at opstille praktiske tests af WE'er. I Del I vil WE'erne i smallPOS II indledningsvist blive beskrevet. Efterfølgende vil fejlkilder, kalibreringsmetode og beregningsmetode blive beskrevet. Afsnittet afsluttes med opstilling af test til påvisning af WE'ernes styrker og svagheder, beskrivelse af den praktiske udførelse af testene og vurdering af resultatet.

5.1 Sensor

Præsentation af WE'erne sker med udgangspunkt i smallPOS II. WE'erne i smallPOS II deler specifikationer med WE'erne i TOPCON IP-S2 HD, hvorfor præsentationen vil være generelt dækkende i projektet.

5.1.1 Teknisk beskrivelse

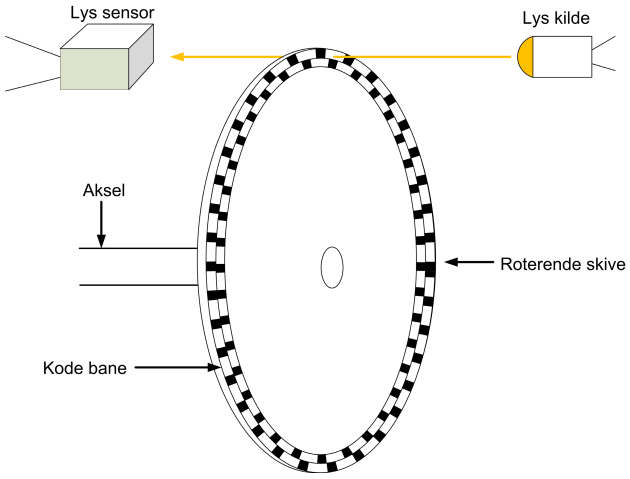
Tidligere er det beskrevet, at en WE er i stand til at give informationer om et hjuls rotation. Målingen af rotationer sker omkring en aksel, der er en del af sensoren. Figur 5.1 viser denne aksel. På akslen fastspændes det objekt, hvis rotationer der skal måles. Når sensoren anvendes på et køretøj monteres den udvendigt på køretøjets baghjul.



Figur 5.1 – WE'en set fra forskellige vinkler

Når hjulet roterer, og WE'ens aksel gør det samme, roterer en skive inde i sensoren. Skiven indeholder et antal inddelinger, der kan varierer fra model til model, men fælles er at der ved måling af antallet af inddelinger, også kaldet ticks, opnås information om hvor meget hjulet i en given epoke har roteret.

Den WE, der er en del af smallPOS II systemet, er en optisk inkremental rotationssensor, med modelnavnet ROD 420 og er produceret af Heidenhain, se appendiks C. At sensoren er en optisk inkremental rotationssensor betyder, at sensoren læser skiftene mellem inddelinger på den roterende skive ved brug af en lyskilde og en fotosensor. Hvordan skiven belyses er illustreret af figur 5.2.



Figur 5.2 – Principskitse for WE'ens sensoropbygning [6].

Den roterende og kodede skive, der er forbundet med akslen, belyses af en lyskilde på den ene side, mens en fotosensor detekterer, når lyset trænger igennem. Herigennem fås information om hvor meget skiven har roteret.

WE'en (ROD 420) har 5000 linjer markeret på skiven, hvilket giver mulighed for 10000 aflæsninger[1], hvilket ligeledes er den maksimale opløsning på det output, der fås fra WE'en. Med smallPOS II systemet er det muligt at justere opløsningen på de udlæsninger der fås fra WE'erne[2].

5.1.2 Montering og smallPOS II

WE'eren ROD 420 fra Heidenhain indgår som nævnt i smallPOS II systemet, der udover WE'er indeholder en GPS-antenne, en MEMS-gyro og to MEMS-accelerometre.

WE'en monteres som nævnt på hjulets nav, for derved at kunne registrere hjulets omdrejninger. Monteringen ses af figur 5.3, hvor en WE forbindes til navet med en flange. Flangen er forbundet med en skive, der er monteret i hullet i stålfælgens midte. Skiven er nogle få hundrededele millimeter større end hullet i stålfælgens midte, så den sidder i spænd.

[1] Det er muligt at aflæse 10000 gange da både markering og mellemrum mellem markeringer indgår.
[2] For beskrivelse af indstillingen af denne, se appendiks C



Figur 5.3 – WE'en monteret på hjulets nav.

GPS-antennen i smallPOS II har under almindelig anvendelse to funktioner; opsamling af absolutte koordinater samt tidsstempling af den øvrige data fra WE'erne og MEMS-gyroen. Tidsstemplingen er ligeledes afgørende ved den almindelig anvendelse af smallPOS II, når data fra de mange sensorer skal anvendes sammen til positionering. Tidsrammen, der anvendes, er GPS-tid og fordelen ved denne tidsstempling er at det giver mulighed for at sammenholde med andre GPS-tidsstemplede data. GPS-antennen ses monteret på et køretøj af figur 5.4.



Figur 5.4 – Ashtech GPS-antennen til smallPOS II monteret på køretøjets tagbøjler. Placeringen af denne er ikke afgørende, da den i test kun anvendes til tidsstempling af data fra WE'erne.



Figur 5.5 – Boksen, i smallPOS II, der har dataopsamlingsfunktion, computer til GPS-signalbehandling, og indeholder en MEMS-gyro og to MEMS-accelerometre.

Boksen, der ses af figur 5.5, er I/O-enhed for dataopsamlingen, men indeholder ligeledes computer til behandling af GPS-signalet og systemets tre MEMS-sensorer; en gyro og to accelerometre. Under dataopsamling opsamles data fra alle systemets sensorer, men projektgruppen vil udelukkende anvende data fra WE'erne, mens GPS-modtage-

ren anvendes til tidsstempling af dataet.

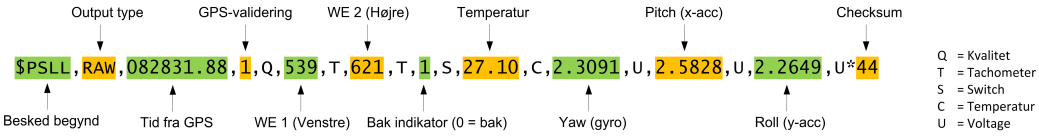
5.2 Dataopsamling

Dette afsnit forklarer overordnet hvorledes data opsamles, og hvorledes det er formateret.

Data fra smallPOS II indsamles ved at forbinde til enheden via en serielport på computeren. Data input og output håndteres igennem et terminal program, som eksempelvis HyperTerminal i Windows XP.

Indledningsvis initialiseres smallPOS II ved at sætte værdier for dataoutputtet, henholdsvis output-hastighed og indhold. Hastigheden kan sættes til at være 5, 10 eller 20 Hz og indholdet kan vælges til at være GPS, RAW (rå sensor data), eller begge kombineret. Det ønskes at opnå største mulige datagrundlag fra WE'erne, hvorfor hastigheden sættes til 20 Hz og indholdet vælges til RAW alene, da GNSS-positionerne ikke skal anvendes i databehandlingen.

Efter indledende initialisering sender enheden data ud i form af en tekststreng formateret som i figur 5.6.



Figur 5.6 – Eksempel på tekststreng fra smallPOS II.

Denne tekststreng kan gemmes i en tekstfil, som kan anvendes i et program efter behov. I projektgruppens tilfælde vil tekstfilerne blive importeret i MATLAB, hvor beregninger vil blive foretaget, denne behandling er nærmere forklaret i appendiks E.1.

5.3 Fejlkilder

Med udgangspunkt i at WE'erne er monteret på et firehjulet køretøjs ikke styrende og ikke trækkende hjul introduceres en række fejl, der har systematisk karakter. Fejlene, der bliver præsenteret, opstår som resultatet af anvendelsen af hele systemet og ikke på grund af den enkelte sensor.

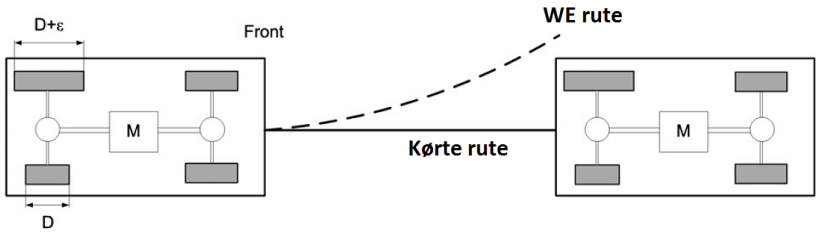
To af de systematiske fejl kan minimeres ved anvendelse af kalibrering inden dataopsamling. De resterende fejl kan ikke fjernes ved kalibrering[3], men kan undgås eller minimeres ved at have en bestemt adfærd under kørsel.

Fejlene, der er mulige at fjerne/minimere under kalibrering, er:

- Fejl på hjulomkreds.
- Fejl på hjulafstand.

5.3.1 Fejl på hjulomkreds

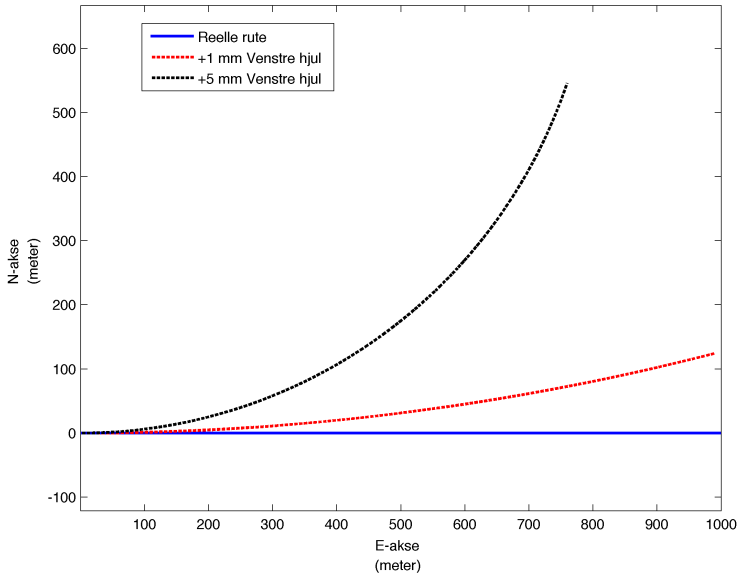
Hvis der ikke tages højde for uens hjulomkreds på baghjulene, hvor WE'erne er monteret, resulterer det i at den beregnede rute afviger fra den kørte rute. Afvigelsen vil have betydning for både bestemmelsen af afstand og retning. Er venstre baghjuls omkreds størst vil den beregnede rute afvige mod venstre, se figur 5.7. Venstre baghjul vil bevæge længere per fulde omdrejning hvilket medføre at WE'eren registrere færre ticks end på det mindre højre baghjul. Den beregnede afstand for venstre baghjul vil, som følge af de færre ticks, være kortere, hvilket i beregningsalgoritmen fører til drejning mod venstre. Bilen vil i praksis køre på en ret linje uanset forskellig omkreds på baghjulene, da de forreste og styrende hjul bestemmer retningen. [Chung et al., 2008, s. 583]



Figur 5.7 – Venstre baghjul er tillagt en fejl på omkreds, $D+\epsilon$, som betyder at den beregnede rute afviger mod venstre i forhold til den kørte rute, figur er taget fra [Chung et al., 2008, s. 584].

I figur 5.8 ses effekten af fejl på hjulets omkreds på henholdsvis 0.001 m (rød stiplet linje) og 0.005 m (sort stiplet linje), hvis det antages, at hjulene har samme omkreds på 2 m og afstanden mellem hjulene er 2 m. Der er tilbagelagt en afstand på 1000 m. En fejl på omkredsen på 0.001 m (rød stiplet linje) giver en 2D-afvigelse på slutkoordinatet på 124.711 m, mens en fejl på 0.005 m i omkredsen (sort stiplet linje) resulterer i en 2D-afvigelse på slutkoordinatet på 596.737 m.

[3]Ved inddragelse af yderligere sensorer kan det ikke udelukkes, at der kan kompenseres for disse fejl, men undersøgelsen af dette vurderes at ligge uden for projektets ramme.



Figur 5.8 – Illustration af effekt på grund af fejl på venstre hjulomkreds. Venstre hjulomkreds er i beregningen angivet til 2 m, men den rigtige omkreds er henholdsvis 2 m + 0.001 m (rød stiplet linje) og 2 m + 0.005 m (sort stiplet linje).

5.3.2 Fejl på hjulafstand

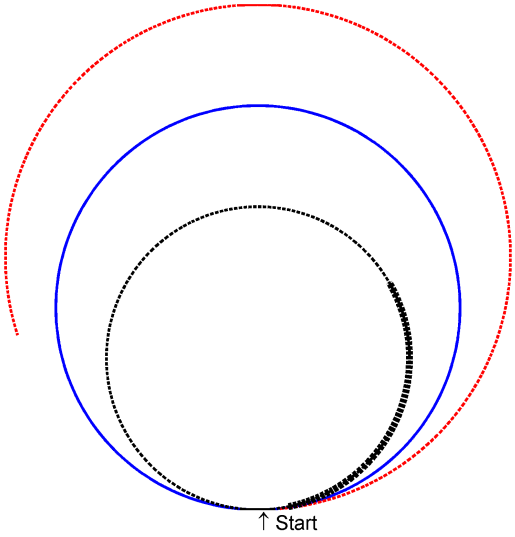
Når der er fejl på den bestemte afstand mellem baghjulene, resulterer det i forbindelse med positionsberegning i en fejl på retningen. Figur 5.9 på modstående side viser den kørte rute i en cirkel (blå linje) med start og stop i samme punkt. Hvis afstanden mellem hjulene er angivet større end afstanden reelt er, bliver den beregnede rutes cirkelradius større end den kørte rute (rød stiplet linje). Eftersom WE'erne stadig bevæger sig samme afstand uanset afstand mellem hjul, resulterer det i at ruten bliver for kort. Omvendt hvis afstanden mellem hjulene er angivet mindre end afstanden reelt er, så bliver den beregnede cirkelradius mindre end den kørte rute og der køres for langt (sort stiplet linje).

Fejl i m	Fejl på retningsvinkel i grader
±0.010	±0.36
±0.020	±0.72

Tabel 5.1 – Fejl på retningsvinkel forårsaget af fejl på hjulafstand.

Til at illustrere fejlens betydning opstilles et eksempel; der drejes i et 360° sving med en cirkelradius på 10 m og en hjulafstand på 2 m. Hvis der er en fejl på hjulafstanden

giver det en fejl på retningsvinklen efter svinget som angivet i tabel 5.1.



Figur 5.9 – Cirkelrute, kørt mod uret, hvor den blå linje viser den kørte rute. Rød stiplet linje viser WE-rute med for stor hjulafstand, mens sort stiplet linje viser WE-rute med for lille hjulafstand.

5.3.3 Hjulspind

Hjulspind defineres til at hjulet drejer rundt selvom der ikke køres frem eller tilbage. WE'en måler stadig hjulets rotation som oversættes til en kørt afstand. Den kørte afstand, der beregnes ud fra observationer, vil som følge af hjulspind være længere end den reelt kørte afstand. [Chung et al., 2008, s. 582]

Man kan aktivt forsøge at mindske risikoen for at fejlen opstår ved at accelerere langsomt og hele tiden have kontakt mellem overflade og dæk. Når WE'erne ikke er monteret på køretøjets trækkende hjul, hvilket er tilfældet i dette projekt, bør hjulspind ikke forekomme under dataopsamling.

5.3.4 Skridning

Skridning betyder at hjulets orientering ændres uden det registreres af WE'erne [Chung et al., 2008, s. 582]. Problemet kan forklares ved at forestille sig en håndbremsevending i bil. Baghjulene blokeres og WE'erne registrerer ikke længere rotation, men bilen flytter sig stadig. Samtidig kan der også ske en ændring i bilens retning, som WE'erne

heller ikke kan registrere, da hjulene er blokeret. Problemet er næppe af en størrelsesordenen som beskrevet her, men sker der eksempelvis en skridning i et skarpt sving, vil det forårsage en fejl på målingerne fra WE'erne.

Risikoen for skridning kan mindskes ved at køre langsomt gennem sving samt svinge i så stor en cirkelbue som muligt.

5.3.5 Ujævn overflade

En ujævn overflade vil øge risikoen for at de to ovenstående fejl, hjulspind og skridning, sker [Chung et al., 2008, s. 582]. Desuden kan ujævn overflade knyttes til problematikken beskrevet i afsnit 2.2.3, da det ikke er mulig for projektgruppen at registrere om den ujævne overflade påvirker WE'erne i sådan en grad, at der måles en længere afstand end den tilbagelagte i 2D.

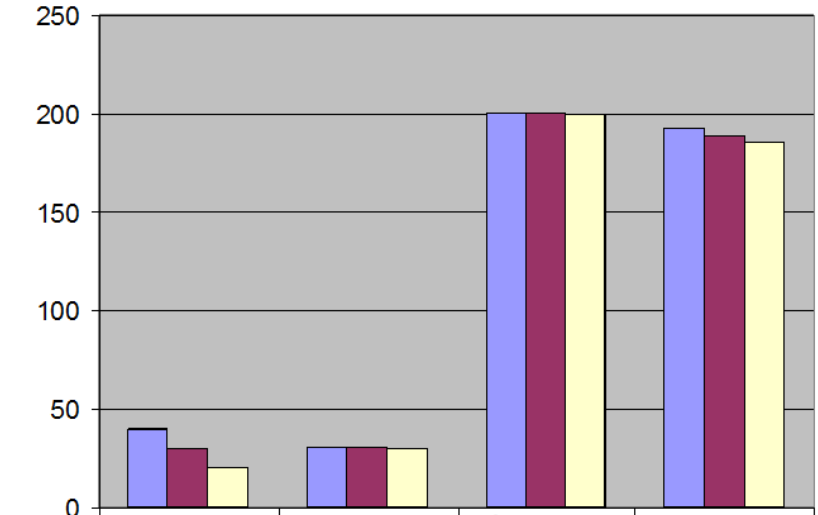
Hul i vejen

I tilfælde af at der er huller i det underlag, hvorpå hjulene ruller, vil der ligesom ved hjulspind bliver registreret, at hjulet har kørt en afstand, der er længere end den tilbagelagte. Dette forekommer dog kun, hvis hullet er bredere end dækket. Fejlkilden antages at forekomme forholdsvist sjældent ved kørsel på jævne vejoverflader.

5.3.6 Dæktryk

Som det er vist i afsnit 5.3.1, er det vigtigt at dækket har samme omkreds og dermed samme rulleafstand under hele dataopsamlingen. Ændres dækkets tryk ændres omkredsen og fortolkningen af WE'ernes udlæsning vil være fejlbehæftet. Dette sker eftersom positioneringsalgoritmen ikke kan blive opdateret med den nye omkreds. I [Juhl, 2004] undersøges effekten af ændring i dæktrykket på rulleafstanden, omkredsen, af dækket. På figur 5.10 ses effekten af fald i dæktryk fra 40 psi til henholdsvis 30 og 20 psi.

Dækkets rulleafstand måles i praksis til 200.35 cm ved et tryk på 40 psi, teoretisk udregnes den til 192.58 cm (blå søjler). Falder trykket i dækket til 30 psi måles rulleafstanden til 200.00 cm, mens den teoretisk udregnes til 188.81 cm (bordeaux søjler). Ved et fald til 20 psi, en halvering i dæktrykket, er rulleafstanden 199.70 cm i praksis, men i teorien udregnes den til 185.67 cm (gule søjler). De målte rulleafstande er forskellige fra de teoretiske beregnede rulleafstande, hvilket [Juhl, 2004] konkluderer blandt andet skyldes kanttråden i dækket. Dækket er stivere end antaget i de teoretiske beregninger og omkredsen mindskes derfor i mindre grad i praksis.



	Tryk (psi)	radius (cm)	Målt rulleafstand (cm)	Teoretisk rulleafstand (cm)
Serie1	40	30,65	200,35	192,58
Serie2	30	30,05	200,00	188,81
Serie3	20	29,55	199,70	185,67

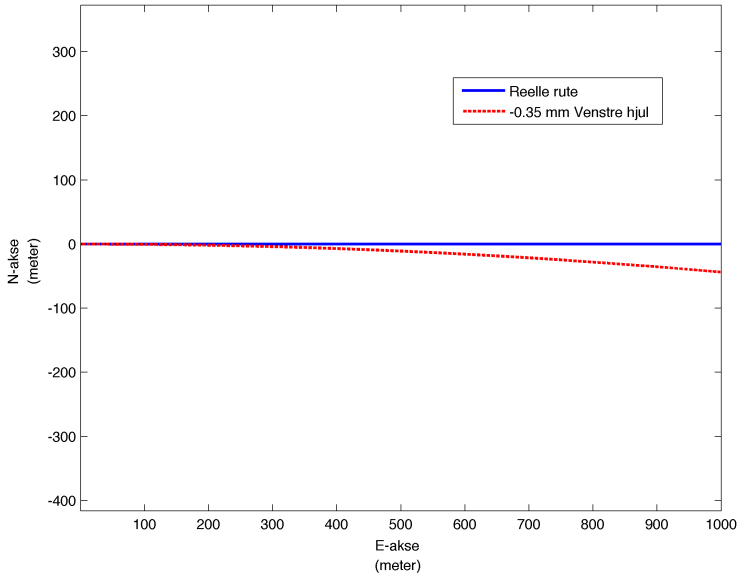
Figur 5.10 – Effekten på dækkets rulleafstand på grund af fald i dæktryk fra 40 psi til henholdsvis 30 og 20 psi. [Juhl, 2004]

Hvis trykket kun falder i det ene dæk vil effekten fejlen forårsager være som beskrevet i afsnit 5.3.2. I et simpelt regnet eksempel, med baggrund i oplysningerne fra figur 5.10, antages dæktrykket at falde fra 40 til 39 psi, hvilket medfører en ændring i dækkets rulleafstand til: 200.35 cm – $\frac{(200.35-200.00\text{cm})}{10\text{ psi}}$ = 200.315 cm [4]. Ændringen giver en fejl på 0.035 cm, hvilket vil betyde en fejl på slutposition, efter kørsel ligeud i 1000 m, på 43.67 m. Hovedparten af fejlen på slutpositionen forekommer i den tværgående retning, som det ses af figur 5.11.

Falder trykket ens i begge dæk vil fejlen betyde, at den kørte afstand vil være mindre end den beregnede afstand fra WE'erne.

Fejl forårsaget af dæktrykket fjernes ved kalibrering, men der kan stadig opstå ændring under kørsel. Ændring i dæktryk kan ske ved punktering eller temperaturændringer. Ved punktering vil trykket i dækket falde og der kan ikke korrigeres for dette, hvorfor målingerne umiddelbart må gentages efter dækket er repareret, der skal dog først udføres en ny kalibrering af hjulomkredsen. Ved ændring i temperaturen kan der ske stigning eller fald i dæktrykket. Stigning vil ske hvis temperaturen bliver højere, mens fald vil ske hvis temperaturen bliver lavere. På [7] nævnes det, at en tommelfingerregel siger, at en ændring i temperaturen på 5.5 ° celsius medfører en ændring i dæktrykket

[4] Dette er beregnet med antagelse om, at ændringen i rulleafstand er lineær mellem Serie 1 og Serie 2.



Figur 5.11 – Illustration af fejl forårsaget af trykfald på venstre hjul med 1 psi jf. figur 5.10

på 1 psi. Det efterprøves hvorvidt normal kørsel medfører en temperatur- og trykændring. Dette gøres ved at måle dækkenes tryk før start, hvor disse gerne skulle have samme temperatur som omgivelserne[5]. Herefter køres der en tur på 30 minutter på landevej, hvor tryk måles hver femte minut. Resultatet af denne simple test er angivet i tabel 5.2.

Det ses af resultaterne fra den forholdsvist simple test, at der sker ændring i dæktrykket under kørsel i forhold til opstartsværdierne. Ændringen er ikke ens på begge hjul, hvilket kan skyldes, at køretøjet under montering af udstyr har været parkeret således, at det ene hjul er blevet varmet op af solen. Efter 10 min. kørsel stabiliseres trykket i begge baghjul, hvorfor det må konkluderes, at det er nødvendigt at foretage 10 min. kørsel og derved varme dækkene op inden, der udføres kalibrering af hjulomkreds.

5.3.7 Dækslid

Det er nødvendigt at være opmærksom på sliddet på dækkene, da det også vil mindske omkredsen af dækket. Projektgruppen antager dog at dækslid ikke vil have betydning under den enkelte dataopsamling.

[5]Hver gang trykket måles undslippes en mængde luft fra dækket. Den mængde luft der undslipper betragtes dog som værende så begrænset, at den ikke har betydning.

Tid	Dæktryk (psi)	
	Højre	Venstre
0 min.	39.5	39.5
5 min.	39.5	41.5
10 min.	39.5	42.0
15 min.	39.5	42.0
20 min.	39.5	42.0
25 min.	39.5	42.0
30 min.	39.5	42.0

Tabel 5.2 – Ændring af temperatur og dæktryk i køretøjets baghjul ved normal kørsel over en periode på 30 min. og ved blandet kørsel. Den maksimale hastighed har været på 50 km/t.

Ændret hjulomkreds som følge af slid på dækket kan fjernes ved kalibrering, da den aktuelle omkreds udregnes. Derfor bør kontrol af kalibrering foretages forud for dataopsamling.

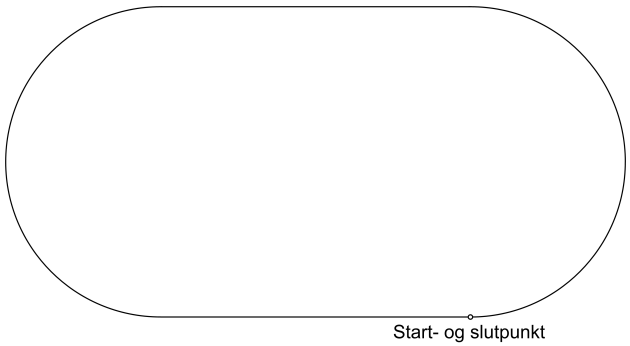
5.4 Kalibrering

Afsnittet har til formål at præsentere en kalibreringsmetode, der anvendes til bestemmelse af køretøjets *hjulafstand* og *hjulomkreds*. Kalibreringsmetoden, der beskrives, tager udgangspunkt i [Chung et al., 2008].

I [Chung et al., 2008] præsenteres en metode til kalibrering af hjulomkreds og hjulafstand på en bil-lignende robot, hvor robotten programmeres til at følge en oval bane, se figur 5.12. Banen køres først med urets retning derefter mod urets retning, for at kalibrere for begge fejl samtidig. Der opstilles en række formler, der ud fra afvigelse på slutpositionerne anvendes til at kalibrere hjulafstand og forhold mellem hjulomkreds. Formålet med at udføre kalibreringen på denne måde har været at undgå anvendelse af eksterne sensorer.

Projektgruppen har andre muligheder og forudsætninger for at udføre kalibrering end [Chung et al., 2008], da projektgruppen ønsker at drage nytte af totalstationer og GNSS til kalibrering af hjulomkreds og hjulafstand. Derfor anvendes [Chung et al., 2008] som inspiration til rapportens kalibrering.

I afsnittet vil den matematiske baggrund for kalibreringen og udførelse blive beskrevet. Til illustration af hvor godt henholdsvis hjulafstand og -omkreds bestemmes anvendes Monte Carlo simulering.



Figur 5.12 – Oval bane anvendt til kalibrering i [Chung et al., 2008].

5.4.1 Kalibrering af hjulomkreds

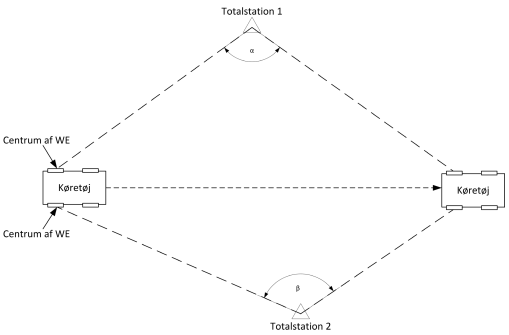
I forhold til metoden beskrevet i [Chung et al., 2008], hvor der køres i en oval bane og forholdet mellem højre og venstre hjulomkreds udregnes, vil projektgruppen kalibrere hjulomkredsen ved udelukkende at køre på en lige linje. Kalibreringen foregår ved at sammenholde den kørte afstand langs en lige linje med antallet af rotationer hjulene har foretaget. Der findes flere måder at opmåle den kørte afstand på, men det er essentielt at denne afstand bestemmes med høj nøjagtighed. Da projektgruppen både har totalstation og GNSS-modtager til rådighed[6], ønskes det undersøgt hvilket af disse instrumenter, der er bedst og mest anvendeligt til at måle denne afstand.

Anvendelse af totalstation

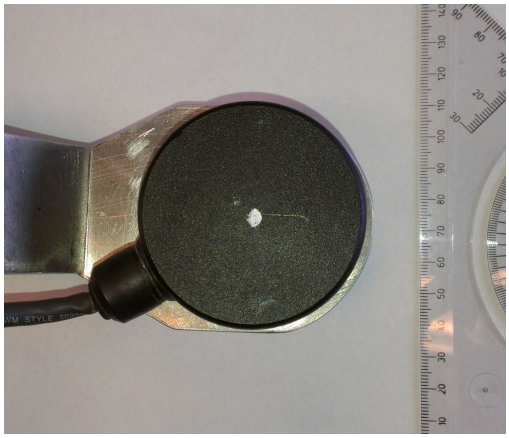
Ved hjælp af totalstationsmålinger udregnes koordinater til WE'erne ved start og slut i et lokalt koordinatsystem og den kørte afstand beregnes separat for henholdsvis højre og venstre WE. Disse sammenholdes med målingerne af antallet af ticks fra WE'erne og hjulomkredsen kan udregnes. Den anvendte opstilling ses af figur 5.13.

Et punkt markeres på hver enkel WE, for at der måles til samme punkt hver gang, se figur 5.14. Et prisme sættes på den markerede prik og rettes mod totalstationen, der optager en afstandsmåling. Herefter drejes totalstationens sigte ind på prikken på WE'en så horisontalretningen og vertikalvinklen kan optages, der måles desuden med gennemslag. Dette gentages ved start og slut. For at få overbestemmelse skal der foretages fem test til bestemmelse af hver hjulomkreds. Afstanden behøver ikke være den samme hver gang da afstanden udregnes for hver test. Ud fra specifikationerne for dækkene kan hjulomkredsen antages at være ca. 2 m. Det vælges derfor at køre en strækning

[6]Projektgruppen har anvendt en Leica TCR 1205+ totalstation og en Leica RX1210T RTK GNSS-modtager. Specifikationer for begge instrumenter er at finde i appendiks D.



Figur 5.13 – Kalibrering af hjulomkreds ved opstilling af to totalstationer og måling til centrum af WE.

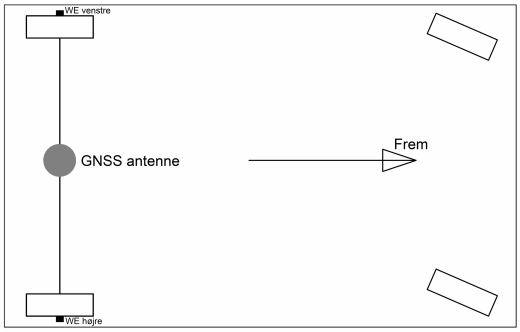


Figur 5.14 – Prik på WE der anvendes til at centrere miniprisme.

på ca. 100 m, eller ca. 50 rotationer, for at eventuelle fejl vil blive fordelt på ca. 50 rotationer.

Anvendelse af GNSS

Ved anvendelse af GNSS til bestemmelse af den kørte afstand, monteres en GNSS-modtager midt over køretøjets center akse (det tilstræbes ligeledes at montering sker midt mellem de to hjul, hvor WE er monteret), se figur 5.15. Der opsamles GNSS-observationer under testen, hvorefter den tilbagelagte afstand kan beregnes.



Figur 5.15 – Montering af GNSS-antenne over bilens center samt baghjulenes akse.

Til forskel fra anvendelse af totalstation til bestemmelse af den kørte afstand for hver WE, vil der ved GNSS kun blive bestemt én afstand til at bestemme begge WE'ernes kørte afstand. Fordelen ved anvendelse af totalstation er netop, at den kørte afstand

for den enkelte WE bestemmes med høj præcision (højere end ved GNSS). Dog har GNSS fordelen i at denne metode er mere praktisk anvendelig og kan lettere anvendes over længere distancer. Ved anvendelse af GNSS er det desuden muligt at foretage kalibrering løbende under kørsel, fordi metoden er dynamisk og ikke statisk som totalstation.

Ud fra samme antagelse om hjulomkreds, som ved totalstation, og kendskab til spredning på enkeltpunktsbestemmelse ved GNSS, jf. appendiks D, vælges det at køre en strækning på ca. 1000 m. Ved en hjulomkreds på 2 m giver det ca. 500 rotationer på den kørte strækning.

Matematisk grundlag

Fra observationsfilerne fra WE'erne summeres antallet af ticks for henholdsvis højre og venstre WE. Summen af ticks divideres med 10000 for at få antal rotationer. Afstandsmåling fra totalstationen eller GNSS deles med antallet af rotationer og giver hjulomkredsen:

$$\text{Hjulomkreds} = \frac{\text{dist}_{\text{målt}}}{\left(\frac{\sum \text{ticks}}{10000}\right)} \tag{5.1}$$

Til beregningen af hjulomkredsen ved brug af totalstation er MATLAB-scriptet, der ses af appendiks E.2 anvendt. Ved brug af GNSS er MATLAB-scriptet der ses af appendiks E.3 anvendt.

For at få den bedst estimerede værdi for hjulomkredsen anvendes mindste kvadraters udjævning.

Udførelse og resultat

Til kalibrering med totalstation anvendes et område med et jernbanespor. Jernbanesporet gør det nemmere for føreren af køretøjet at holde samme kurs og dermed sikre bedste mulige data, se figur 5.16. Der gennemføres fem test; korteste kørte afstand var ca. 95 m og længste ca. 103 m.

Til kalibrering med GNSS anvendes en ca. 1.1 km jævn og lige vej, der ses af figur 5.17. Der gennemføres tre test.

Beregningen baseret på henholdsvis måling med totalstation og GNSS gav resultaterne, der ses af tabel 5.3, den fulde resultatfil er gengivet i appendiks F.1.



Figur 5.16 – Rute langs jernbanespor til kalibrering af hjulomkreds, i højre og venstre side ses de anvendte totalstationer. GNSS-modtageren ses monteret midt på køretøjets tagbøjler.



Figur 5.17 – Lige vej anvendt i forbindelse med kalibrering ved anvendelse af GNSS.

Instrument	Hjul	Hjulomkreds	σ_{omkreds}
Totalstation	Venstre:	2.0422 m	0.00036 m
	Højre:	2.0389 m	0.00047 m
GNSS_{0205}	Venstre:	2.0417 m	0.00286 m
	Højre:	2.0370 m	0.00289 m
GNSS_{0705}	Venstre:	2.0409 m	0.00057 m
	Højre:	2.0362 m	0.00054 m

Tabel 5.3 – Resultat af kalibrering af hjulomkredsen for henholdsvis højre og venstre baghjul med totalstation jf. appendiks F.1.1.

Tabel 5.3 viser at hjulomkredsene baseret på GNSS_{0205} er væsentlig dårligere bestemt end Totalstation, hvilket formodes at være forårsaget af en fejl i den første af de tre test i GNSS_{0205}, se appendiks F.1.2. Derfor blev der gennemført yderligere fem test til kalibrering med GNSS (GNSS_{0705}). Hvilket viste en spredning der omtrent svarer til spredningen opnået med Totalstation.

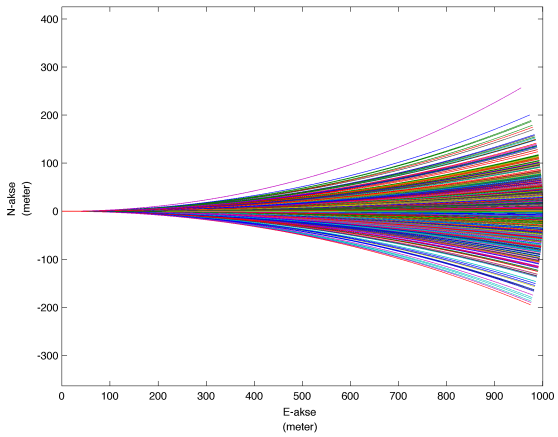
Af de to metoder til bestemmelse af afstanden anvendes GNSS i det videre arbejde, da det gennem indledende test har vist sig at være mere praktisk anvendeligt og det er muligt at opnå omtrent den samme præcision som ved totalstation.

Monte Carlo simulering

Til illustration af effekten af den nøjagtighed, hvormed de to hjulomkredse kan bestemmes, anvendes Monte Carlo simulering. Simuleringen udføres således at en lige strækning på 1000 m beregnes 1000 gange med forskellige spredninger på bestemmel-

sen af hjulomkredsen. Der er gennemført simuleringer tre gange: én hvor omkredsen er bestemt med totalstation og to med GNSS fra to forskellige test. Udfaldene af alle simuleringerne er normalfordelte.

Første simulering har en spredning på bestemmelsen af venstre hjulsomkreds på 0.00036 m og højre hjulomkreds på 0.00047 m, hvor hjulomkredsen er bestemt med totalstation. Simuleringen ses af figur 5.18.



Figur 5.18 – Monte Carlo simulation af effekten af usikkerhed på bestemmelse af hjulomkreds ved kørsel lige ud i 1000 m. Hjulomkredsen er bestemt ved anvendelse af Leica totalstation.

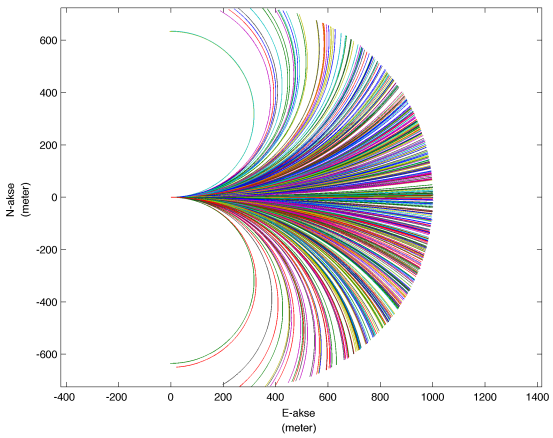
Figur 5.18 viser at simuleringerne med undtagelse af én afviger fra den korrekte rute i intervallet fra ca. -200 til ca. 200 m på tværs af den kørte retning ved 1000 m kørsel.

Anden simulering har en spredning på bestemmelsen af venstre hjulsomkreds på 0.00286 m og højre hjulomkreds på 0.00289 m, hvor hjulomkredsen er bestemt med GNSS, jf. tabel 5.3. Simuleringen ses af figur 5.19.

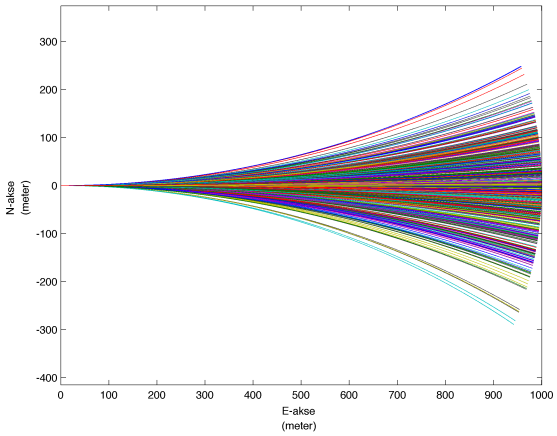
Figur 5.19 på næste side viser, at simuleringerne falder væsentligt anderledes ud end den første simulering. På grund af den høje spredning på bestemmelserne af hjulomkredsene falder en stor del af simuleringerne uhensigtsmæssigt ud. Som tidligere beskrevet viser en empirisk undersøgelse af de GNSS-bestemte hjulomkredse, at der opnås et bedre resultat på trods af det større spænd på udfaldene af simuleringerne.

Til illustration af at det er muligt at bestemme hjulomkredsen med GNSS mere nøjagtigt, er der foretaget yderligere en kalibrering (på en anden dato), hvor spredningen på venstre hjulsomkreds på 0.00057 m og højre hjulomkreds på 0.00054 m. Disse værdier er anvendt i simuleringen, der er illustreret af figur 5.20.

Udfaldet af simuleringen, der ses af figur 5.20, er væsentligt bedre end figur 5.19 og har



Figur 5.19 – Monte Carlo simulation af effekten af usikkerhed på bestemmelse af hjulomkreds ved kørsel lige ud i 1000 m. Hjulomkredsen er bestemt ved anvendelse af Leica GNSS og data er opsamlet d. 02/05 2012.



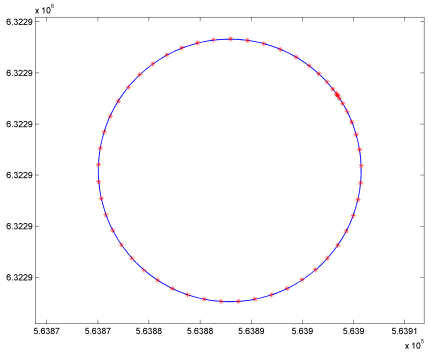
Figur 5.20 – Monte Carlo simulation af effekten af usikkerhed på bestemmelse af hjulomkreds ved kørsel lige ud i 1000 m. Hjulomkredsen er bestemt ved anvendelse af Leica GNSS og data er opsamlet d. 07/05 2012.

i højere grad karakter af, hvad der kan opnås med totalstation. Det konstateres at det med GNSS er muligt at opnå en tilfredsstillende bestemmelse af hjulomkreds. Anvendelsen af GNSS til bestemmelse af hjulomkreds er mere praktisk end totalstation, da det vil kunne gøres løbende under kørsel, når der køres af lige og jævne vejstrækninger. Derved vil der kunne tages højde for eventuelle ændringer i hjulets omkreds, der som nævnt kan forårsages af ændring i dæktryk.

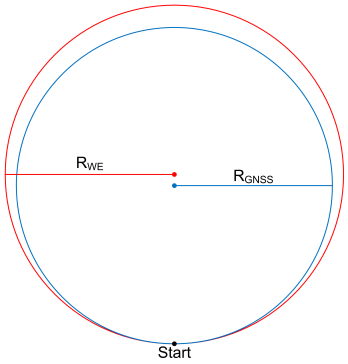
5.4.2 Kalibrering af hjulafstand

I [Chung et al., 2008] kalibreres hjulafstanden i cirkelbuerne på den ovale bane. Fordi hjulomkredsen forudgående er kalibreret ved kørsel på lige linje anvendes kun kørsel i en cirkel til kalibrering af hjulafstanden i denne rapport.

Den opnåede viden fra afsnit 5.3.2 om hvad effekten af fejl på hjulafstanden vil være ved kørsel i en cirkel, udnyttes til kalibreringen. En referencecirkel konstrueres ud fra punkter fra en GNSS-modtager. Punkterne fra GNSS-modtageren anvendes til at lave den bedst mulige cirkel ud fra mindste kvadraters udjævning, se figur 5.21. Referencecirklen sammenlignes med den beregnede cirkelrute, se figur 5.22.



Figur 5.21 – Bedste cirkel (blå linje) konstrueret ud fra GNSS-punkter (Røde punkter) ved hjælp af mindste kvadrateres udjævning.



Figur 5.22 – Referencecirkel (blå) og beregnet cirkel (rød) set sammen.

Ved at udregne forholdet mellem radius for de to cirkler, henholdsvis referencecirkel og beregnet cirkel, kalibreres hjulafstanden med dette forholdstal. For at sikre at der køres i en cirkel skal bilen dreje ens fra start til slut. En pind monteres på rattet og et punkt markeres som skal flugte med pinden til hjælp for at holde samme ratstilling og drejning, se figur 5.23. To landmålerstokke opstilles så et punkt på bilen flugter med dem, bilen kan således starte og stoppe samme sted, se figur 5.24. Kørsel i cirklen gentages ti gange.

Matematisk grundlag

Fra GNSS-observationerne udregnes den bedste tilpassede cirkel gennem punkterne. Beregning udføres iterativt indtil tilpasningen konvergerer, se MATLAB-script i appendiks E.4.

Med antagelsen om, at der er kørt i en cirkel kan der ud fra WE-observationerne udregnes en cirkelomkreds og retningsvinkel, der beskriver hvor mange grader køretøjet



Figur 5.23 – Føreren af køretøjet flugter kanten på pinden med et punkt på instrumentbrættet og holder samme ratstilling.



Figur 5.24 – Sikring af ens start- og stoppunkt ved flugt af sidespejl og to landmålerstokke.

har bevæget sig rundt i cirkel:

$$S_M = \frac{S_v + S_h}{2} \qquad \text{se formel 2.1 og 2.2}$$

$$\phi_M = \frac{S_v - S_h}{C} \qquad \text{se formel 2.3}$$

Radius for de to cirkler udregnes og forholdstal mellem dem udregnes og anvendes til at kalibrere hjulafstanden:

Radius for WE-cirkel beregnes:

$$R_{\mathrm{WE}} = \frac{S_M}{\phi_M} \tag{5.2}$$

Forhold radius GNSS og WE:

$$F = \frac{R_{\mathrm{GNSS}}}{R_{\mathrm{WE}}} \tag{5.3}$$

Hjulafstanden kalibreres:

$$\mathrm{Hjulafstand}_{\mathrm{kalibreret}} = \mathrm{Hjulafstand}_{\mathrm{spec.}} \cdot F \tag{5.4}$$

Ligesom ved kalibrering af hjulomkreds anvendes mindste kvadraters udjævning af hjulafstanden for alle testene.

Udførelse og resultat

Der blev fundet en egnet parkeringsplads, hvor de 10 test blev gennemført, se figur 5.25. Der er kørt i en cirkel med en radius på ca. 13 m.



Figur 5.25 – Parkeringsplads anvendt til kalibrering af hjulafstand.

Hjulafstanden er efter beregningen kaliberet og resultatet kan ses i tabel 5.4. Resultatfilen fra udregningen kan ses af appendiks F.2.

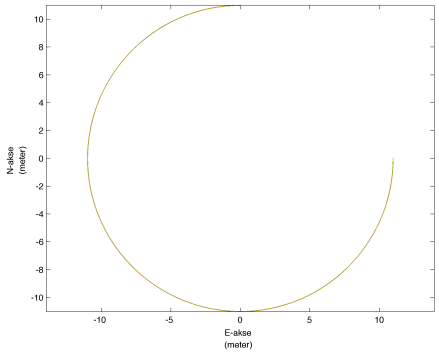
Hjulafstand	$\sigma_{\text{hjulafstand}}$
1.5802 m	0.0012 m

Tabel 5.4 – Kalibreret hjulafstand. I beregningerne er 1.574 m anvendt som startværdi for hjulafstand.

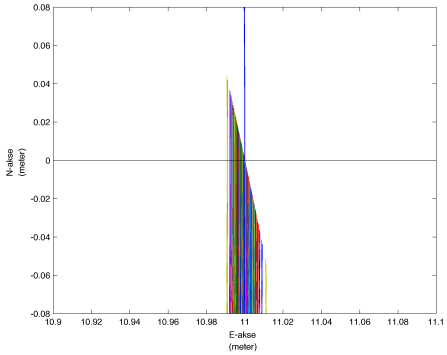
Monte Carlo simulering

Til illustration af effekten af den usikkerhed, hvormed hjulomkredsen kan bestemmes, anvendes Monte Carlo simulering, se figur 5.26 og 5.27. Simuleringen udføres således at en cirkel med en radius på 12 m køres 1000 gange. Udfaldene af simuleringen er normalfordelte med en spredning på 0.0012 m.

Det ses af figur 5.27 at simuleringerne burde være endt ved 0-linjen, men i stedet ender med at være "kørt for langt", hvis radius i cirklen har været for lille og "for kort" hvis radius har været for stor.



Figur 5.26 – Monte Carlo simulation af effekten af usikkerhed på bestemmelse af hjulomkreds ved kørsel i en cirkel. Kun $\frac{3}{4}$ af den kørte cirkel er plottet.



Figur 5.27 – Forstørrelse af simuleringernes slutpunkter. Den blå linje i midten er at betragte som fejlfri og er reference.

5.5 Beregningsmetode til positionering

Matematikken til beregning af positioner med WE'er, som blev præsenteret i afsnit 2.2.1, antager at den afstand som WE'er måler i en epoke er den korteste afstand mellem de to positioner. Dette skaber problemer hvis denne antagelse er fejlagtig, eksempelvis hvis der er foretaget drejninger i epoken.

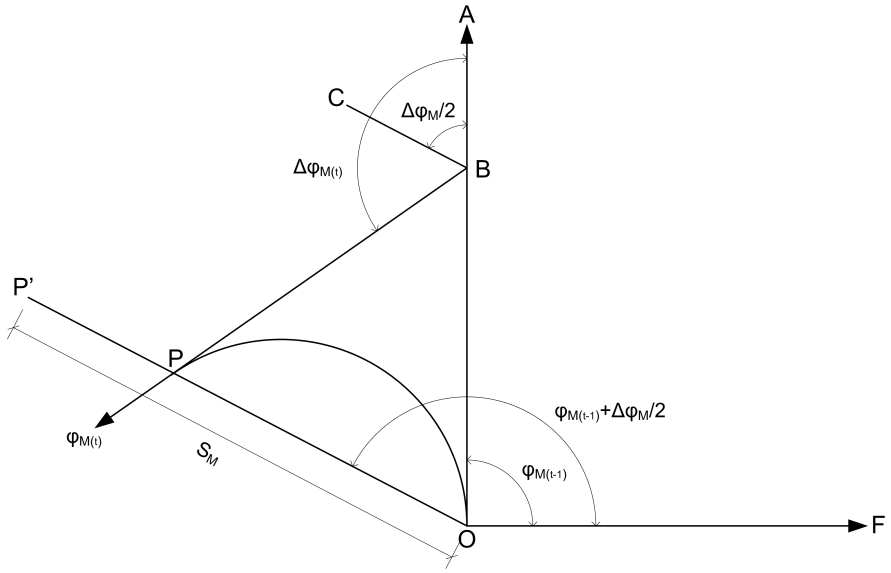
Det antages at til tiden $t-1$, befinder køretøjet sig i $O = (X_{t-1}, Y_{t-1})$ og det er orienteret imod punktet A, se figur 5.28. Hvor F er nulretningen og retningen mod A ($\phi_{M_{t-1}}$) er $\angle AOF$. Ud fra WE-data bestemmes S_{M_t} (formel 2.2) og $\Delta\phi_{M_t}$ ($\angle ABP$)(formel 2.3), ud fra disse ønskes det at bestemme positionen til tiden t, benævnt P. [Wang, 1988]

Den nye orientering ϕ_{M_t} bestemmes ved $\phi_{M_{t-1}} + \Delta\phi_{M_t}$, men positionen er umiddelbart ukendt. Ruten kan principielt være hvilken som helst rute der starter i O, bevæger sig ialt S_{M_t} og drejer $\Delta\phi_{M_t}$.

For at bestemme positionen skal der gøres en antagelse om hvorledes køretøjet har bevæget sig i epoken. Hvis det antages at bevægelsen har været cirkulær, så er $S_{M_t} = bueOP$ og $\Delta\phi_{M_t} = \angle ABP$, mens den nye orientering ϕ_{M_t} er $\angle POF$. Det kan vises at BC er parallel med OP og halverer vinklen $\angle ABP$ [Wang, 1988, s. 1231], denne vinkel er den ændring der skal lægges til $\angle AOF$ for at bestemme $\angle POF$, hvorfor formlen opstilles som i formel 5.5.

$$\phi_{M_t} = \angle POF = \angle AOF - \angle AOP = \phi_{M_{t-1}} + \Delta\phi_{M_t}/2 \tag{5.5}$$

[Wang, 1988, s. 1231]



Figur 5.28 – Relation mellem positioner

Positionen beregnes herefter ud fra de i afsnit 2.2.1 nævnte formler: 2.4 og 2.5 [Wang, 1988, s. 1231]. Problemet med denne antagelse er at den tilbagelagte afstand *bueOP* reelt er afstanden *OP'*, og positionen der beregnes er for punktet *P'*.

For at omgå dette problem introducerer [Wang, 1988] en justeringsfaktor, som beskriver forholdet mellem *bueOP* og *OP*, se formel 5.6

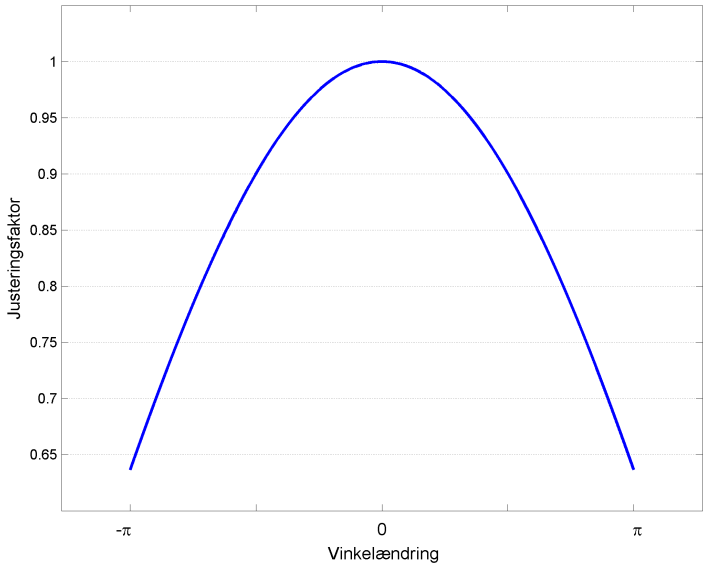
$$OP = \frac{\sin(\Delta\phi_{M_t}/2)}{\Delta\phi_{M_t}/2} S_{M_t} \tag{5.6}$$

[Wang, 1988, s. 1231]

Denne justeringsfaktor finder anvendelse ved antagelse om, at bevægelsen mellem epoker er cirkulære, og reducerer den målte afstand til *OP*. Antagelsen om at bevægelsen mellem epoker er cirkulær findes at være rimelig ud fra formodninger om køretøjets bevægelsesmønster og viden om tiden mellem epokerne. Forskellen mellem buelængden *bueOP* og *OP* vil være mindre desto kortere tiden mellem de enkelte epoker er[7], da bevægelsen fra *O* til *P* i større og større grad vil kunne betegnes som en lige linje. Justeringsfaktoren tager hensyn til dette ved at gå mod 1 desto mindre $\Delta\phi_{M_t}$ er, dette er visualiseret i figur 5.29.

Ved en vinkelændring på 0 vil der opstå problemer ved anvendelse af justeringsfaktoren, da der i så fald skal divideres med 0. Der vil under beregning af positioner blive

[7] Det vil sige desto højere indsamlingsfrekvensen er.



Figur 5.29 – Udvikling af justeringsfaktoren i forhold til vinkelændring i epoken.

taget hensyn til dette.

Implementering af justeringsfaktoren medfører en tilføjelse til positioneringsformlerne, formel 2.4 og 2.5, som vist nedenfor i formel 5.7 og 5.8:

$$X_{M(t)} = X_{M(t-1)} + \frac{\sin(\Delta\phi_{M_t}/2)}{\Delta\phi_{M_t}/2} S_{M(t)} \cos(\phi_{M(t-1)} + \Delta\phi_{M(t)}/2) \tag{5.7}$$

$$Y_{M(t)} = Y_{M(t-1)} + \frac{\sin(\Delta\phi_{M_t}/2)}{\Delta\phi_{M_t}/2} S_{M(t)} \sin(\phi_{M(t-1)} + \Delta\phi_{M(t)}/2) \tag{5.8}$$

[Wang, 1988, s. 1231]

hvor,
$X_{M(t)}$ og $Y_{M(t)}$ er X- eller Y-koordinatet efter epoken.
$X_{M(t-1)}$ og $Y_{M(t-1)}$ er X- eller Y-koordinatet fra forrige epoke.
$S_{M(t)}$ er afstanden i epoken.
$\phi_{M(t-1)}$ er retningsvinklen for midterpunktet. (Radianer)
$\Delta\phi_{M(t)}$ er ændringen til retningsvinklen. (Radianer)

5.6 Databehandling

Når data er blevet indsamlet, som forklaret i afsnit 5.2, skal det behandles for at føre til positioner. Denne behandling vil i dette projekts tilfælde foregå i MATLAB, hvorfor der er blevet udarbejdet et script, som implementerer matematikken beskrevet i det forgående afsnit. Dette script er beskrevet i detaljer i appendiks E.1.

Opsummering og opstilling af test

6

Dette afsnit har til formål at opsummere den opnåede kendskab til WE'eres virkemåde, beregningsgangene ved positionering samt de fejlkilder, der forbundet med anvendelsen af dem. På baggrund af denne viden opstilles teoretiske styrker og svagheder ved anvendelse af WE'er til positionering. Afslutningsvis opstilles test, der kan efterprøve de teoretiske styrker og svagheder.

Opsummering på montering/virkemåde

WE monteres på et køretøjets baghjul og registrerer derfor disses rotationer. Fordelen ved denne montering, i forhold til hvis de var monteret på køretøjets forreste og trækkende hjul, er at hjulene løber forholdsvist frit og ikke udsættes for skridning i forbindelse med sving under kørsel.

I kraft af WE'ernes virkemåde, der betyder at alle observationer opsamles relativt, er dataopsamlingen og anvendeligheden af data stærkt afhængig af at observationerne opsamles kontinuert. Data fra WE'erne opsamles med en frekvens på 20 Hz, hvilket ligeledes er ideelt når målingerne foretages relativt. Dette skyldes, at jo kortere tid der går mellem hver observation, desto mindre er den ændring og fejl, der observeres.

Opsummering af beregningsmetode

Med en kendt radius på det hjul, hvor WE'en er monteret, kan observationer fra WE'en direkte omsættes til afstande, da der med kendskab hjulets radius kan beregnes hvor langt hjulet bevæger sig for hvert tick, WE'erne registrerer. Når der observeres afstande direkte, er det ikke nødvendigt at foretage nogen form for integration i beregningsmetoden, som det f.eks. er nødvendigt ved positionsberegning fra IMU observationer. Beregningsmetoden, der anvendes til IMU positionering, medfører en fejludvikling, der sker med tiden i tredje på grund af, at der skal foretages integration af IMU'ens observationer. Særligt gyro-observationerne bidrager til fejl på positioneringen, da disse integreres tre gange for at nå frem til positioner [Nebot et al. 1997].

Både IMU og WE er sensorer, der måler relativt, men WE har umiddelbart styrker i forhold til IMU, i at fejlophobningen er afhængig af den kørte afstand og ikke af tid.

Opsummering af fejlkilder

Umiddelbart bør alle fejlkilder anses for svagheder ved WE, men de fejlkilder, der kan fjernes eller mindskes ved kalibrering anses ikke i samme grad som en svaghed.

Essentielt for positioneringen med WE er kendskab til hjulomkreds og hjulafstand, hvorfor fejl herpå har stor betydning. Dog er det muligt, ved hjælp af den opstillede kalibreringsalgoritme, at bestemme disse to parametre og derved forbedre positioneringen.

Fejlkilderne, der ikke er mulige at kalibrere, udgør umiddelbart en større svaghed for WE'erne. Disse fejl er: *hjulspind, skridning, ujævn overflade, hul i vejen, dæktryk og slid.*

Fejlkilderne *hjulspind* og *skridning* opstår begge i nogen grad naturligt under kørsel, dog bør *hjulspind* ikke være hyppigt forekommende ved kørsel på jævne overflader, når WE er monteret på ikke-trækkende hjul. Dog vil der, når der foretages sving under kørsel, i nogen grad forekomme *skridning* af de hjul, hvorpå WE'erne er monteret - jo skarpere sving, desto større *skridning*. Størrelsen af denne fejl er formodentlig afhængig af hvilket underlag, der køres på, derfor bør der foretages undersøgelse af betydningen af fejlen ved test med kørsel på forskellige belægninger.

Fejlkilderne *ujævn overflade* og *hul i vejen* opstår som følge af den belægning, der køres på, hvorfor disse fejl kan mindske ved valget af den rute, som køres. Størrelsen af disse fejl kan vurderes ved at foretage kørsler på forskellige underlag.

Fejlkilderne *dæktryk* og *dækslid* antages begge at være uændret under kørsel og indvirkningen af disse sker udelukkende på hjulet omkreds. Med udgangspunkt i at der kalibreres forud for test med WE'er, vil der blive taget højde for ændringen, som fejlene forårsager, i kalibreringen. I [Juhl, 2004] vises, at en ændring af dæktrykket på 1 psi giver en ændring i omkreds på 0.35 mm[1], hvilket vil give udslag i bestemmelsen af retningsvinklen. Dog må det antages at en ændring i dæktryk, der er forårsaget af dækkets opvarmning eller af at den omgivende temperatur ændres, vil ske ens på begge hjul. Sker en ændring af samme størrelsesorden på begge hjul, vil den ikke have betydning bestemmelse af retningsvinkel, men den tilbagelagte afstand vil være fejlagtig. Undersøgelse af dæktrykkets udvikling under kørsel viser at dette stabiliserer sig efter 10 min. kørsel, hvorfor der før kalibrering og dataopsamling skal være kørt i mindst 10 min.

Summen af de ovennævnte fejl medfører at tilliden til positionen, der beregnes med WE, falder i takt med den kørte afstand. Dette kan giver en begrænsning i anvendelse af WE, som ikke opstår på grund af sensorens egenskaber, men på grund af anvendel-

[1] Dette er beregnet på baggrund af figur 5.10 med antagelse om, at ændringen i rulleafstand er lineær mellem Serie 1 og Serie 2.

sen af den. Hvor stor summen af fejlene er, er afhængig af hvor og hvordan, der køres. Derfor vil det være svært at undersøge generelt, hvor meget fejlene vokser i forhold til afstand, når disse summeres, men det vil kunne undersøges i forskellige kørselsmønstre.

Opstilling af test

Den ovenstående opsummering af WE's virkemåde, beregningsgange og fejlkilderne danner grundlag for opstilling af følgende test:

- **Kørsel i cirkler på vej med fast belægning** – tester for skridning og hjulspind under optimale forhold. Test ved forskellige cirkelradier.
- **Kørsel i cirkler på vej med grusbelægning** – tester under forhold, hvor det formodes at risikoen for at der sker skridning og hjulspind er større. Test ved forskellige cirkelradier.
- **Kørsel på lige vej med jævn overflade** – tester WE's drift under optimale forhold og er sammenligningsgrundlag for kørsel på ujævn overflade.
- **Kørsel på lige vej med ujævn overflade** – tester for huller i vejen og ujævn overflade.

Ved jævn overflade forstås en asfalteret vej i god stand, uden huller uden væsentligt slid. Ved ujævn overflade forstås en vejoverflade med huller og med væsentligt slid, som ikke nødvendigvis er en grusvej.

Test 7

Afsnittet indledes med en beskrivelse af den enkelte test og hvordan den skal udføres og vurderes. Efterfølgende vil der komme en beskrivelse af hvorledes testene blev udført og afslutningsvis vurderes de opnåede resultater.

7.1 Planlægning af test

For at sikre at at de nødvendige tests bliver udført korrekt laves en måleplan med beskrivelse at udstyrsliste og testbeskrivelse, se Bilags CD'en.

Der monteres en Leica GNSS-modtager over centerpunktet på bilens bagaksel til opsamling af referencedata under de forskellige tests. Til grundlag for sammenligningen anvendes GNSS-målinger, der indsamles kontinuert med 1 Hz, mens data fra WE'erne indsamles med 20 Hz. WE'ernes observationer er dog ikke synkroniseret således, at der altid forekommer sammenfald mellem disse og observationerne fra GNSS. Derfor anvendes lineær interpolation mellem de to WE-koordinater, der ligger på hver side af et helt 1 sekund til at finde det korrekte punkt til sammenligning.

7.1.1 Cirkler

Der udføres en test for hvordan positionering med WE'erne påvirkes i sving, hvor der køres fra startposition og ca. 15 m lige ud, rattet drejes til en bestemt vinkel og der køres i en cirkel, hvorefter rattet drejes tilbage til udgangspunkt og der køres atter lige ud ca. 30 m. Testene foretages først på vej med fast belægning for at have de bedst mulige betingelser og herefter på vej med grusbelægning. Der foretages test med to radier: én med mindst mulig radius på ca. 4.5 m og én med radius på ca. 10 m. Radius på 4.5 m er køretøjets mindst mulige venderadius og den anden radius vurderes at være svarende til radius i en almindelig forekommende rundkørsel [Vejdirektoratet, 2012, s. 31]. Testene foretages tre gange på fast og tre gange på grusbelægning.

Vurdering

Formålet med at foretage test ved kørsel i cirkler er primært at undersøge, om der opstår skridning i forbindelse hermed. Skridningen vil formodentlig ikke være af samme

størrelse på begge hjul, hvorpå WE'erne er monteret, hvorfor der opstår en fejl på den radius, hvormed der drejes. Effekten af fejlen, vil fremstå tydeligst efter cirklen er fuldendt og kørslen fortsættes. Derfor beregnes spredninger og der foretages sammenligning mellem GNSS- og WE-koordinater på det lige stræk, der køres efter cirklen er fuldendt.

7.1.2 Lige vej

Der udføres en test for hvordan positionering med WE'erne påvirkes på lige vej, hvor der køres ca. 1 km uden sving. Testene foretages først på vej med jævn overflade for at have de bedst mulige betingelser og herefter på vej med ujævn overflade. Testene foretages tre gange på jævn og tre gange på ujævn overflade.

Vurdering

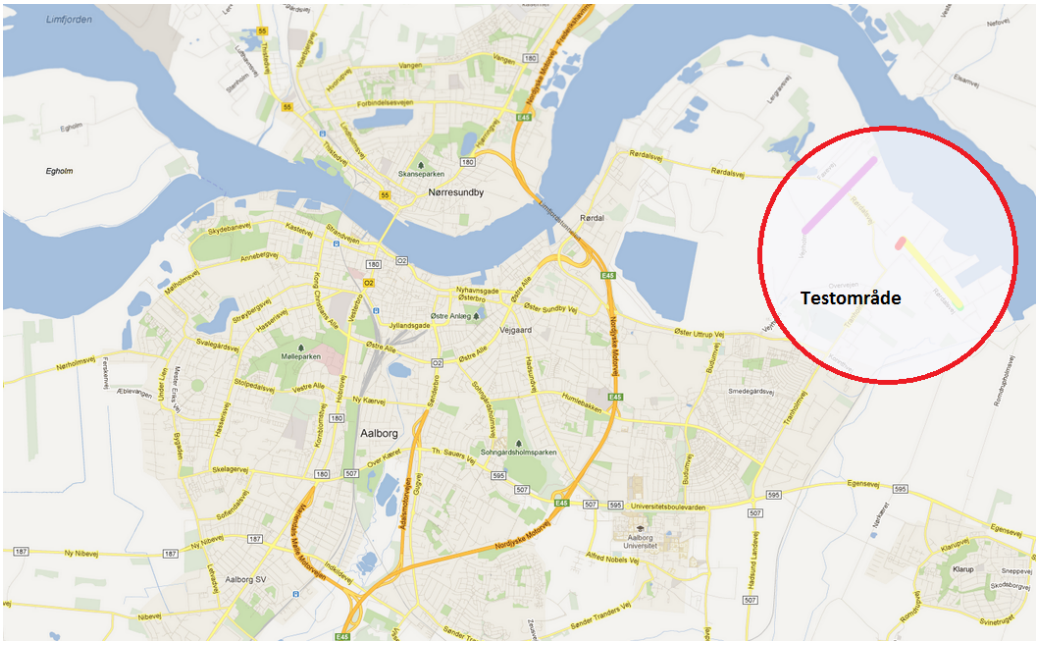
Formålet med testene på lige vej er, at teste WE'erne med den mindst mulige påvirkning fra kørselsmønstret, for derved at give grundlag for udtalelse om sammenhængen mellem fejludvikling og kørt afstand. Derfor sammenlignes koordinater på baggrund af WE-observationer med samtlige GNSS-koordinater. Desuden vil testen fungere som kontrol af kalibrering af hjulomkredsen.

7.2 Praktisk udførelse

I afsnittet vil de omstændigheder som gjorde sig gældende for den enkelte test blive beskrevet. Der vil blive beskrevet hvilket underlag der blev kørt på samt om der var noget der blev gjort anderledes end forventet. På figur 7.1 ses hvor testene blev udført.

Under dataindsamling er det konstateret at der indtræffer udlæsningsfejl fra WE'erne ved hastigheder over 50 km/t. Derfor vælges det at begrænse hastigheden til 50 km/t. Projektgruppen har en formodning om, at udlæsningsfejlen sker som følge af datamængden, der skal sendes og modtages. Formodningen underbygges af DIP-switchenes funktion, da de giver mulighed for nedsætte udlæsningshastigheden, hvorved der vil kunne køres med en højere hastighed.

Til hver test med kørsel i cirkel opstilles en tabel til dokumentation for WE'ernes registrerede afstande ved cirklernes start og stop samt cirklens omkreds. Værdierne til dokumentation for cirklernes start og stop er fundet ved at undersøge resultatfilerne fra WE'erne, hvori retningsangivelser og kørt afstand er beregnet. Den sidste afstand inden retningen begynder at ændre sig væsentlig angiver start for cirklen. På samme



Figur 7.1 – Placering af testområdet øst for Aalborg.
©Google.

måde angiver sidste afstand inden retningen stabiliserer sig, efter cirklen, stop for cirklen. Omkredsen er beregnet som forskellen mellem afstandene ved start og stop.

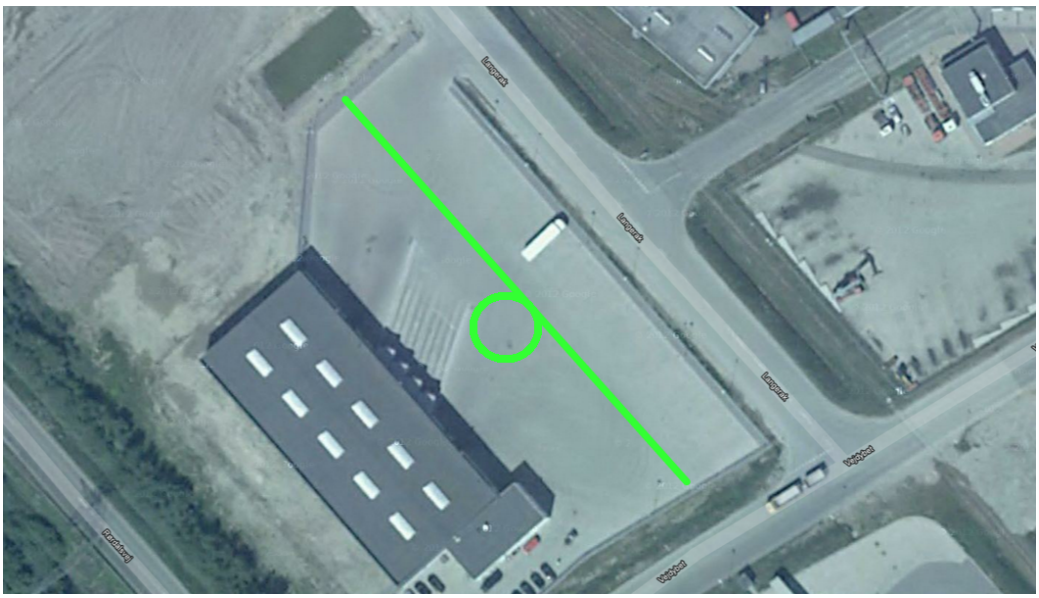
7.2.1 Cirkler på vej med fast belægning

Parkeringspladsen, som blev anvendt under kalibreringen, var egnet og blev anvendt igen, se figur 7.2. Alle testene forløb planmæssigt og tilfredsstillende. Cirklernes start, stop og omkreds er vist i tabel 7.1 og 7.2.

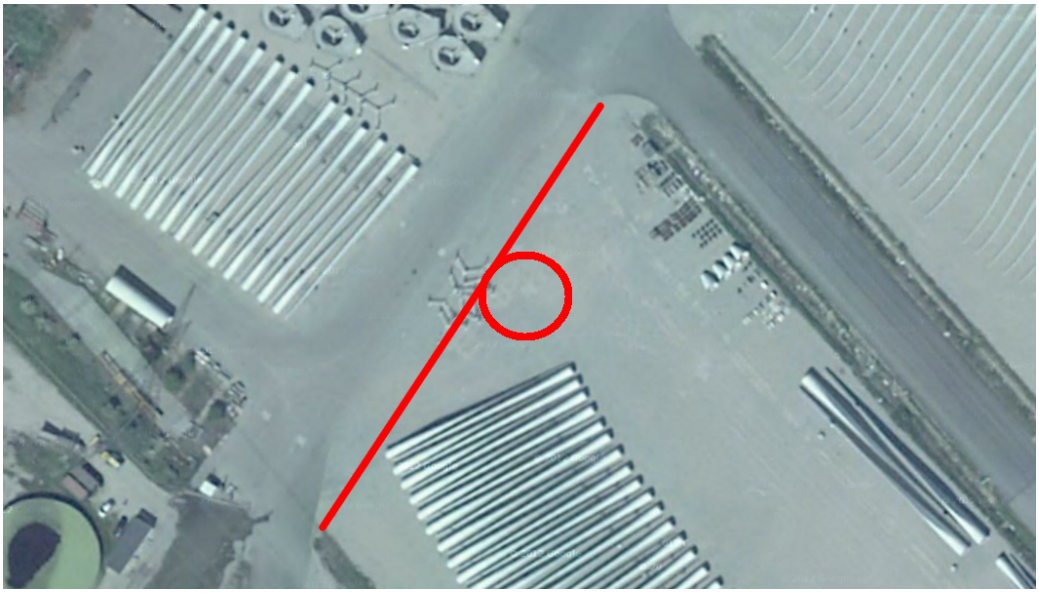
7.2.2 Cirkler på vej med grusbelægning

Et større areal belagt med grus er blevet anvendt under denne test, se figur 7.3 og 7.4. Testene blev udført uden problemer og med tilfredsstillende dataopsamling. Cirklernes start, stop og omkreds er vist i tabel 7.1 og 7.2.

Det ses af tabel 7.1 og 7.2 at der forekommer variation i cirklernes omkreds. Variation er forventelig da overgangen fra lige kørsel til cirkelkørsel varierer på grund af hastigheden hvormed rattet drejes til den forudbestemt drejeradius og da metoden til bestemmelse af omkreds er approksimativ. Det vurderes at variationen i omkreds ikke har betydning for sammenligneligheden og validiteten af resultaterne.



Figur 7.2 – Området anvendt til kørsel i cirkler på fast belægning.
©Google.



Figur 7.3 – Området anvendt til kørsel i cirkler på grusbelægning.
©Google.

Test	Start kørt afstand WE (m)	Stop kørt afstand WE (m)	Omkreds (m)
Fast lille 01	26.98	59.09	32.11
Fast lille 02	24.11	57.45	33.34
Fast lille 03	26.59	62.73	36.14
Grus lille 01	21.01	53.24	32.23
Grus lille 02	26.94	59.55	32.61
Grus lille 03	27.09	62.38	35.29

Tabel 7.1 – Start, stop og omkreds for lille cirkel.

Test	Start kørt afstand WE (m)	Stop kørt afstand WE (m)	Omkreds (m)
Fast stor 01	31.31	128.08	96.77
Fast stor 02	32.28	127.87	95.59
Fast stor 03	31.32	120.30	88.98
Grus stor 01	28.66	117.72	89.06
Grus stor 02	30.38	121.87	91.49
Grus stor 03	30.85	124.36	93.51

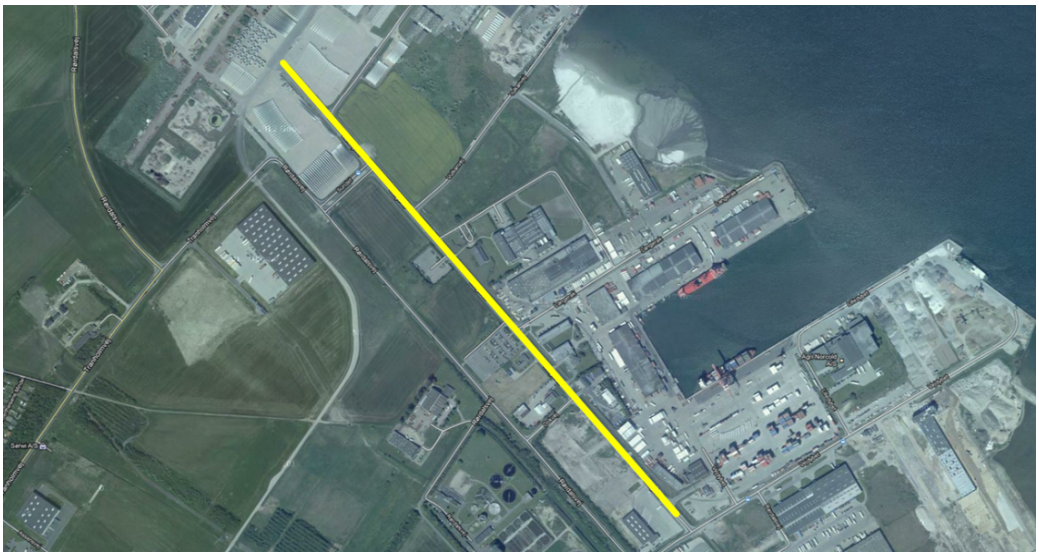
Tabel 7.2 – Start, stop og omkreds for stor cirkel.




Figur 7.4 – Området er anvendt til kørsel i cirkler på grusbelægning. Arealet anvendes af Siemens til opbevaring af vindmøllevinger.

7.2.3 Kørsel på lige vej med jævn overflade

Mellem de steder, hvor test med kørsel i cirkler blev udført, fandtes et stykke vej, som passede til testen på lige vej med jævn overflade, se figur 7.5. Det var her muligt at køre en jævn, lige strækning på ca. 1.2 km, som blev gentaget tre gange.



Figur 7.5 – Kørsel på lige vej med jævn overflade.
©Google.

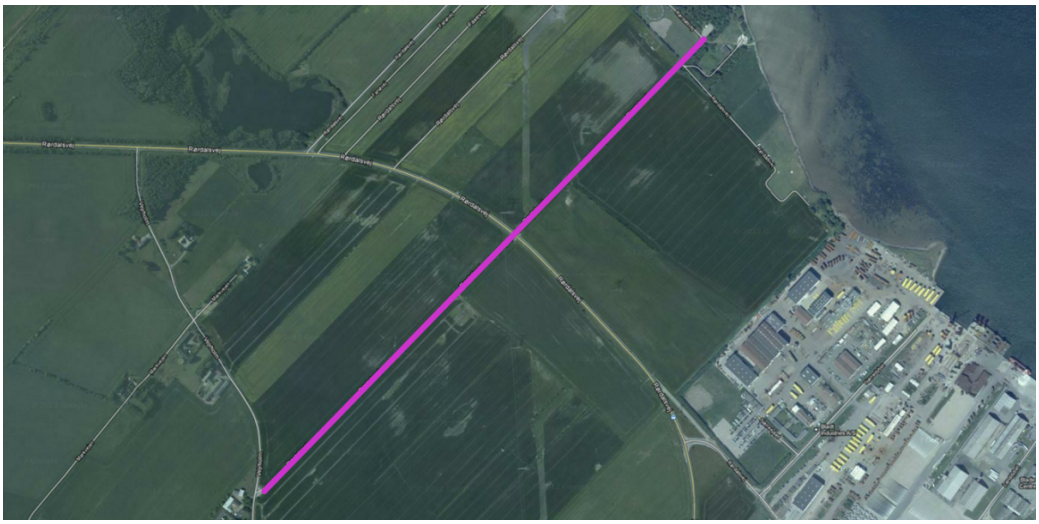
Vejen var belagt med jævn asfalt, se figur 7.6. De tre test forløb planmæssigt og tilfredsstillende.



Figur 7.6 – Vej der anvendes til test på lige vej med jævn overflade.

7.2.4 Kørsel på lige vej med ujævn overflade

En vejstrækning belagt med betonelementer blev anvendt til test af kørsel på ujævn vej, se figur 7.7. Mellem og i betonelementerne var der revner på hele strækningen, hvorfor vejen opfylder kriteriet om at være ujævn, se figur 7.8 og 7.9. Der blev kørt en strækning på ca. 1.4 km.



Figur 7.7 – Kørsel på lige vej med ujævn overflade.
©Google.



Figur 7.8 – Revner i betonelementerne der køres på.



Figur 7.9 – Revne på tværs af betonelementerne.

7.3 Præsentation af resultater

Afsnittet præsenterer resultaterne fra de enkelte test udført med smallPOS II. Resultaterne vil blive præsenteret i form af koordinat- og retningsafvigelser.

7.3.1 Cirkler på vej med fast belægning

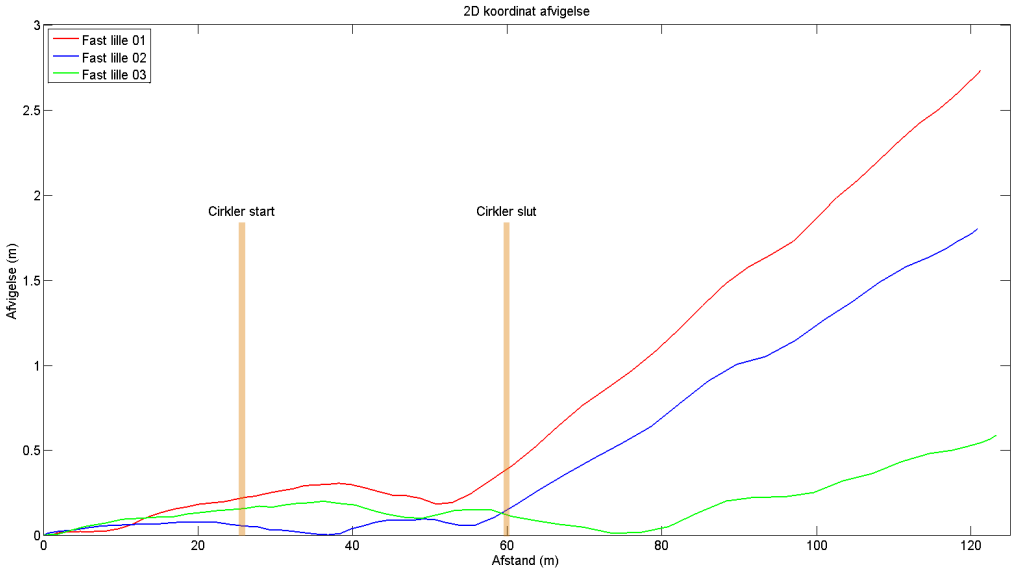
I afsnittet præsenteres først resultaterne fra kørsel i lille cirkel og herefter fra kørsel i stor cirkel på fast belægning.

Lille cirkel

Af figur 7.10 ses det, at koordinatafvigelsen[1] stiger jævnt indtil der er kørt ca. halvvejs rundt i cirkel, hvorefter den falder indtil cirklen afsluttes. Herefter udvikler afvigelsen sig lineært i overensstemmelse med det som kunne forventes på baggrund af fejlteorien om hjulafstand i afsnit 5.3.2. En fejl på hjulafstanden betyder at der enten køres lidt kortere eller længere rundt i cirklen, hvorefter fejlen på retningen betyder at den beregnede rute fra WE'erne vil have en anden retning end GNSS-ruten. Grunden til at koordinatafvigelsen i første halvdel af kørsel i cirklen stiger for derefter at falde kan forklares ved hjælp af figur 5.9 på side 29. De to cirkler vil have samme startpunkt, men da radius er forskellig vil koordinatafvigelsen stige indtil halvvejs i cirklen, hvorefter den vil falde igen.

Af figur 7.11 ses det at cirklen fra WE-ruten er større, hvilket antyder, at hjulafstanden er angivet for stor, men at andre fejlkilder har haft indflydelse på afvigelserne kan ikke udelukkes. Det samme gør sig gældende for *Fast lille 02* og *03*, hvorfor kalibreringen af hjulafstanden med fordel kunne forbedres. Cirklen fra WE afsluttes således lidt for tidligt i forhold til GNSS hvilket ses som skiftet fra fald til stigning i koordinatafvigelsen

[1] Koordinatafvigelse er differencen mellem positionerne fra RTK-referencegrundlaget og WE'erne.



Figur 7.10 – 2D koordinatafvigelse for lille cirkel på fast belægning.

Koordinatafvigelse efter 120 m	
Fast lille 01	2.61 m
Fast lille 02	1.77 m
Fast lille 03	0.53 m

Tabel 7.3 – Koordinatafvigelse efter 120 m for *Fast lille 01, 02* og *03*.

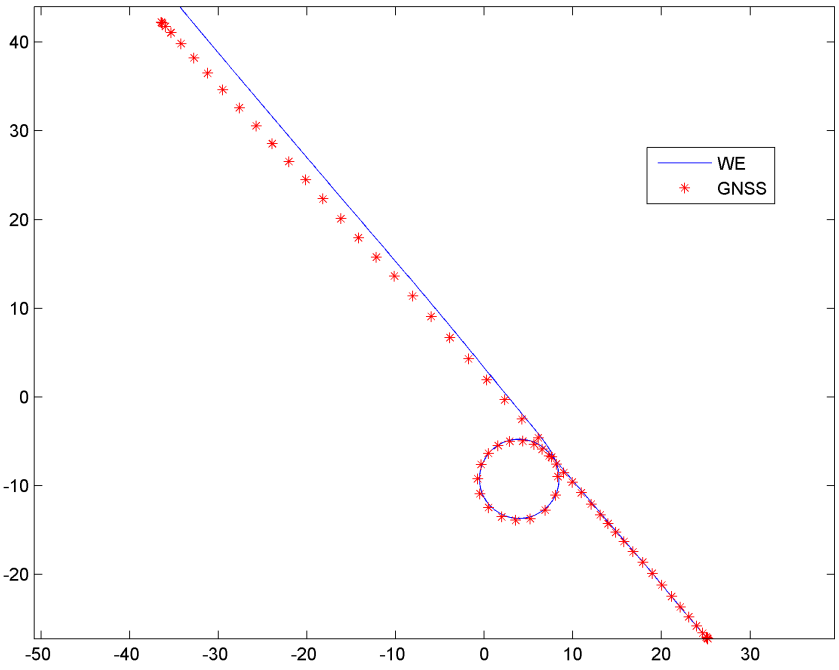
før cirkel slut. Var hjulafstanden angivet for lille ville cirklen blive afsluttet senere af WE'er og ruten vil afvige på modsatte side af GNSS-ruten.

Alle tests har en afvigelse under 0.5 m indtil cirklen er afsluttet. Herefter udvikler fejlene sig lineært så længe der køres ligeud. Efter 120 m har *Fast lille 03* den mindste afvigelse, se tabel 7.3.

Ved slutning af cirklen ses det at den største retningsafvigelse også giver den største koordinatafvigelse. Retningsafvigelserne ved afslutning af cirkel ses af tabel 7.4 og af figur 7.12[2]. *Fast lille 01* har den største retningsafvigelse og den største koordinatafvigelse.

Alle tre test viser et nogenlunde ens mønster i retningsafvigelsen. Inden cirklen sluttes

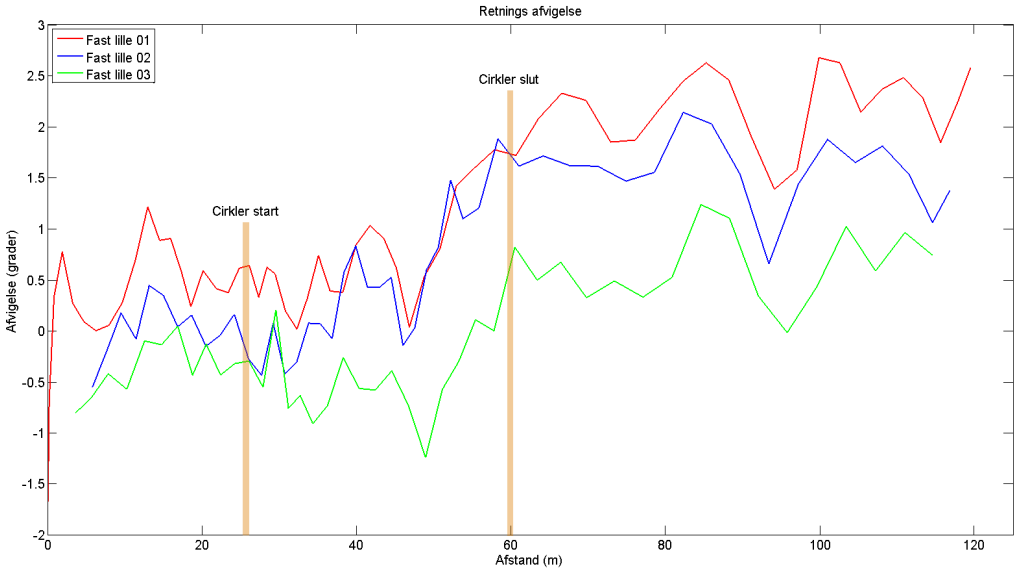
[2]De første og sidste fem epoker udelades i plot af retningsafvigelser, da GNSS-retningsberegningen, når køretøjet er stillestående, er behæftet med fejl på grund af GNSS-spredningen. GNSS-spredningen forårsager at positionerne "springer" frem og tilbage, hvilket kan medfører retningsafvigelser på op til 180°, mens køretøjet faktisk har været stillestående.



Figur 7.11 – Her ses forskellen mellem GNSS-ruten og WE-rute for *Fast lille 01*.

Retningsafvigelse ved cirkel afslutning	
Fast lille 01	1.75°
Fast lille 02	1.60°
Fast lille 03	0.56°

Tabel 7.4 – Retningsafvigelse ved afslutning af cirkel for *Fast lille 01, 02* og 03.



Figur 7.12 – Retningsafvigelser for lille cirkel på fast belægning.

i de tre tests ses et markant fald i retningsafvigelsen, hvorefter den stiger med 1.5°. Herefter komme endnu et tydeligt knæk efter ca. 85 m, hvor afvigelsen falder med 1° og efterfølgende stiger igen.

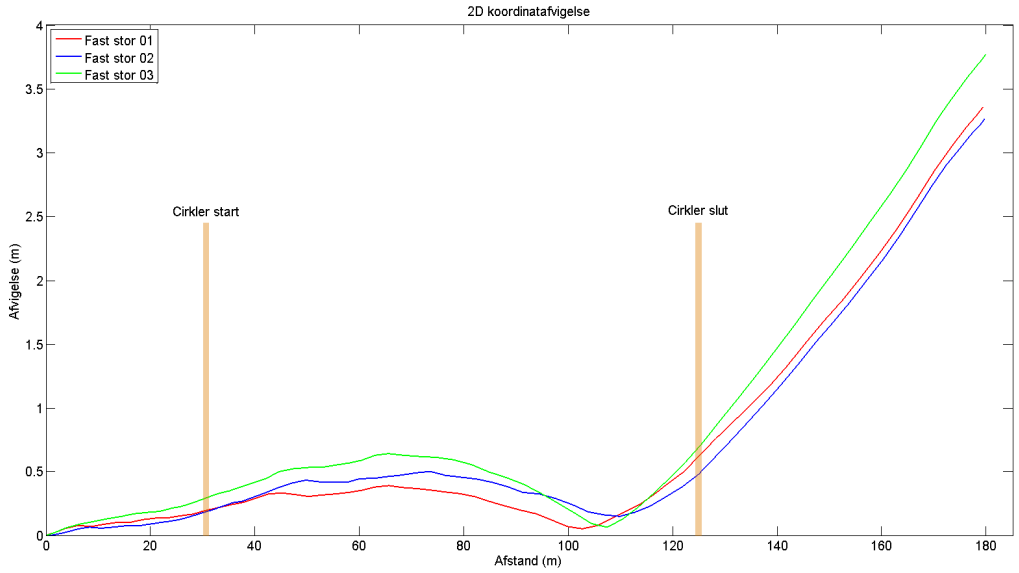
Stor cirkel

Af figur 7.13 ses samme udvikling som beskrevet i foregående afsnit. Igen stiger afvigelsen, når der køres i cirkel indtil midtvejs for at falde mod afslutningen af cirklen. Koordinatafvigelserne efter 179 m ses af tabel 7.5.

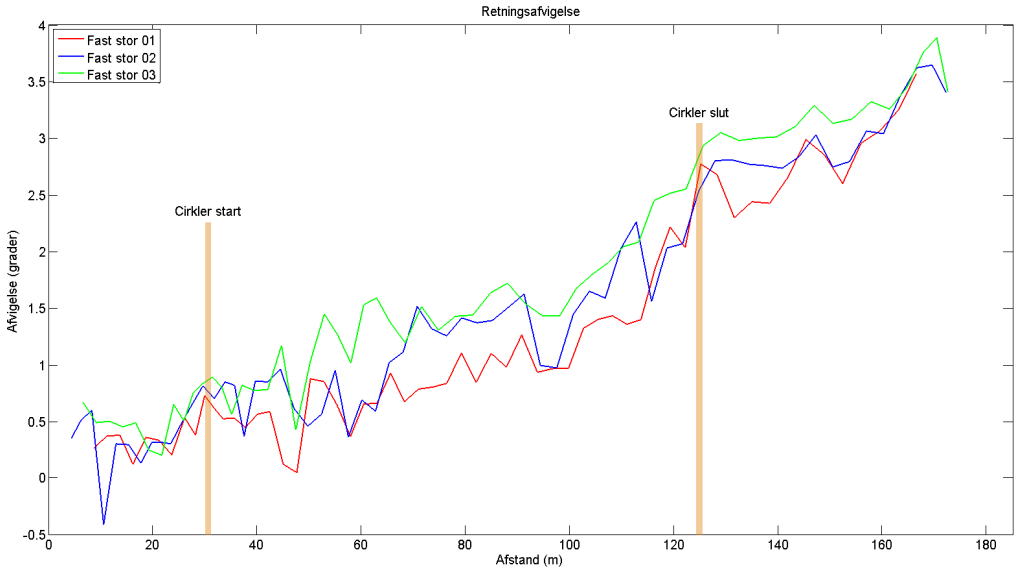
Koordinatafvigelse efter 179 m	
Fast stor 01	3.34 m
Fast stor 02	3.23 m
Fast stor 03	3.73 m

Tabel 7.5 – Koordinatafvigelse efter 179 m for *Fast stor 01, 02* og *03*.

Resultaterne antyder, at der er en fejl på bestemmelsen af hjulafstanden, som fører til at cirklen afsluttes for tidligt, hvilket medfører at slutretningen fra WE-cirklen er forskellig fra GNSS-rutens slutretning. Fejl på koordinatafvigelsen vokser som følge af retningsafvigelsen lineært.



Figur 7.13 – 2D koordinatafvigelse for stor cirkel på fast belægning.



Figur 7.14 – Retningsafvigelser for stor cirkel på fast belægning.

Retningsafvigelse ved cirkel afslutning	
Fast stor 01	2.68°
Fast stor 02	2.80°
Fast stor 03	2.53°

Tabel 7.6 – Retningsafvigelse ved cirkel afslutning for *Fast stor 01, 02* og *03*.

Af figur 7.14 ses det at retningsafvigelserne for de tre tests med store cirkler, ligesom ved de små cirkler, er meget lig hinanden. De følger tilnærmelsesvis det samme mønster og afvigelsen ved afslutning af cirklen ses af tabel 7.6. Igen giver den største retningsafvigelse ved afslutning af cirkel også den største koordinatafvigelse.

Fra cirklerne slutter flader retningsafvigelserne ud indtil der sker et dyk ved ca. 155 m. Herefter stiger retningsafvigelserne uventet indtil afslutning af testene.

7.3.2 Cirkler på vej med grusbelægning

I afsnittet præsenteres først resultaterne fra kørsel i lille cirkel og herefter fra kørsel i stor cirkel på grusbelægning.

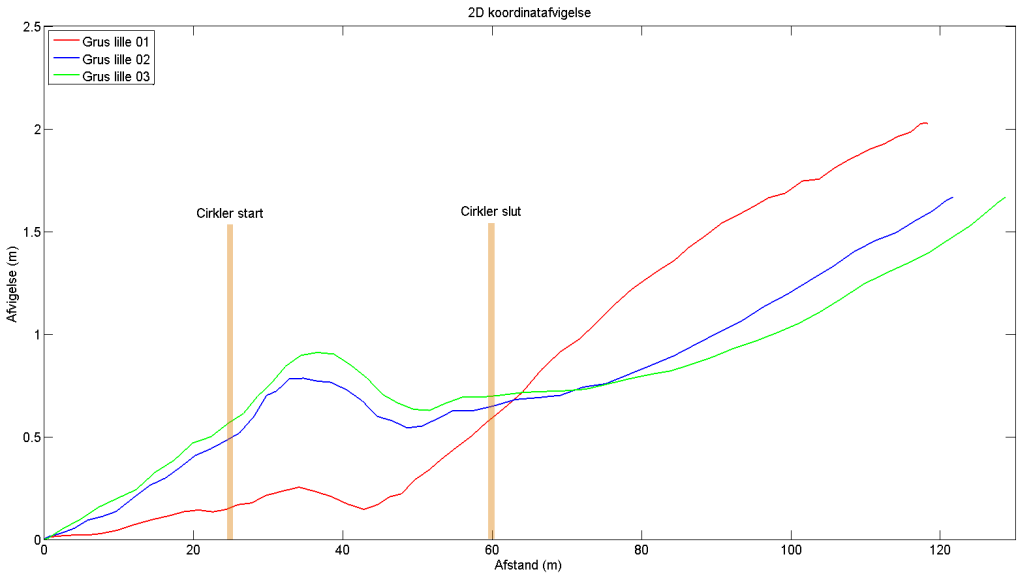
Lille cirkel

Af figur 7.15 ses koordinatafvigelsen for *Grus lille 01* er mindre end både *Grus lille 02* og *03* indtil der er kørt 60 m, herefter stiger afvigelsen for *Grus lille 01* hurtigere de to andre som følge af en større fejl i retningsafvigelsen, som det ses af figur 7.16. Igen stiger koordinatafvigelserne lineært efter cirklen er afsluttet. De tre test har samme karakteristiske pukkel midtvejs i cirklen, hvorefter den falder indtil cirklen er afsluttet. Koordinatafvigelsen efter 118 m kan ses af tabel 7.7. Grus lille 01 har den største koordinatafvigelse på 2.03 m.

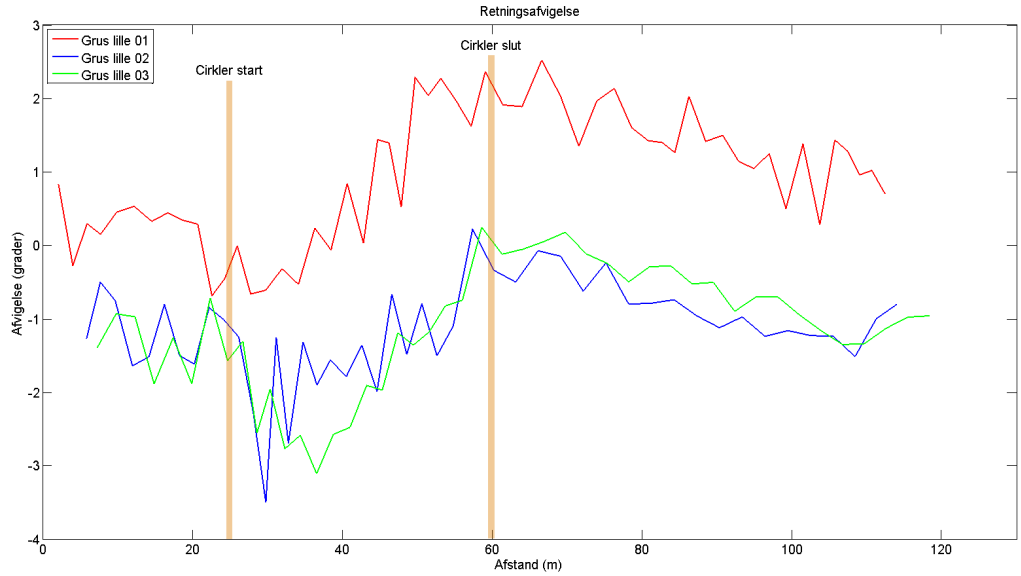
Koordinatafvigelse efter 118 m	
Grus lille 01	2.03 m
Grus lille 02	1.58 m
Grus lille 03	1.39 m

Tabel 7.7 – Koordinatafvigelse efter 118 m for *Grus lille 01, 02* og *03*.

Bestemmelsen af cirklen i *Grus lille 02* og *03* er gået bedre end *Grus lille 01*, hvilket også ses af retningsafvigelserne ved afslutning af cirklen, se tabel 7.8.



Figur 7.15 – 2D koordinatafvigelse for lille cirkel på grusbelægning.



Figur 7.16 – Retningsafvigelser for lille cirkel på grusbelægning.

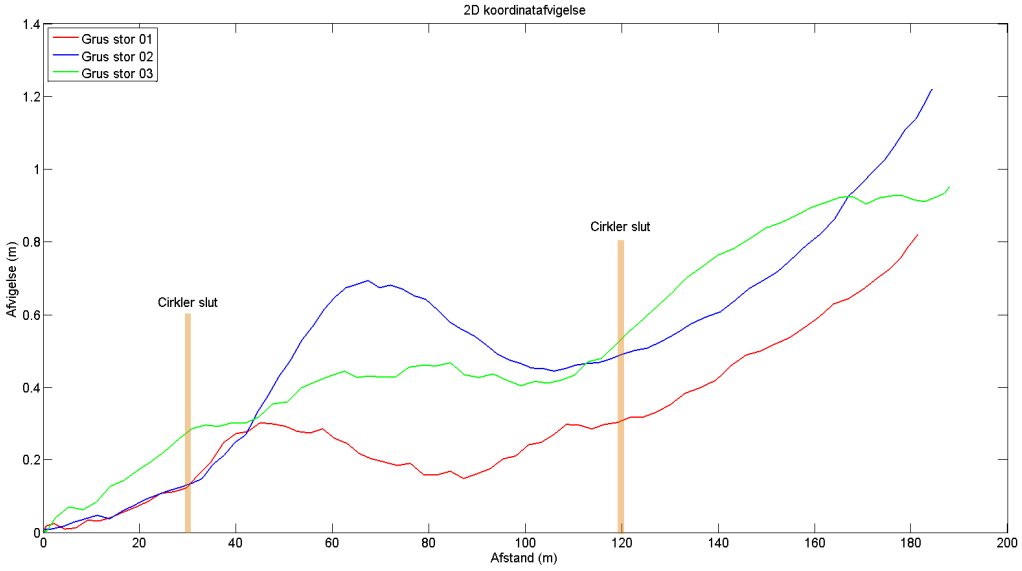
Retningsafvigelse ved cirkel afslutning	
Grus lille 01	2.25°
Grus lille 02	-0.21°
Grus lille 03	-0.10°

Tabel 7.8 – Retningsafvigelse ved afslutning for *Grus lille 01, 02* og *03*.

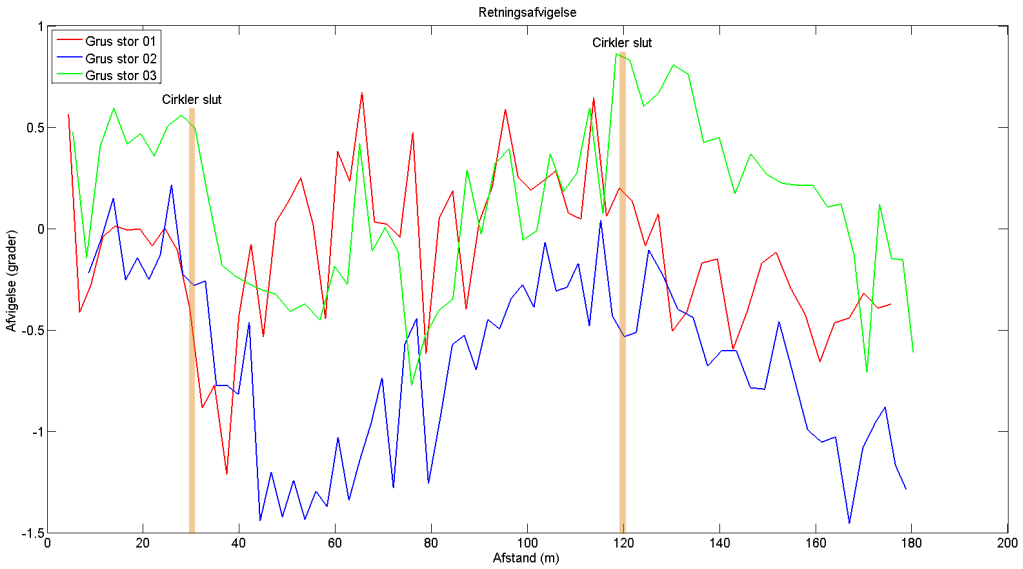
Selvom *Grus lille 01* har den mindste koordinat- og retningsafvigelse de første 50 meter, så betyder retningsafvigelse ved afslutning af cirklen, at *Grus lille 01* ender med den største koordinatafvigelse.

Stor cirkel

Det samme mønster for koordinatafvigelsen, som ses ved lille cirkel, gør sig igen gældende for *Grus stor 01, 02* og *03*, se figur 7.17. Afvigelsen udvikler sig lineært i indtil midtvejs gennem cirklen, hvorefter afvigelsen falder indtil der køres ud af cirklen og afvigelsen igen begynder at stige lineært. Efter ca. 40 m stiger afvigelsen i *Grus stor 02* mere end de to andre. Afvigelsen skyldes at retningsafvigelsen i samme periode er meget større for *Grus stor 02*, se figur 7.18. Mellem 40 og 70 m er retningsafvigelsen større, hvilket giver den større koordinatafvigelse. Koordinatafvigelsen efter 180 m ses af tabel 7.9, hvor *Grus stor 02* har den største koordinatafvigelse.



Figur 7.17 – 2D koordinatafvigelse for stor cirkel på grusbelægning.



Figur 7.18 – Retningsafvigelser for stor cirkel på grusbelægning.

Koordinatafvigelse efter 180 m	
Grus stor 01	0.80 m
Grus stor 02	1.12 m
Grus stor 03	0.92 m

Tabel 7.9 – Koordinatafvigelse efter 180 m for *Grus stor 01*, *02* og *03*.

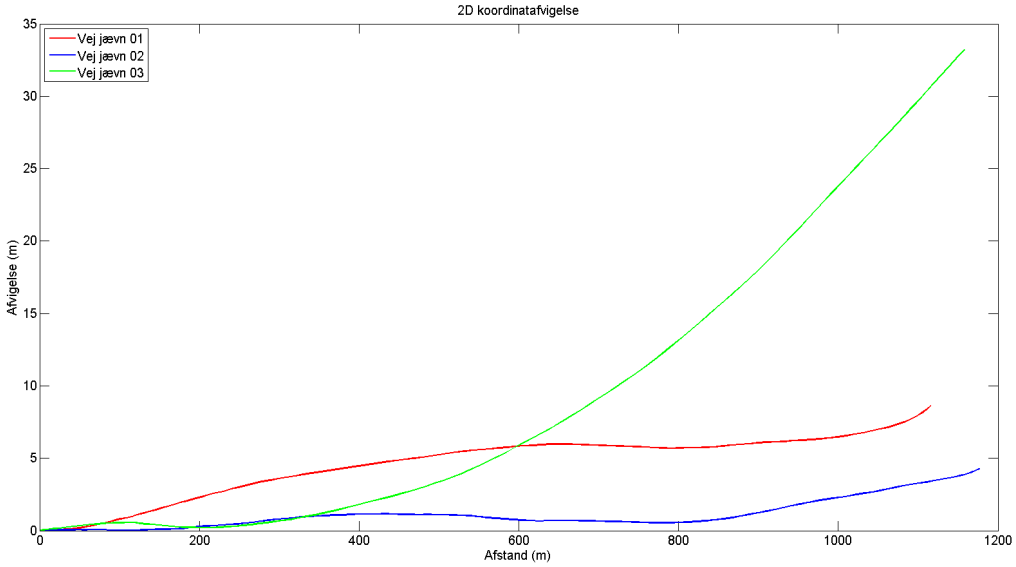
Retningsafvigelsen ved cirklens afslutning ses af tabel 7.10.

Retningsafvigelse ved cirkel afslutning	
Grus stor 01	0.13°
Grus stor 02	-0.52°
Grus stor 03	0.61°

Tabel 7.10 – Retningsafvigelse ved cirkel afslutning for *Grus stor 01*, *02* og *03*.

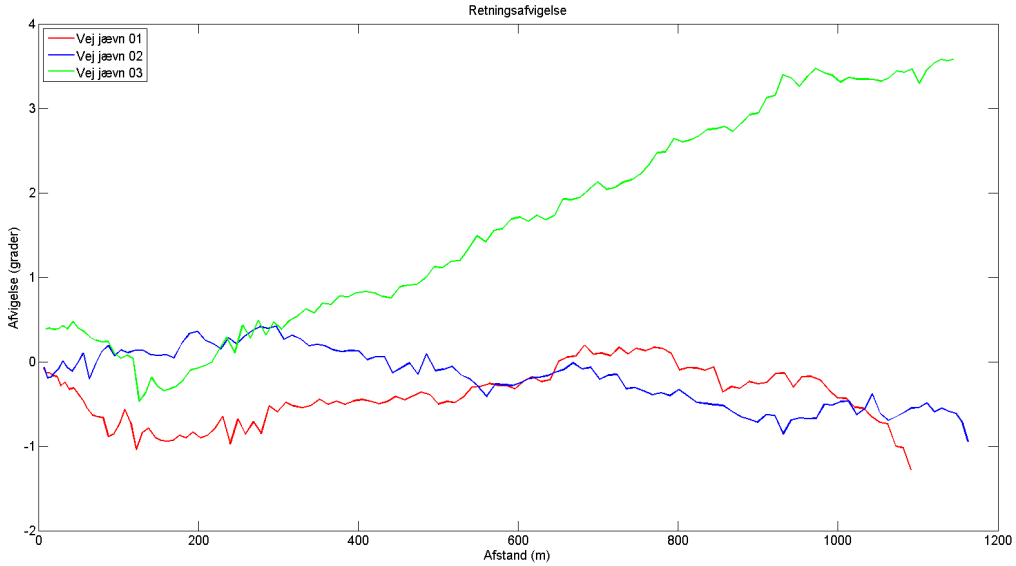
7.3.3 Kørsel på lige vej med jævn overflade

Der er kørt en strækning på ca. 1200 m og af figur 7.19 ses at koordinatafvigelsen i *Vej jævn 03* er klart den største efter 1100 m, se ligeledes tabel 7.11.



Figur 7.19 – 2D koordinatafvigelse for kørsel på lige vej med jævn overflade.

Måden afvigelsen udvikler sig på, antyder at der er en fejl på bestemmelsen af hjulomkredsen, se afsnit 5.3.1. *Vej jævn 01* og *02* er mere stabile, hvilket også ses af retningsafvigelsen på figur 7.20.



Figur 7.20 – Retningsafvigelser for kørsel på lige vej med jævn overflade.

Koordinatafvigelse efter 1100 m	
Vej jævn 01	7.96 m
Vej jævn 02	3.26 m
Vej jævn 03	29.68 m

Tabel 7.11 – Koordinatafvigelse efter 1100 m for kørsel på lige vej med jævn overflade.

Retningsafvigelsen er ligesom koordinatafvigelsen for *Vej jævn 01* og *02* tættere omkring 0, mens den for *Vej jævn 03* efter ca. 200 meter stiger til næsten 4°.

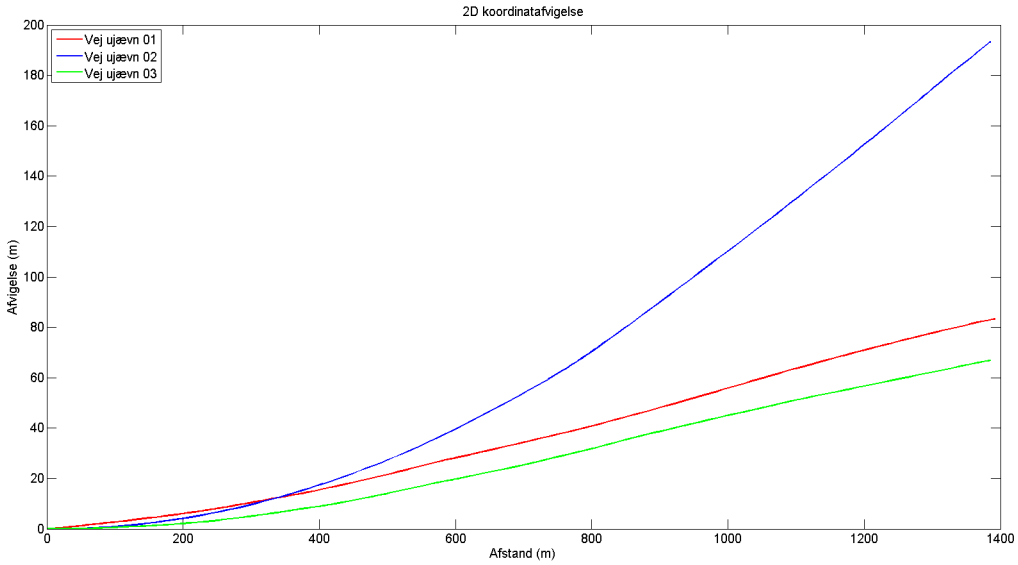
7.3.4 Kørsel på lige vej med ujævn overflade

Koordinatafvigelsen efter 1100 m ses i tabel 7.12 og er yderligere illustreret af figur 7.21.

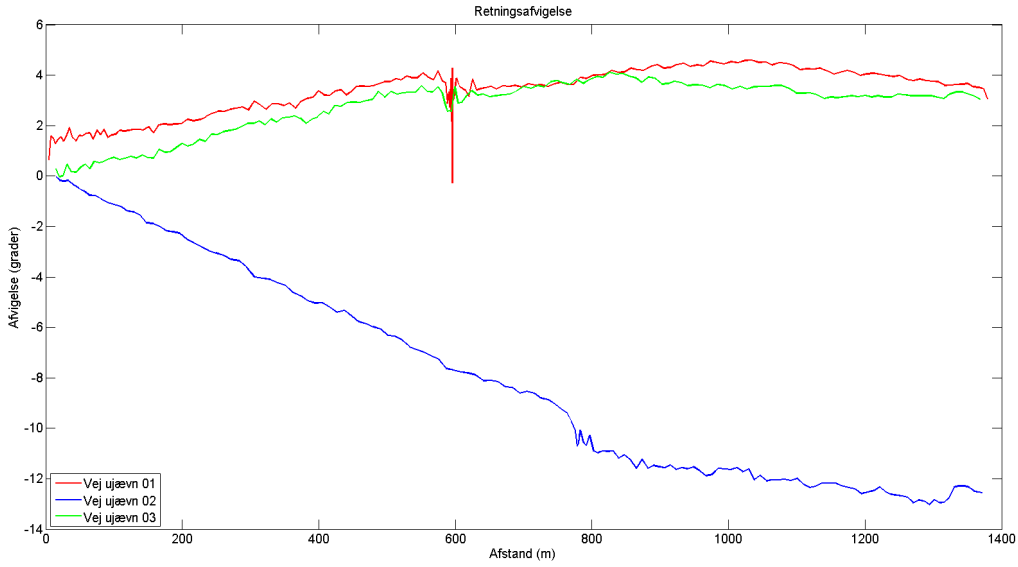
Koordinatafvigelse efter 1100 m	
Vej ujævn 01	63.66 m
Vej ujævn 02	130.99 m
Vej ujævn 03	51.13 m

Tabel 7.12 – Koordinatafvigelse efter 1100 m for kørsel på lige vej med ujævn overflade.

Koordinatafvigelsen for *Vej ujævn 02* hænger tydeligt sammen med retningsafvigelsen som stiger jævnt gennem hele kørslen. Efter ca. 600 m ses et udfald i retningsafvigelsen for *Vej ujævn 01*, hvor retningsafvigelsen springer fra næsten 4° til 0° og herefter tilbage til omkring de 4° for efterfølgende at stabilisere sig her, se figur 7.22. Det ses at *Vej ujævn 02* afviger kraftigt i forhold til de to andre.



Figur 7.21 – 2D koordinatafvigelse for kørsel på lige vej med ujævn overflade.



Figur 7.22 – Retningsafvigelser for kørsel på lige vej med ujævn overflade. *Vej ujævn 02* er kørt i modsatte retning på samme stykke vej som de to andre test.

7.4 Sammenligning og vurdering

Der vil blive foretaget sammenligning af de forskellige slags test uanset belægning, henholdsvis lige vej, små cirkler og store cirkler.

Vurderingerne vil blive foretaget på tendenser og mønstre, hvorfor der ikke vil blive lagt vægt på absolutte talværdier.

Projektgruppen har en formodning om, at hastigheden kan have betydning, især når der køres i cirkel; jo hurtigere der køres rundt i en cirkel, desto større er risikoen for at det sker skridning. En anden antagelse er at jo hurtigere der køres, jo mere kraft vil der pålægges de yderste dæk. Når de yderste dæk påvirkes med en større kraft, er det en mulighed, at kontaktpunktet som definerer hjulafstanden flyttes. Dermed ændres hjulafstanden i kraft af at køretøjets vægt forskydes i svinget. Med en ændret hjulafstand er kalibreringen ikke længere gyldig. Gennemsnitshastigheden for de forskellige test i cirkel og for test på lige vej er blevet beregnet for at undersøge, om der er sammenhæng med afvigelserne, se tabel 7.13.

Test	km/t	Test	km/t	Test	km/t
Fast lille 01	6.01	Fast stor 01	9.45	Vej jævn 01	34.75
Fast lille 02	5.74	Fast stor 02	9.61	Vej jævn 02	36.01
Fast lille 03	7.29	Fast stor 03	10.11	Vej jævn 03	35.25
Grus lille 01	6.87	Grus stor 01	9.48	Vej ujævn 01	27.47
Grus lille 02	7.01	Grus stor 02	8.51	Vej ujævn 02	33.07
Grus lille 03	7.78	Grus stor 03	10.17	Vej ujævn 03	31.90

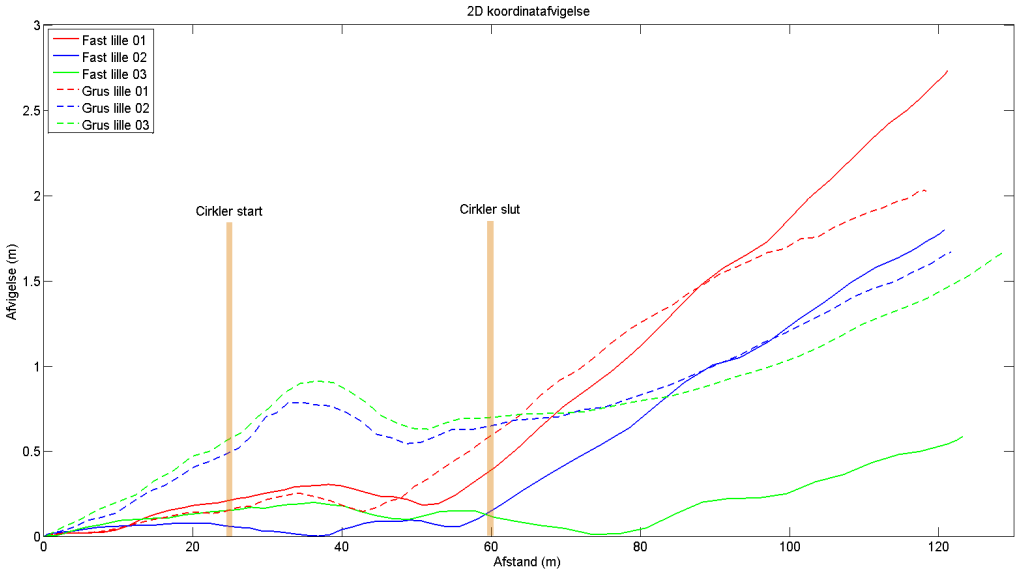
Tabel 7.13 – Middelhastighed test med cirkel samt for test på lige vej.

Lille cirkel

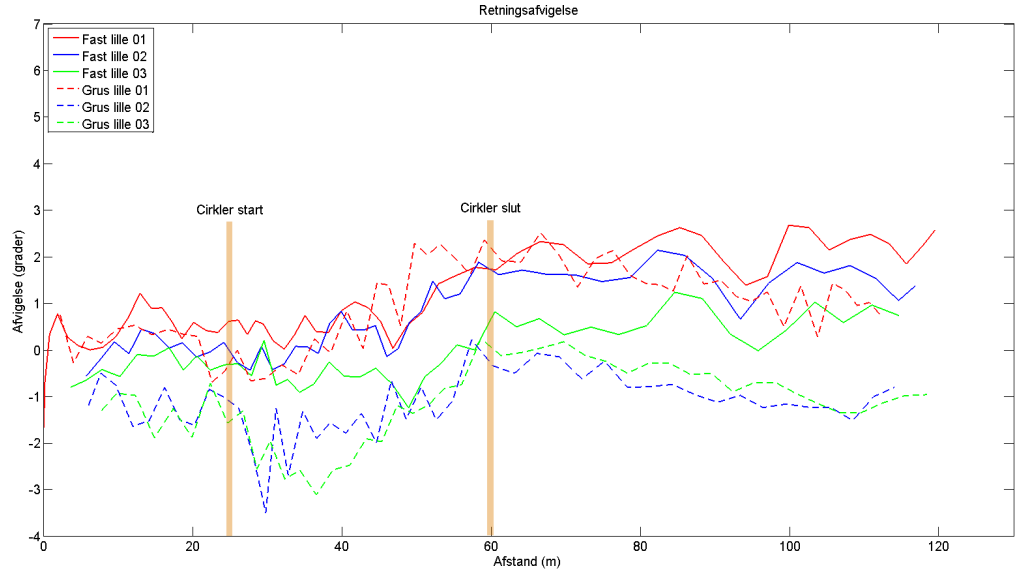
Sammenlignes testene ses det, at når der køres i cirkel på fast belægning fås den bedste positionsnøjagtighed indtil cirklen er afsluttet. se figur 7.23. Efterfølgende udvikler koordinatafvigelsen fra kørsel i cirkel på fast belægning sig hurtigere end ved kørsel på grusbelægning. Det tyder på, at når der køres på grusbelægning bestemmes cirklen og retningen ved cirklens afslutning bedre end når der køres på jævn vej, se figur 7.24.

Ser man samtidig på middelhastighed for testene, tyder det ikke på, at der er sammenhæng mellem hvor hurtigt der er kørt og størrelsen på afvigelserne.

Den manglende sammenhæng mellem middelhastigheden og afvigelsen tyder på at antagelsen om, at hjulafstand ændres desto hurtigere der køres ikke er korrekt.



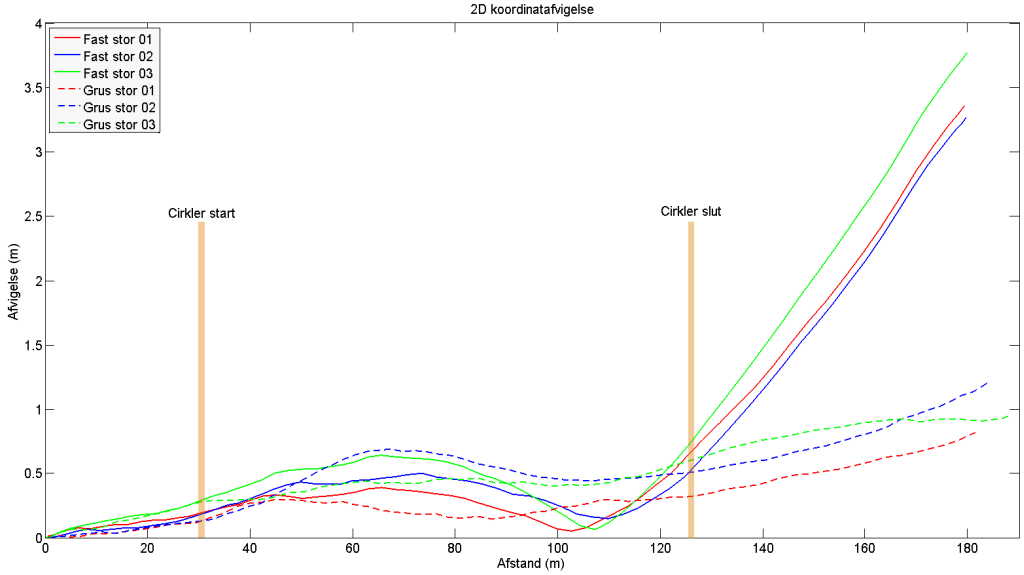
Figur 7.23 – 2D koordinatafvigelse for alle kørsler i lille cirkel.



Figur 7.24 – Retningsafvigelser for alle kørsler i lille cirkel.

Stor cirkel

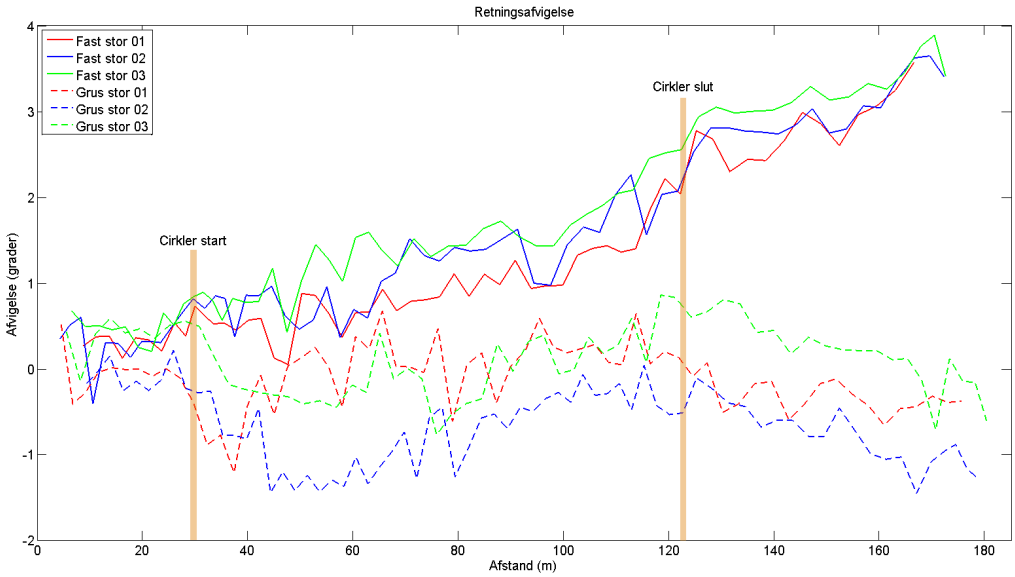
Ved kørsel i stor cirkel ses der ikke samme forskel inden cirklen er afsluttet som det gør sig gældende ved kørsel i lille cirkel. Efter cirklen er afsluttet ses det imidlertid at kørsel på grusbelægning klart giver den mindste afvigelse, se figur 7.25. Bestemmelsen af retningen ved cirklens afslutning er tydelig bedre når der køres på grus end på jævn vej, se figur 7.26. Hvor *Grus stor 01, 02* og *03* har en koordinatafvigelse omkring 1 m har *Fast stor 01, 02* og *03* en koordinatafvigelse omkring 3.5 m. Bestemmelsen af cirklen og udgangsvinkel ved afslutning og dermed hjulafstanden stemmer bedre, når der køres på grusbelægning. Det ses også af retningsafvigelse, hvor det igen er kørsel på grusbelægning, som har den mindste retningsafvigelse.



Figur 7.25 – 2D koordinatafvigelse for alle kørsler i stor cirkel.

Ser man på middelhastigheden for testene, tyder det ligeledes ikke på at større hastighed giver en større afvigelse. Antagelsen om hvordan hastigheden påvirker afvigelserne afvises.

Det tyder på, at kørsel på grusbelægning ikke påvirker positionering med WE'er på samme måde som ved kørsel på vej med fast belægning. Det antages at kunne hænge sammen med måden, hvorpå hjulene har kontakt med belægningen. Når der køres på en fast belægning vil hjulene stå bedre fast og kraftpåvirkningen vil således flytte kontaktpunkterne, som definerer hjulafstanden. Når der køres på grusbelægning vil hjulene ikke stå lige så godt fast og begge hjul påvirkes mere ens af kørsel i cirkel og derfor flyttes kontaktpunktet ikke.



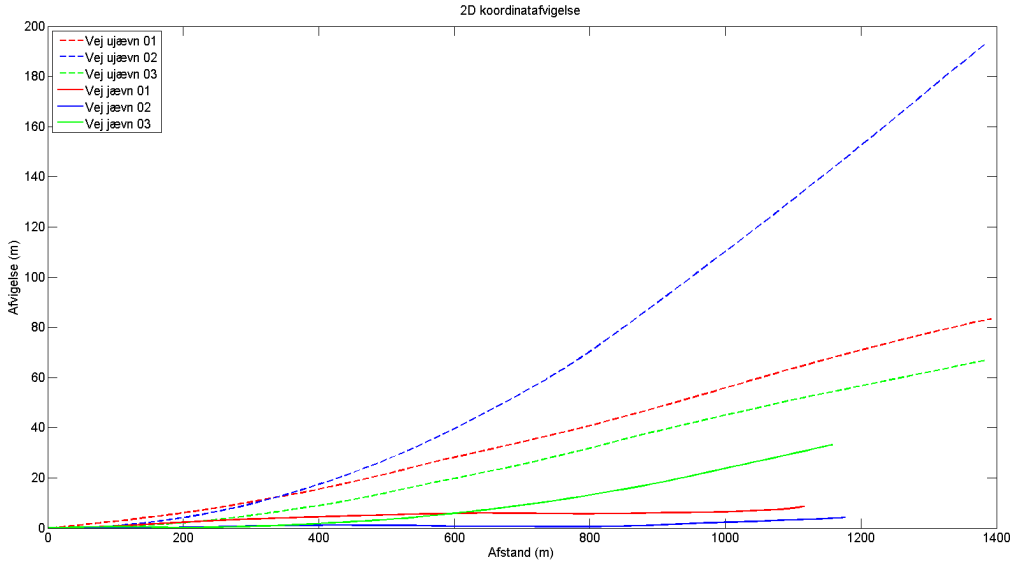
Figur 7.26 – Retningsafvigelser for alle kørsler i stor cirkel.

Lige vej

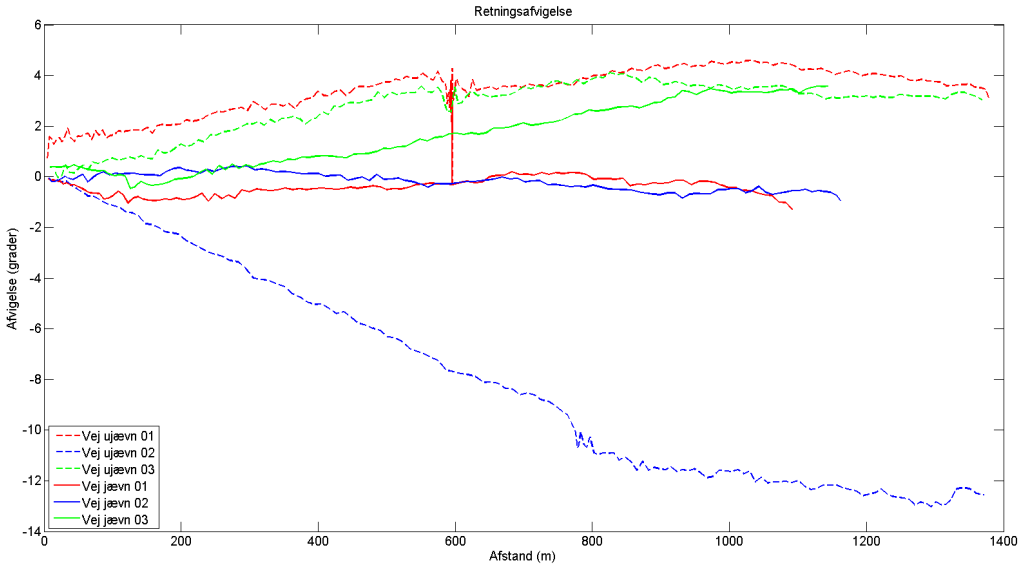
På figur 7.27 ses det at kørsel på vej med jævn overflade giver en mindre koordinatafvigelse end ujævn overflade. *Vej jævn 03* har den største afvigelse ved kørsel på jævn overflade og er bedre end *Vej ujævn 03*, som har den mindste afvigelse på ujævn overflade.

Ser man på retningsafvigelserne, ses at to ud af de tre test på vej med jævn overflade giver en mindre retningsafvigelse end test på vej med ujævn overflade. *Vej jævn 03* afviger væsentligt fra de to andre og svarer til afvigelsen fra *Vej ujævn 01 og 03*, hvilket antages at skyldes en grov fejl i dataopsamlingen. Det ses at *Vej ujævn 02* afviger kraftigt i forhold til de to andre. Afvigelsen formodes at skyldes, at der er kørt i modsatte side af vejen, hvilket har medført at WE'erne har været påvirket anderledes end i de to andre test. Vejen formodes ud fra afvigelserne at være mere ujævn i denne side.

Kørsel på vej med jævn overflade giver det bedste resultat. Kørsel på vej med ujævn overflade giver en større retningsafvigelse og dermed større koordinatafvigelse. På baggrund af resultaterne er det ikke muligt konkludere om det er en specifik fejl, der giver den større afvigelse ved kørsel på vej med ujævn overflade. Det tyder på at de opstillede fejlkilder i afsnit 5.3.5 medvirker til at afvigelsen er større ved kørsel på vej med ujævn overflade.



Figur 7.27 – 2D koordinatafvigelse fra alle test på lige vej med jævn og ujævn overflade.



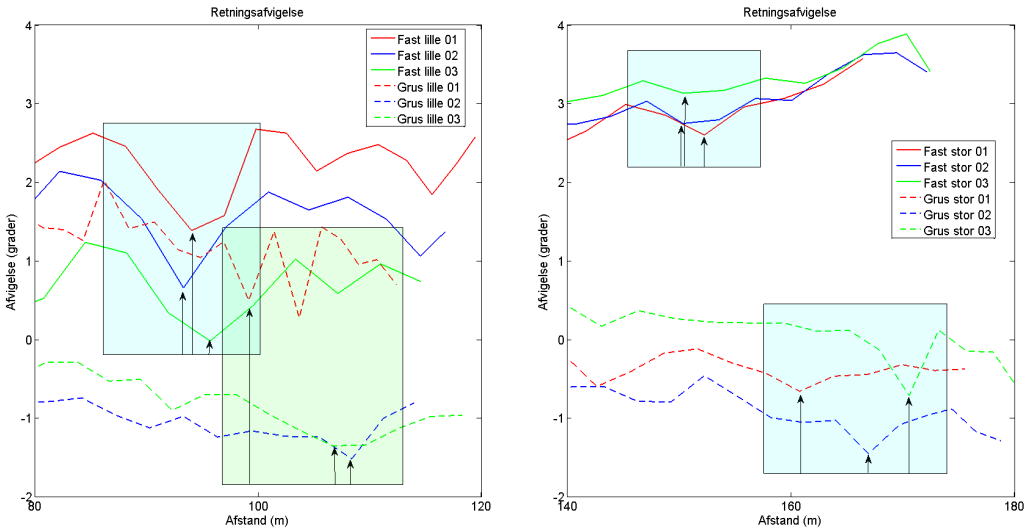
Figur 7.28 – Retningsafvigelser fra alle test på lige vej.

7.5 Afrunding - opstilling af teser for Del II

Når der køres på lige vej med jævn overflade har WE'erne en helt klar styrke, hvor koordinatafvigelsen efter 1100 m i den bedste test var 3.26 m. Samtidig er det nødvendigt at hjulomkredsen er kalibreret.

Ved kørsel i cirkel fremkom en svaghed ved WE'erne, da retningen når cirklen er afsluttet er bestemmende for, hvor stor en afvigelse der efterfølgende vil være. Desto større retningsafvigelse, desto større fejl vil der indfinde sig. Retningsafvigelsen hænger blandt andet sammen kalibreringen af hjulafstanden. Desto bedre kalibrering desto bedre bliver retningen ved afslutning af cirklen. Når der køres i cirkel opnås den mindste koordinatafvigelse når der køres på grus som formodentlig skyldes at hjulene relativ skrider ens og kontaktpunktet for beregning af hjulafstanden flyttes ens på begge hjul.

Ved nedbremsning påvirkes WE'erne og i alle test ses et ens mønster for retningsafvigelserne omkring 20 m før testen afsluttes, se figur 7.29. Det tyder på at nedbremsning er en svaghed for WE'erne.



Figur 7.29 – Illustration af effekt fra nedbremsning.

Ses der på hastighederne og afvigelser i testene, understøtter resultaterne ikke antagelse om sammenhæng mellem disse. Dog kan det ikke udelukkes, at der ved kørsel med højere hastigheder, end hvad der er kørt i testene, kan være sammenhæng mellem hastighed og afvigelse.

Det vurderes, at WE'erne er bedst til positionering, når der køres på lige vej med jævn overflade. På baggrund af ovenstående opstilles tesen, der søges bekræftet i Del II:

WE'erne er bedst til positionering, når der køres på lige vej med jævn overflade.

TOPCON angiver at WE'erne i TOPCON IP-S2 HD bliver anvendt i forbindelse med bestemmelse af retning og tilbagelagt afstand [TOPCON, 2011]. I forhold til den initierende problemstilling, om montering af TOPCON's system på en fladvogn til laserscanning af et tunnelrør, ønskes det derfor undersøgt, hvilken effekt afmontering af WE'erne har.

Ud fra tesen antages det derfor, at der ved at afmontere WE'erne i TOPCON IP-S2 HD kan ses en effekt på positioneringen ved kørsel på lige vej med jævn overflade.

Del II

TOPCON IP-S2 HD

Test 8

Med udgangspunkt i Problemanalysen i Del I og de heri udførte test, er der opstillet en tese for, hvornår WE'er fungerer bedst i forbindelse med positionering. I Del II tages, udover den opstillede tese, udgangspunkt i den initierende problemstilling (afsnit 1.1), der omhandler at COWI ønsker at anvende TOPCON's system på en fladvogn til laserscanning af et tunnelrør.

Det antages at der ved at afmontere WE'erne i TOPCON IP-S2 HD kan ses en effekt på positioneringen ved kørsel på lige vej med jævn overflade. Dette søges eftervist gennem udførelse af praktiske tests med TOPCON's system, hvorfor der i dette kapitel vil blive opstillet kriterier, planlagt udførelse, beskrevet hvordan der vil blive vurderet og foretaget afrapportering af den praktiske udførelse af testene. Afsluttende vil der komme en vurdering af om resultaterne fra testene kan eftervise den opstillede tese.

Ved anvendelsen af TOPCON's system i testene anvendes ligeledes den medfølgende software, Geoclean, til processering/beregning af positioner. Projektgruppen har derfor ikke indflydelse på hvilke beregningsrutiner, der anvendes og hvordan der foretages udjævning/filtrering af positionerne.

8.1 Planlægning af test

Testene udformes på baggrund af ønsket om at simulere GNSS-udfald i forbindelse med at TOPCON's system monteres på en fladvogn og kører gennem en tunnel. Dertil kommer tesen fra Problemanalysen i Del I.

8.1.1 Simulering af udfald

Udgangspunktet for simuleringen er, at køretøjet med MLS monteret kører en strækning med god GNSS-modtagelse og derfor høj nøjagtighed på positioneringen inden denne kører ind i tunnellen og GNSS-bortfalder. Ligeledes antages det at, der efter GNSS-udfaldet forekommer et højt antal epoker med god GNSS-modtagelse, for at sikre optimale forhold for den efterfølgende udjævning af den del af positioneringen, hvor GNSS-udfaldet forekommer.

Da projektgruppen har behov for at anvende egen GNSS-reference under de simulerede MLS GNSS-udfald, og derfor ikke kan køre i en tunnel, foretages simuleringen af udfaldene ved at afskærme MLS GNSS-modtageren med aluminiumsfolie[1].

For sikre optimal betingelser for TOPCON systemets sensorer under simuleringen af udfald indsamles GNSS-observationer fra systemets GNSS-modtager i mindst 100 sekunder både før og efter simuleringen af udfald. Dertil er det nødvendigt at indlede dataopsamling med kørsel i et ottetals mønster, hvilket sammen med de 100 sekunder GNSS-observationer initialiserer TOPCON systemets sensorer bl.a. IMU'en.
Proceduren for simuleringen er derfor som følger:

- MLS systemet startes op.
- Kørsel i ottetals mønster foretages.
- >100 sekunders GNSS-observationer opsamles (køretøjet er stationær).
- Kørsel af test med afskærmet GNSS-antenne.
- >100 sekunders GNSS-observationer opsamles (køretøjet er stationær).

8.1.2 Egen GNSS-reference

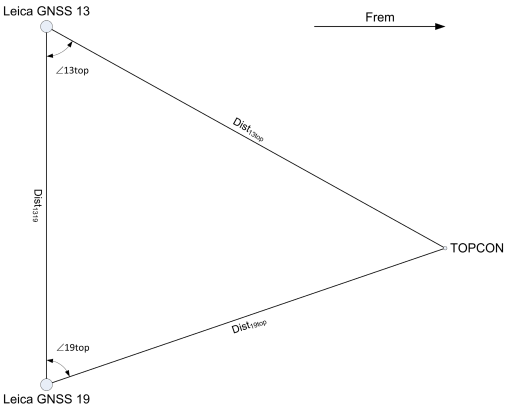
Da det ikke er muligt at placere én Leica RTK antenne præcis i det punkt, der er referencepunkt for TOPCON systemet, anvendes to Leica RTK GNSS-modtagere, for at kunne beregne et referencepunkt (Leica$_{ref}$), der er sammenfaldende med TOPCON systemets referencepunkt. GNSS-modtagerne monteres på en af køretøjets tagbøjler.

Til bestemmelsen af den indbyrdes geometri mellem de to Leica GNSS-modtagere og TOPCON systemets referencepunkt, anvendes midlet af 1285 epokers observationer fra TOPCON systemet, midlet af 320 epoker fra Leica GNSS 13 og midlet af 318 epoker fra Leica GNSS 19[2]. Observationerne fra de tre modtagere er indsamlet i det samme tidsrum og mens modtagerne har været stationære. På baggrund af den beregnede geometri er det muligt at beregne Leica$_{ref}$ "oveni" TOPCON referencepunktet. Figur 8.1 på næste side viser de to Leica RTK antenners placering i forhold til TOPCON referencepunktet samt de vinkler og afstande, som beskriver de indbyrdes forhold.

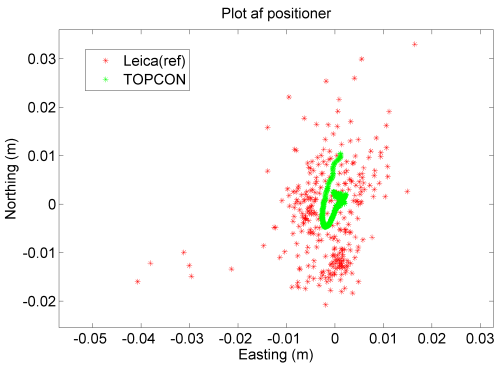
E- og N-koordinaterne fra de tre GNSS-modtagere midles og anvendes til bestemmelsen af vinklerne og afstandene mellem Leica GNSS-modtagerne og TOPCON-punktet, jf. figur 8.2. Resultatet af beregningerne af afstande og vinkler ses af tabel 8.1.

[1] Afdækning med aluminiumsfolie er på forhånd blevet testet på en Leica AX1202 GNSS-antenne, hvor ét lag var tilstrækkelig til at antennen mistede forbindelse til alle satellitter. Under simuleringen er der anvendt flere lag, for at sikre en total afskærmning.

[2] Forskellen i antallet af indsamlede epoker for Leica GNSS'erne skyldes at dataopsamlingen blev startet med 2 sekunders mellemrum.



Figur 8.1 – Bestemmelse af reference punkt ved brug af to Leica GNSS-modtagere.



Figur 8.2 – Illustration af positioner fra Leica$_{ref}$ og TOPCON. I plottet er der foretaget tyngdepunktsreducering af koordinaterne i forhold til samme tyngdepunkt.

	Element	Værdi
Vinkler	13_{top}	60.981°
	19_{top}	71.165°
Afstande	Dist_{13top}	1.5311 m
	Dist_{19top}	1.4146 m
	Dist_{1319}	1.1995 m

Tabel 8.1 – Anvendte værdier til fastlæggelse af GNSS-referencepunkt - forholdet mellem de to Leica GNSS-modtagere.

GNSS-referencepunkterne og TOPCON-punktet har, i forbindelse med beregning af forholdet mellem punkterne, spredningerne, der ses af tabel 8.2. Til beregning af den indbyrdes geometri er MATLAB-scriptet *bestmant.m* anvendt, der er vedlagt på Bilags CD'en.

	Leica GNSS 13	Leica GNSS 19	Leica$_{ref}$	TOPCON
σ_{EN}	0.014 m	0.008 m	0.008	0.002 m

Tabel 8.2 – Spredninger på bestemmelsen af punkterne Leica GNSS 13, Leica GNSS 19 og TOPCON, jf. figur 8.1.

For kunne vurdere kvaliteten af referencegrundlaget i testene, beregnes et udtryk for spredningen på Leica$_{ref}$, som angivet i formel 8.2.

$$\sigma_{Leica_i} = \sqrt{\frac{\sigma_{E_i}^2 + \sigma_{N_i}^2}{2}} \tag{8.1}$$

$$\sigma_{Leica_{ref}} = \sqrt{\frac{\sigma_{Leica_{13}}^2 + \sigma_{Leica_{19}}^2}{2}} \tag{8.2}$$

Hvor
i er nummeret på en Leica RTK GNSS-modtager,
σ_{E_i} er den angivne spredning på E-koordinatet og
σ_{N_i} er den angivne spredning på N-koordinatet.

8.1.3 Opstilling af test

Tesen, der opstilles i afsnit 7.5, foreskriver at observationer fra WE'erne er bedst, når der køres på lige vej med jævn overflade. Vejstrækningen skal så vidt muligt være med frit udsyn til himlen, for at give Leica GNSS-modtagerne mulighed for at anvende flest mulige satellitter under testene. En strækning på 1 km vurderes at være passende for testene.

I TOPCON systemet er det muligt at deaktivere opsamling af observationer fra de forskellige sensorer (dog ikke GNSS). Først udføres test, hvor observationer fra WE'er medtages. Efterfølgende udføres tilsvarende test blot med WE'er deaktiveret. Derved er det muligt at undersøge om det kan påvises, at WE'erne i TOPCON's system har en positiv effekt ved kørsel på lige vej med jævn overflade. Når WE'er er deaktiveret afhænger positionering udelukkende af TOPCON systemets IMU.

Til påvisning af WE'ernes betydning i TOPCON systemet udføres derfor følgende test:

- **Positionering med IMU + WE**
  En rute på mindst 1 km køres med WE tilsluttet og gentages tre gange.
- **Positionering med IMU**
  Samme rute køres med WE deaktiveret og gentages tre gange.

8.1.4 Vurderingsgrundlag

Vurderingen af testene foretages på baggrund af det opsamlede referencedata fra Leica RTK GNSS-modtagerne. Referencedata opsamles én gang i sekundet, mens data fra

TOPCON systemet med en væsentligt højere frekvens. Projektgruppen ønsker at foretage sammenligning af koordinater og på grund af forskel i tidskodningen i datasættene er det nødvendigt at interpolere koordinater i TOPCON-data, for at få koordinater med overensstemmelse mellem tidskodningen i datasættene.

Formålet er at finde mønstre og forskelle i tendenserne i de to typer tests, hvorfor vægten ikke lægges på at foretage sammenligning af absolutte koordinatafvigelser.

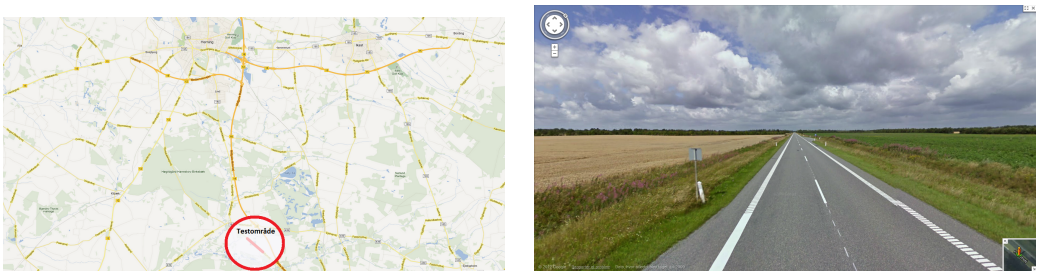
8.2 Praktisk udførelse

De to Leica RTK GNSS-modtagere monteres yderligt på hver side af køretøjets midterste tagbøjle. Denne montering vælges for at have den bedste geometri, når Leica GNSS-referencepunktet skal bestemmes på baggrund af de to modtagere. Monteringen er illustreret af figur 8.3.



Figur 8.3 – Montering af Leica RTK GNSS-antenner på COWI's MLS køretøj.

Testene er foretaget på en landevejsstrækning mellem Brande og Arnborg ved Herning, da det her er muligt at køre ca. 1.6 km på lige vej med jævn overflade. Samtidig har vejen minimal variation i højde, hvilket yderligere er medvirkende til at undgå negativ påvirkning af WE'erne, jf. afsnit 2.2.3. Figur 8.4 viser den kørte rute.



Figur 8.4 – Lige vej med jævn overflade, Holtumvej, mellem Brande og Arnborg.

Testene er foretaget langs landevejen i begge retninger. Dette medfører at testene 1 og 3 er foretaget i den samme side af vejen og nummer 2 i den modsatte. Testene i de to vejsider er ikke foretaget med den samme distance, hvilket vil kunne ses af resultater i afsnit 9.1.

Ved opstart af TOPCON IP-S2 HD skal systemets sensorer kalibreres af to omgange. Først kalibreres systemet mens bilen er stationær og efterfølgende skal der køres i et mønster, der påvirker IMU'en. Dette blev gjort ved at foretage en række korte sving ved kørsel i et 8-tals mønster.

Først blev testene med WE'er tilkoblet gennemført tre gange, hvor der før og efter kørsel blev opsamlet minimum 100 sekunders GNSS-oberservationer med TOPCON's system. Imellem start og stop (hvor der blev opsamlet GNSS-observationer) blev GNSS-modtageren afskærmet med otte lag grill-aluminiumsfolie[3], hvilket afskærmede for forbindelse til alle satellitter, så systemet kun anvendte IMU og WE'erne.

Herefter blev test uden WE'erne gennemført tre gange. Samme procedure med afdækning og opsamling af GNSS-observationer blev udført.

I forbindelse med testene er der observeret periodiske udfald på de den ene af de to Leica RTK GNSS-modtagere, Leica GNSS 13 (se figur 8.1) og udfaldene kan ikke umiddelbart forklares. I og med at udfaldene kun forekommer på den ene Leica RTK GNSS-modtager, lader det ikke til at have været problemer med referencetjenesten (GPS-net.dk). Udfaldene har forårsaget relativt høje spredninger på bestemmelse af referencepunktet, hvilket vil blive yderligere kommenteret i det efterfølgende afsnit.

[3] Denne type aluminiumsfolie er tykkere end almindelig husholdningsfolie.

Resultater 9

Kapitlet har til formål at præsentere resultaterne fra test med TOPCON's system og efterfølgende foretage vurdering heraf.

9.1 Præsentation af resultater

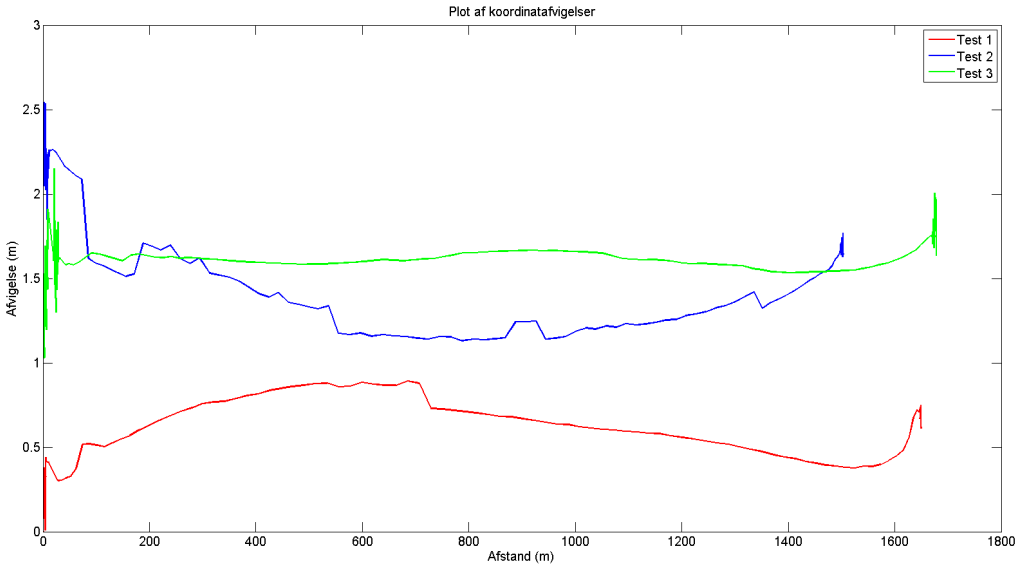
Præsentationen af resultaterne er todelt, hvor der først foretages beskrivelse af de tests, hvor WE'erne er anvendt og efterfølgende beskrives de test, hvor WE'erne er deaktiveret.

Ved *GPS + Inertial Postprocessing* i Geoclean (processeringssoftwaren) af data fra TOPCON's system forekom problemer, da programmet gav en fejlmeddelelse, der beskrev en uoverensstemmelse mellem antallet af observationer fra *roveren* (systemets GNSS-modtager) og antallet af korrektioner modtaget fra *masteren* (korrektioner modtages fra GPSnet.dk). Undersøgelse af *rover*-filen har vist, at der sker et pludseligt spring i tidskodningen. Selv med hjælp fra TOPCON's produktsupporter Réné Dikken er det ikke lykkes projektgruppen at løse dette problem. I processeringen er der derfor i stedet foretaget en såkaldt *Inertial Post Processing*, hvor data fra IMU og WE'erne formodes at blive vægtet højere end GNSS, da der ikke er anvendes korrektionsdata fra GPSnet.dk.

9.1.1 Med IMU og WE

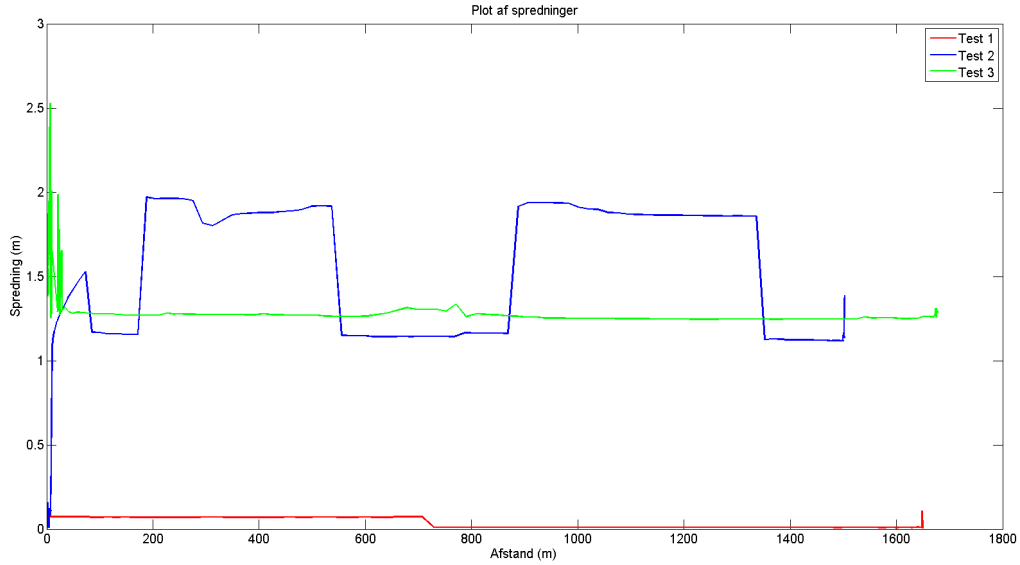
De tre test med IMU og WE'er sammenlignes for at undersøge systematikken i udfaldene. Til sammenligningen anvendes figur 9.1, der viser koordinatafvigelser over den kørte afstand.

Figur 9.1 på næste side viser tydeligt, at *Test 1* skiller sig ud fra *Test 2* og *3* med hensyn til størrelsen af afvigelser. Baggrunden for denne forskel kan ses af figur 9.2, som illustrerer den tidligere nævnte problematik med GNSS-udfald på den ene af Leica RTK GNSS-modtagerne. GNSS-udfaldet på den ene modtager giver udslag i Leica referencepunktet (Leica_{ref}), hvilket er hvad figuren viser. Af figur 9.2 ses det tydeligt, hvordan spredningerne på *Test 2* og *3* er væsentligt højere end *Test 1*, hvilket antages at medføre de tilsvarende højere koordinatafvigelser, der ses af figur 9.1.



Figur 9.1 – Koordinatafvigelser for test med IMU og WE.

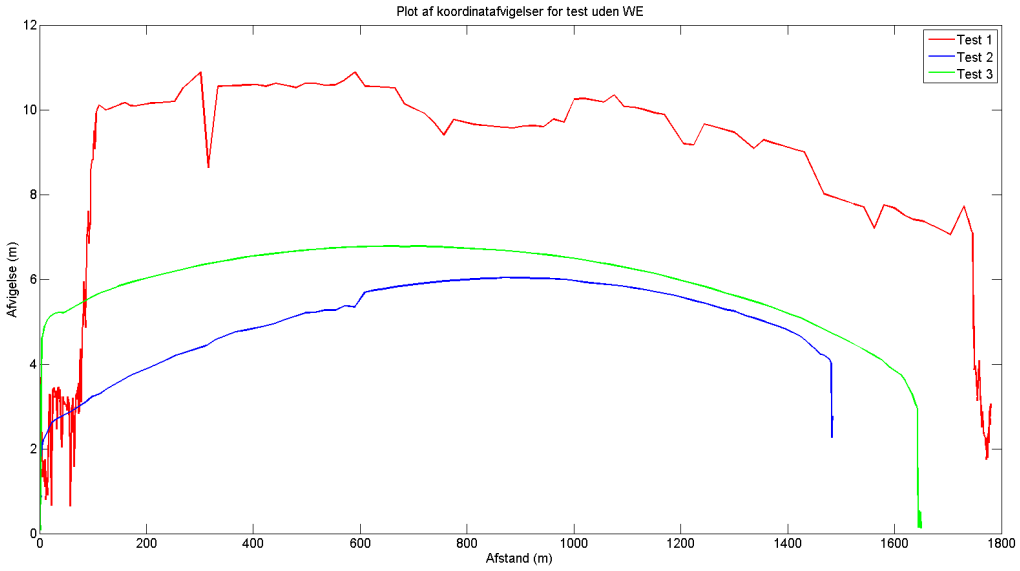
Plottet af koordinatafvigelserne for *Test 1* og *2* antyder tilstedeværelsen af et udjævningsfilter, da afvigelserne stiger/falder mod et midtpunkt, hvorefter de igen stiger/-falder.



Figur 9.2 – Sigma-spredninger for Leica referencepunkt (Leica$_{ref}$) i test med IMU og WE'er.

9.1.2 Med IMU uden WE

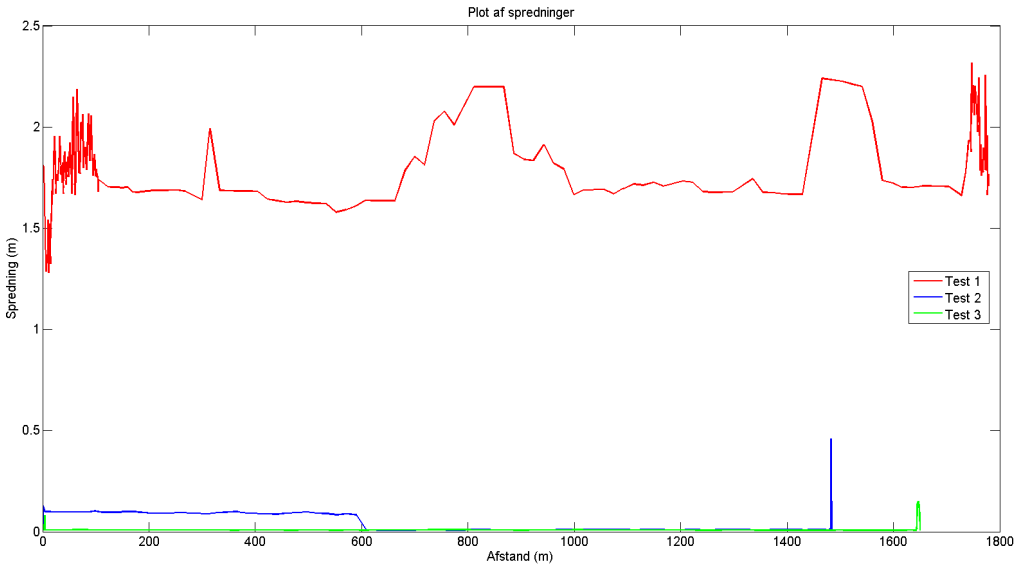
De tre test med IMU uden WE'er sammenlignes ligeledes for at undersøge systematikken i udfaldene. Til sammenligningen anvendes figur 9.3, der viser koordinatafvigelser over den kørte afstand.



Figur 9.3 – Koordinatafvigelser for test uden WE.

Af figur 9.3 ses et tydeligt mønster i *Test 2* og *3*, mens *Test 1* har væsentligt højere afvigelser. Forklaringen på denne forskel findes igen i figur 9.4, hvor det tydeligt ses at spredningen på bestemmelsen af GNSS-referencepunktet har været betydeligt højere i *Test 1* end i de to andre.

Det ses ligeledes af figur 9.3 hvordan koordinatafvigelserne i *Test 2* og *3* stiger i løbet af få kørte meter fra 0 til henholdsvis ca. 2 og 5 m i afvigelse. Dette er umiddelbart forårsaget af at IMU'ens positioner driver i den periode, der går før køretøjet begynder at bevæge sig. Figur 9.3 viser ligeledes hvordan koordinatafvigelserne i *Test 2* og *3* når maksimale værdier ca. midt på den kørte strækning i stedet for at stige jævnt fra start mod slut. Dette antyder ligeledes tilstedeværelsen af et udjævningsfilter i forbindelse med processering i Geoclean.



Figur 9.4 – Sigma-spredninger for Leica RTK GNSS reference i test uden WE'er.

9.2 Vurdering af resultater

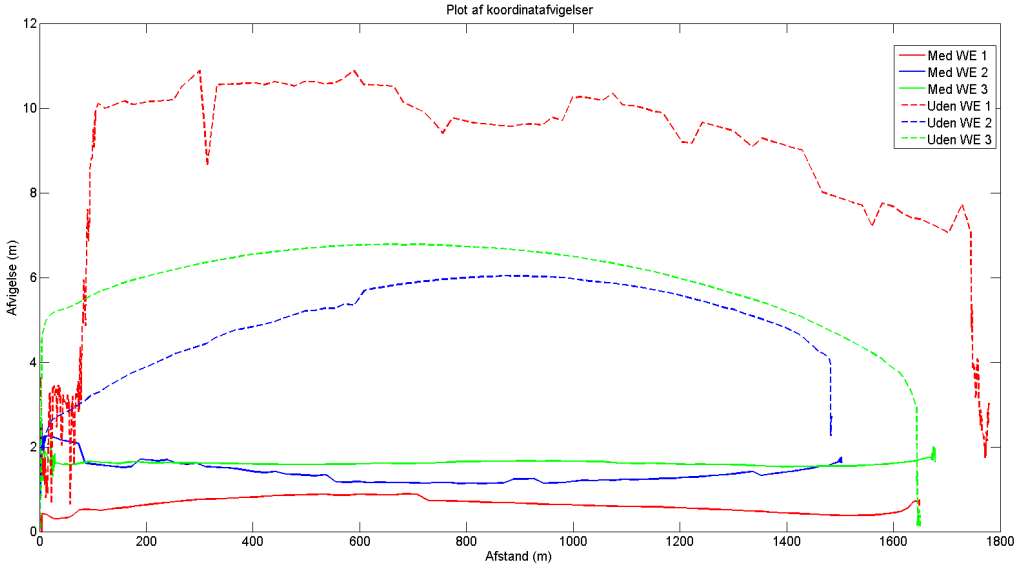
Til vurderingen af resultaterne sammenholdes koordinatafvigelserne fra begge typer test: med og uden WE.

Figur 9.5 på næste side viser en klar tendens til at testene uden WE (illustreret med stiplede linjer på figuren) giver større koordinatafvigelser. Dog skal der tages højde for to ting i forbindelse med vurderingen:

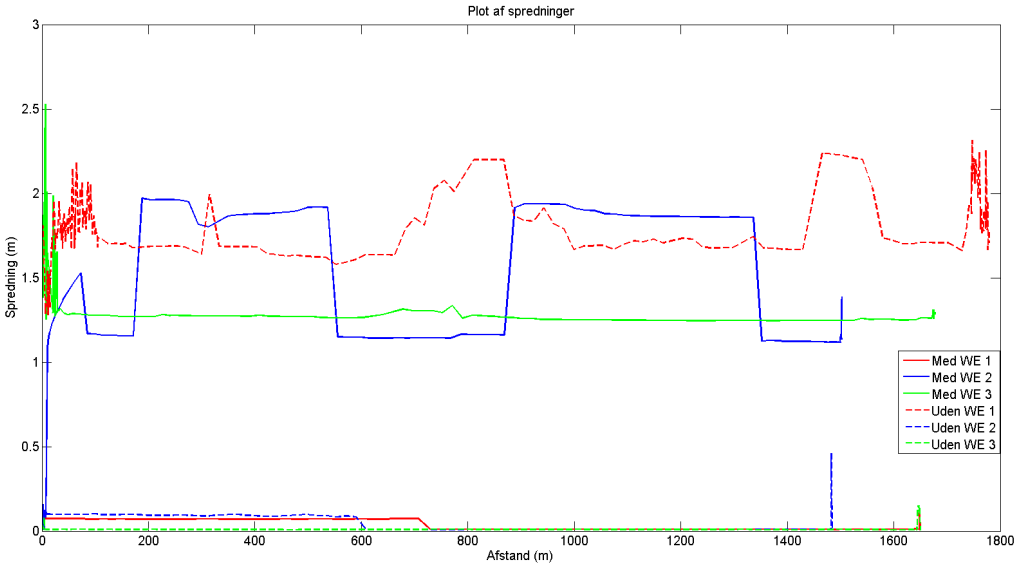
Spredningerne på Leica referencepunkterne
: Figur 9.6 på modstående side viser at spredningerne kun i tre tests ligger på et acceptabelt niveau, hvor spredningerne er betydeligt mindre end afvigelserne: *Test 1* med IMU og WE, og *Test 2* og *3* uden WE.

IMU-driften ved opstart
: Driften er forårsaget af at køretøjet holder stille ved opstart, hvilket ved anvendelse af IMU uden WE medfører en uønsket drift af positionerne, der ses i en høj stigning i koordinatafvigelse fra testenes start.

Test 2 og *3* med IMU uden WE har samme mønster i koordinatafvigelsen, men forskellen fra laveste til højeste afvigelse varierer; i *Test 2* spænder afvigelsen fra ca. 2 m til ca. 6 m, mens spændet i *Test 3* går fra ca. 5 m til ca. 7 m. I *Test 1* med IMU og WE spænder afvigelserne fra ca. 0.5 m til 1 m.



Figur 9.5 – Koordinatafvigelser for test med og uden WE



Figur 9.6 – Sigma-spredninger for test med og uden WE.

På trods af det beskedne sammenligningsgrundlag vurderes testen med IMU uden WE at have større koordinatafvigelserne end hvad der ses ved testene med IMU og WE. Ses der bort fra de høje spredninger på Leica referencepunkterne, ses ligeledes en klar tendens til at afvigelserne er væsentligt højere, når WE'erne ikke anvendes.

På baggrund af de udførte test og resultaterne vurderes det, at tesen om at WE'erne er

bedst til positionering, når der køres på lige vej med jævn overflade kan bekræftes, da der ses en entydig forskel i testene med og uden WE.

Udover at WE'er har effekt på positioneringen under kørsel, ses det i de første meter af testene med IMU uden WE, at WE'erne anvendes til at "fortælle" TOPCON systemet, at det holder stille og derved ignorerer IMU'ens drift.

Konklusion 10

Denne rapport har taget udgangspunkt i en konkret problemstilling opstillet af COWI's Seniorspecialist Kristian Keller vedrørende muligheden for at anvende TOPCON IP-S2 HD til opmåling af tunnelrør. På baggrund af denne problemstilling er interessen for at arbejde koncentreret med WE'er opstået.

I rapportens foranalyse præsenteres hvorledes der foretages positionering af en MLS generelt under forskellige forhold med udgangspunkt i hvilke sensorer, der er tilgængelige. En af disse sensorer er WE'erne, hvilket leder videre til en beskrivelse af det matematiske grundlag for selvstændig positionering med WE'er. Der er tidligere kun i begrænset omfang foretaget undersøgelse og beskrivelse af hvordan WE'er anvendes til positionering af bil-lignende køretøjer.

Det er blevet gjort klart, at anvendelsen af kommercielle MLS systemer, som TOPCON IP-S2 HD, giver brugeren begrænsede muligheder for indflydelse på systemets beregningsalgoritmer, der anvendes til positionering.

Ved anvendelse af WE'er til positionering kan dette udelukkende foretages i 2D, da WE'ernes observationer ikke indeholder informationer om højdeændringer. Derfor vil positionering med WE'er i kuperet terræn, giver fejlbehæftede positioner, hvis ikke der med et andet instrument kompenseres herfor.

Med formålet om at klarlægge hvilke styrker og svagheder, der forbundet med anvendelse af WE'er og ikke instrumentet som sådan, er der foretaget undersøgelse af fejlkilder og derefter udarbejdet kalibreringsmetode. Til eftervisning af styrker og svagheder er der udført tests.

Ved undersøgelse af fejlkilderne viser det sig, at fejl på bestemmelsen af hjulomkreds og -afstand på de hjul, hvor WE'erne er monteret, sammen med skridning synes at have størst betydning. Der er udviklet en kalibreringsmetode til bestemmelse af hjulomkreds og -afstand, men fordi mange parametre såsom dæktryk og skridning vil påvirke disse parametre, vil der altid forekomme fejl på bestemmelsen. Det konkluderes at det er hensigtsmæssigt at foretage løbende kalibrering, når WE'er anvendes til positionering.

Resultaterne af de udførte test i Del I viste tydeligt at styrken i anvendelsen af WE'er ligger i kørsel på lige vej med jævn overflade, hvorimod der opstår større fejl, når der foretages sving og når der køres ligeud på ujævn overflade. Under test af kørsel i cirkler på henholdsvis fast belægning og grusbelægning ses en tendens til, at kørsel på grus-

belægning giver bedre resultater. Projektgruppen er ikke i stand til at give en forklaring på dette, men formoder at der på kørsel i cirkler på fast underlag sker en ændring i hjulafstanden på grund af dækkenes friktion og påvirkningen fra centrifugalkraften. Noget der ikke i samme grad opstår ved kørsel på grusbelægning.

Der opstilles på baggrund af resultaterne af testene en tese om, at WE'erne er bedst til positionering, når der køres på lige vej med jævn overflade.

Den opstillede tesen efterprøves med TOPCON IP-S2 HD og resultaterne viser en klar tendens til at positioneringen forværres, når data fra WE'erne ikke er tilstede. Dertil kommer at WE'erne særligt giver TOPCON's system information om, at køretøjet er stationært eller i bevægelse. Dette ses i forbindelse med testene at positionerne der beregnes driver før kørsel i testen påbegyndes, som et resultatet af IMU'ens drift.

På baggrund af resultaterne fra testene med TOPCON IP-S2 HD konkluderes det, at hvis observationerne fra WE'er udelades, som COWI har til hensigt i forbindelse med opmåling af tunnelrør, vil det få betydning for nøjagtigheden under GNSS-udfald. Den indledningsvise IMU-drift, der forårsager en betydelig fejl, antages ikke at opstå i forbindelse med COWI's problemstilling. Dette skyldes, at systemet i COWI's tilfælde ikke vil være stationært ved dataindsamling under GNSS-udfald, men vil være i bevægelse og derefter miste GNSS-forbindelse.

Generelt er der til understøttelse af rapportens konklusioner foretaget et beskedent antal test og i medfør af dette skal det understreges, at konklusionerne bør vægtes i forhold til antallet af udførte test.

Perspektivering 11

I perspektiveringen vil der blive reflekteret over projektet og det udførte arbejde. I løbet af de ca. fire måneder projektet har varet, er der opstået en række ideer og udfordringer, som har medført at projektet har taget sin endelige form. I projektets afsluttende del er det således muligt at se på projektet med mere objektive øjne og overveje, hvad kunne være gjort anderledes. Desuden reflekteres over hvordan den opnåede viden kan relateres til praktisk anvendelse og hvad der efterfølgende kan arbejdes videre med.

Større datagrundlag
Under testen af WE'erne i Del I kan antallet af kørte test med fordel øges, for at have et bedre statistisk grundlag at analysere på. Ligeledes kan testene udføres med endnu større omhu for at sikre yderligere sammenlignelige data, hvilket blandt andet kunne være at sikre større ensartethed i testene. Et eksempel kunne være at anvende et radiostyret køretøj, som kan programmeres til at køre samme rute hver eneste gang. I forbindelse med dette projekt har det været formålet at vurdere på mønstre og tendenser, hvorfor den anvendte metode dog vurderes at have været tilstrækkelig.

I Del II oplevede projektgruppen problemer med TOPCON's system, da efterprocesseringen blev afbrudt med en fejlmeddelelse. Det viste sig at være en fejl i tidsangivelsen i de GNSS-data, der var blevet opsamlet i de stationære dele af testene. Her ville det have været en fordel, hvis der var blevet foretaget flere test og der dermed var et bedre datagrundlag at vurdere på.

Anvendelse
En mulig anvendelse af WE'er ses i forbindelse med road pricing, hvor der eksempelvis skal betales for antal kørte kilometer på udvalgte veje. WE'erne vil meget nøjagtigt kunne fortælle hvor langt, der er kørt i en betalingszone. WE'erne findes allerede i de fleste biler, som en del disses ABS-systemer, hvor en sensor, der i de fleste tilfælde er mekaniske, registrerer hjulets rotationer. Hvis der er mulighed for udlæsning af data fra ABS-systemet kan det anvendes til at beregne kørt afstand. En anden mulig anvendelse af dette data er i biler med navigationssystem, hvor WE-data kan understøtte generel navigation og særligt under GNSS-udfald.

Mulige positioneringssystemer
Projektgruppen har erfaret, at WE'erne som enkeltstående sensor har en svaghed, når der foretages sving. En mulig udbedring af denne svaghed kunne være implementering af mapmatching, hvor et kort anvendes sammen med en positioneringsenhed til at beregne en mere nøjagtig position. Svagheden for WE'erne viser sig i forbindelse med

afslutning af sving, hvor udgangsretningen kan være fejlagtig. Hvis et bagvedliggende kort stemmer nogenlunde overens med ruten, vil det være muligt at oprette ruten, så den stemmer overens med kortet. I forbindelse med dette kan knyttes problematikken omkring højdeforskelle, som beskrevet nedenfor.

Nye undersøgelser
Projektet har givet mange nye ideer omkring undersøgelse af WE'er. I forlængelse af dette projekt forestiller projektgruppen nedenstående emner vil være interessante at arbejde videre med.

Dynamisk kalibrering
I forbindelse med kalibrering af hjulafstanden fandt projektgruppen ud af, at det var mest hensigtsmæssigt at anvende GNSS frem for totalstation. Ved at anvende GNSS åbnes for muligheden for at lave en dynamisk kalibrering, som kan foretages løbende og ikke er afhængig af opstilling af udstyr osv. Med den dynamisk kalibrering bliver det muligt at korrigere for eventuelle påvirkninger, som kan ændre hjulomkredsen under en kørsel; temperaturstigninger, dækslid, trykforskelle m.m.

Højdeforskelle
Problemstillingen præsenteret i foranalysen, hvor højdeforskelle ikke registreres, giver problemer når WE-observationer oversættes til et 2D-koordinatsystem. Det kunne med fordel undersøges hvor stor en betydning, højdeforskelle har i forskellige situationer. Situationerne som undersøges kan inkludere forskellige højdeforskelle og ruter, der vil gøre det muligt at udtale sig om størrelsen på forskellen mellem ruten registreret af WE'er og ruten registreret i et 2D-koordinatsystem.

Det vil ligeledes være interessant at undersøge, hvordan WE-observationerne kan korrigeres for højdeforskellene. Da WE'er ikke kan registrere højde, skal der inddrages en anden sensor, som kan supplere med højdemålinger eller måling af ændringer i højden. En mulighed vil være at bruge en IMU, som med registrering af hældning langs kørselsretning (pitch), kan supplere med information om hvor meget der relativt køres i op- eller nedadgående retning. Dette vil give den tredje dimension og WE-ruten vil kunne omregnes til et 2D-koordinatsystem. En anden mulighed er at bruge et altimeter som vil kunne supplere med absolutte højdemålinger.

Grusbelægning
Resultaterne fra Del I viste, at afvigelsen er mindre ved at køre i cirkler på grusbelægning end på fast belægning. Dette var modsat hvad projektgruppen havde forventet og vil derfor være meget interessant at arbejde videre med. Den mindre afvigelse skyldes muligvis måden køretøjet står fast på belægningen på og forskydningen af tyngdepunktet som forårsager en ændret hjulafstand. Dette er imidlertid blot en antagelse, som med stor fordel kunne søges klarlagt gennem nye tests.

Kildeliste

Bøger, artikler og rapporter:

[Barbour & Schmidt, 2001] Barbour, N. og Schmidt, G., "Inertial Sensor Technology Trends", *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 4, 2001.

[Borenstein et al., 1996] Borenstein, J., Everett, H. R. and Feng, L., *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, The University of Michigan, Oak Ridge National Lab D&D Program, United States Department of Energy, 1996.

[Borre, K., 1993] Borre, K., *Landmåling*, 2. udgave. Aalborg 1993.

[Chung et al., 2008] Chung, W., Lee, K. og Yoo, K., *Kinematic parameter calibration of a car-like mobile robot to improve odometry accuracy*, School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 137-713, Republic of Korea, 2008.

[Dueholm et al., 2005] Dueholm, K., Laurentzius, M. og Jensen, A. B.O., *GPS*, Nyt Teknisk Forlag, 3. udgave, 1. oplag, København V, 2005.

[Ellum et al., 2002] Ellum, C. og El-Sheimy, N., *Land-based mobile mapping system*, Canada, 2002.

[Glennie & Lichti, 2010] Glennie, C. og Lichti, D. D., "Static Calibration and Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for High Accuracy Mobile Scanning" i *Remote Sensing 2010, vol. 2*, Basel, Schweiz, 2010, s. 1610-1624.

[Jensen, 2005] Jensen, K., *Landmåling i Teori og Praksis*, Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Aalborg Universitet, 2. udgave, 2005.

[Juhl, 2004] Juhl, J., *Undersøgelse af dæktryk og omkreds*, Aalborg Universitet, Aalborg, 2004.

[Nebot et al. 1997] Nebot, E. og Durrant-Whyte, H., *Initial calibration and alignment of Low cost Inertial Navigation Units for land vehicle applications.*, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering University of Sydney, Australien, 2006.

[Szadkowski, 2011] Szadkowski, A., *Mobile Laser Scanning in railway projects - matching and georeferencing approaches, 2011*, TerraTec AS, Lysaker, Norge, 2011.

[Vosselman et al., 2010] Vosselman, G. og Maas, H.-G., *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, Dunbeath, Cainthness, Scotland, Storbritanien, 2010.

[Wang, 1988] Wang, C. M., *Location Estimation and Uncertainty Analysis for Mobile Robots*, Computer Science Department, General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan, USA, 1988.

Andet materiale:

[Heidenhain, 2011] Heidenhain, *Rotary Encoders*, 2011, http://www.heidenhain.de/de_EN/documentation-information/documentation/brochures/popup/media/media/show/view/file-0035/

[Kübler, 2012] Kübler, *Incremental Encoders – Sendix 5006 (Data sheet)*, 2012, http://www.kuebler.com/PDFs/leaflet/drehgeber/english/5006_en.pdf

[TOPCON, 2010] TOPCON, *IP-S2 HD – Mobile Mapping System (Leaflet)*, 2010, http://www.topcon-positioning.eu/UserFiles/files/6.%20Mobile%20Mapping/Leaflet%20-%20IP-S2%20HD%20-%20English-EU-RZ-low-final.pdf

[TOPCON, 2011] TOPCON, *IP-S2 HD – High Density 3D Mobile Mapping System (Brochure)*, 2011, http://www.topconpositioning.com/sites/default/files/literature/IP_S2HD_06-21-2011.pdf

[Vejdirektoratet, 2012] Vejdirektoratet, *Håndbog - Rundkørsler i åbent land*, 2012, København, http://vejdirektoratet.dk/DA/vejsektor/vejregler-og-tilladelser/vejregler/h%C3%B8ringer/Documents/H%C3%B8ring%20-%20%C3%85bent%20land/Rundk%C3%B8rsler.pdf

Internetsider:

[1] Denstoredanske.dk - Gyldendals åbne encyklopædi, Opslag:*Odometer*, http://www.denstoredanske.dk/Samfund,_jura_og_politik/Sprog/Fremmedord/o-ok/odometer (besøgt d. 26.03.2012)

[2] Geoteam.dk, *GPSnet.dk*, http://www.geoteam.dk/produkter/gpsnet.html (besøgt d. 03.04.2012)

[3] Leica-geosystems.com, *Leica TPS1200+ Series - High Performance Total Station*, http://www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=2629 (hentet d. 23.05.2012)

[4] Leica-geosystemssolutionscenters.com, *Leica GPS1200 Technical Data*, http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com/Site/Instrument%20PDF's/GPS%20Systems/SmartRover%20&%20GPS1200/GPS1200_TechnicalData_en.pdf (hentet d. 23.05.2012)

[5] Mechatronics.mech.northwestern.edu, *Digital Encoders*, http://mechatronics.mech.northwestern.edu/design_ref/sensors/encoders.html (besøgt d. 15.04.2012)

[6] PC-Control.co.uk, *Incremental Encoders*, http://www.pc-control.co.uk/incremental_encoders.htm (besøgt d. 12.04.2012)

[7] TireRack.com *Tire Tech Information/Air Pressure - Tire Inflation*, http://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=73 (besøgt d. 26.04.2012)

[8] Wikipedia.org, Opslag: *Urban canyon*, http://en.wikipedia.org/wiki/Urban_canyon (besøgt d. 03.04.2012)

Wheel encoders som positioneringsinstrument

- med udgangspunkt i positionering af mobil laserscanner uden GNSS

Appendiks

Bilags CD - struktur A

Dette appendiks viser folder strukturen på Bilags CD'en.

```
+---Beregninger
|   +---Kalibreringer
|   |   +---Hjulafstand
|   |   |   +---20120419
|   |   |   +---20120502
|   |   |   \---20120507
|   |   \---Hjulomkreds
|   |       +---20120419
|   |       +---20120502
|   |       \---20120507
|   +---Test
|   |   +---20120502
|   |   |   +---Cirkler på fast belægning
|   |   |   +---Cirkler på grusbelægning
|   |   |   +---Lige vej med jævn overflade
|   |   |   \---Lige vej med ujævn overflade
|   |   +---Hastigheder i cirkler
|   |   |   +---LILLE
|   |   |   \---STOR
|   |   +---Hastigheder under test
|   |   |   +---ALLE_CIRK
|   |   |   \---ALLE_LIGE
|   |   \---TOPCON
|   |       +---Med WE
|   |       \---Uden WE
|   \---Visualiseringer
|       +---Justeringsfaktor
|       \---Montecarlo
+---Matlab-scripts
|   +---Kalibrering
|   +---Positionering (smallPOS II)
|   +---Test
|   \---TOPCON Test
\---Rådata
    +---SmallPOS test
    \---TOPCON test
```

Opbygning af TOPCON IP-S2 HD

B

COWI's mobile mapping udstyr består af et køretøj (Mercedes GLK 4matic) og TOPCON IP-S2 HD mobile mapping system. Gennemgangen af TOPCON IP-S2 HD's opbygning og sensorer sker med udgangspunkt i produktbladet [TOPCON, 2010].



Figur B.1 – COWI's Mercedes GLK 4matic monteret med TOPCON IP-S2 HD mobile mapping systemet.

TOPCON IP-S2 HD består af en laserscanner, fem højopløselige kameraer, et 360° kamera, en GNSS-modtager, en IMU og to odometriske hjulsensorer. Alle sensorerne er på nær de to hjulsensorer monteret på et teleskopisk stativ, der er monteret på køretøjets tag, se figur B.2. TOPCON IP-S2 HD betjenes af køretøjets fører ved hjælp af en computer, der er monteret i køretøjets bagagerum, hvori der sidder fire 600 GB Solid State Diske til lagring af de store datamængder systemet opsamler. En skærm er monteret i passagersiden og giver føreren mulighed for foretage opsætning af systemet og monitorering under kørslen, se figur B.3. [TOPCON, 2010]



Figur B.2 – TOPCON IP-S2 HD (billedet viser ikke de to WE).



Figur B.3 – Skærm og tastatur til opsætning og betjening af MLS før og under kørsel.

B.1 Laserscanner

Laserscanneren er en Velodyne® HDL-64E S2 pulsbaseret udgave, der opbygget af 64 2D linje scannere. Disse 64 scannere er kompakt monteret i én sensor og udsender en vifte af 64 laserstråler hvert femte nanosekund, hvilket gør scanneren i stand til at opsamle helt op til 1.333 mio. punkter i sekundet. Punkter bliver indsamlet i et 360° azimut og ca. 30° vertikalt field of view (FOV). Laserstrålernes rækkevidde ved optimal refleksion er op til 120 meter, hvor optimal betragtes som 80 procents refleksion. [TOPCON, 2010]
Den samlede sensor har en præcision på afstandsmålingerne på 1.5 cm (svarende til 1σ) [Glennie & Lichti, 2010].

B.2 Kameraer

Systemet indeholder to typer kameraer, der giver mulighed for både at farvelægge punktskyen fra Velodyne® laserscanneren samt at orientere sig i kørselsforløbet i form af enkeltstående georefererede billeder. Til farvelægning af punktskyen anvendes et 360° Ladybug kamera, der med seks linser giver sfæriske billeder. I disse billeder interpoleres en farveværdi til punkterne fra laserscanneren. Den anden kameraenhed består af fem højopløselige Prosilica kameraer, der optager 2 megapixel billeder med en, i forhold til Ladybug kameraerne, væsentlig bedre optik. Ved hjælp af Prosilica kameraernes bedre optik, kan disse anvendes til at identificere objekter ved opmåling og

kortlægning i punktskyen med høj præcision. [TOPCON, 2010]

B.3 Positioneringsenheder

Positionering af MLS punktskyen sker ved brug af navigationsdata, som kommer fra en dobbelt frekvens GNSS-modtager, en højpræcisions MEMS-baseret IMU[1]. [TOPCON, 2010]

B.3.1 GNSS-modtager

GNSS-modtager er dobbeltfrekvent og anvender GPS og GLONASS satellitter. Modtageren er i stand til at behandle signaler der udsendes med forskellig frekvens, hvilket betyder at eksempelvis GPS-systemets L1- og L2-frekvens kan anvendes. [TOPCON, 2010] Efter dataopsamlingen er udført indhentes referencedata til postprocessering.

B.3.2 IMU

I dette tilfælde er IMU'en solid state mikrochipbaseret, hvilket gør sensorerne i IMU'en ekstremt små (én chip med elektronik og sensorer med aksial sensitivitet i tre retninger kan produceres i en størrelse på ca. 4.5 cm^3). [Barbour & Schmidt, 2001] Den anvendte IMU er en HG1700 (AG58) og fra producenten Honeywell. IMU'er af denne type er i stand til at modstå meget voldsomme kraftpåvirkninger (±50 G) og registrere store vinkelændringer på op til ±1000° per sekund, hvilket gør at denne HG1700 også finder anvendelse inden for våbenproduktion blandt andet i missiler. HG1700 er i stand til at opsamle data med en frekvens på 100 Hz, har et bias på $1°/t$ og en drift på $1°/t$. [TOPCON, 2010]

B.3.3 Odometre

De anvendte odometriske WE er produceret af Kübler og monteret på køretøjets baghjulsnav i begge sider, se figur B.5 [TOPCON, 2010]. Selve WE er et måleinstrument, der ligesom IMU'en måler relativt. WE'erne har en måleskive, der har 10.000 inddelinger (på hvilken de relative målinger foretages) og med kendskab til hjulets radius, er det muligt ved registrering af antallet af passerede inddelinger at bestemme, hvor langt hvert hjul har bevæget sig. [Kübler, 2012]

[1] En MEMS-baseret IMU består som alle andre IMU'er af accelerometre og gyroskoper.



Figur B.4 – IMU Honeywell HG1700 (AG58), der er integreret del af TOPCON IP-S2 HD systemet.



Figur B.5 – Det ses hvordan Kübler WE er monteret til baghjulets nav og er i stand til at registrere hvor meget dette roterer.

smallPOS II C

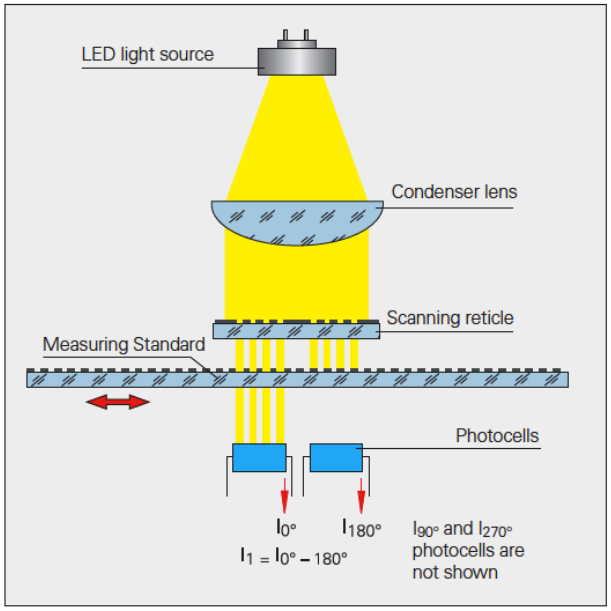
Afsnittet har til formål at præsentere det i Problemanalysen i Del I anvendte udstyr. Fokus vil være lagt på de dele af udstyret samt disses indstillinger projektgruppen har beskæftiget sig med i anvendelsen.

Udstyret, smallPOS II, er venligst udlånt af Henrik Vad Jensen fra Vejdirektoratet i Skanderborg. Baggrunden for udviklingen af smallPOS II var at Vejdirektoratet ønskede at foretage absolut positionering af deres videobiler. Til dette formål var GPS ikke tilstrækkeligt, derfor blev der forsket i anvendelse og integration af andre low-cost sensorer. Under udviklingen var der særligt fokus på, at retningen på de billeder/videoer, der blevet optaget, var gode. Derfor blev det valgt at inddrage WE, en MEMS gyro og et to-akset accelerometre i smallPOS. Formålet med smallPOS var at opnå en nøjagtighed på positionerne på 0.5 m i 3D.

C.1 WE (Heidenhain ROD 420)

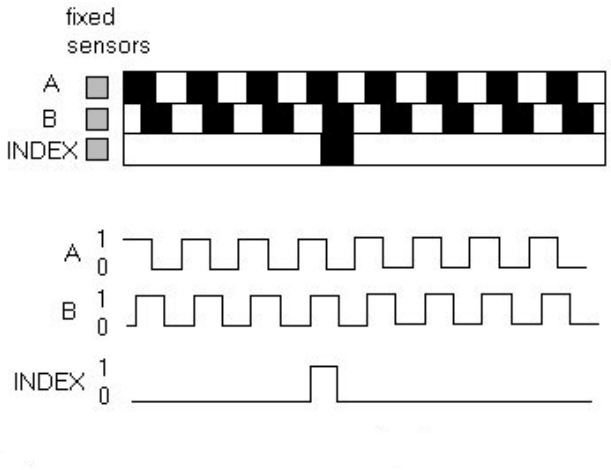
Sensoren er produceret af Heidenhain og er en optisk inkremental rotationssensor med modelnummeret ROD 420. I WE'eren findes en skive, der er lavet af enten glas eller stål, hvorpå der er markeret 5000 streger, hvilket giver i alt 10000 inddelinger på skiven. De 10000 inddelinger er lig det antal ticks, der maksimalt kan registreres per omgang, når der modtages data fra ROD 420. Sensoren måler relativt på skiven, hvilket vil sige, at inddelingerne på skiven ikke er unikke. Dette skyldes at de skal ikke skal angive en bestemt placering på skiven, men blot gøre det muligt at registrere bevægelse i en given retning.
Til registrering af stregerene anvendes fotoelektrisk scanning, hvilket er en målemetode, der giver mulighed for at registrere de 5000 meget fine linjer og give udlæsninger med en høj frekvens (op til 300 kHz). [Heidenhain, 2011]
Figur C.1 på næste side viser hvordan en LED-lyskilde belyser måleskiven i et bestemt mønster. Alt efter hvordan lyset trænger igennem måleskiven registreres bevægelse af skiven af fotosensoren, der er placeret nedenunder. Der foretages målinger fire steder på skiven samtidig ved henholdsvis 0°, 90°, 180° og 270°.

På måleskiven i ROD 420 findes fire kodede spor, som læses. Hvert af disse spor giver et inkrementalt signaloutput; to anvendes til at bestemme positionen på pladen, et anvendes til reference signal til registrering af antallet af hele rotationer og et til fejl-



Figur C.1 – Figuren viser hvordan en optisk sensor læser på WE's roterende skive.

registrering. Figur C.2 viser sporene til bestemmelse af position (A og B) og sporet til reference (INDEX).

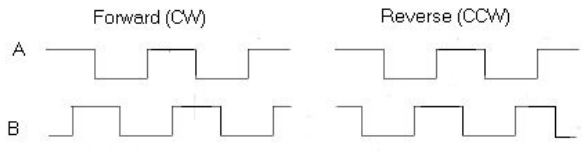


Figur C.2 – Mønster på inkremental skiver. Øverst ses mønstret på skiven. Nederst ses det signal, mønstret resulterer i.
©http://mechatronics.mech.northwestern.edu/design_ref/sensors/encoders.html

Referencesignalet giver én impuls per omdrejning, hvilket kan anvendes til at bestemme én reference position præcist. Fejlsignalet anvendes til at give meldinger om even-

tuelle fejl, der opstår f.eks. i fotosensoren eller i tilfælde af strømfejl. [6]

Ved at anvende to signaler til at bestemme positionen, er det muligt at bestemme i hvilken retning skiven har roteret, det bliver derfor muligt både at bestemme afstand og retning (frem/tilbage). [6]
Egenskaben til at detektere skift i retning kommer i kraft af anvendelse af kvadratur signaler. Dette betyder, at signaler fra henholdsvis kanal A og B er forskudt $\frac{1}{4}$. Forskellen på bevægelse i de forskelige retninger er illustreret af figur C.3. Sensoren er i stand til at registrerer overgangen fra kant til kant i signalet. Rækkefølgen dette skift sker i, giver informationer om den retning WE'erens aksel drejer. [5]

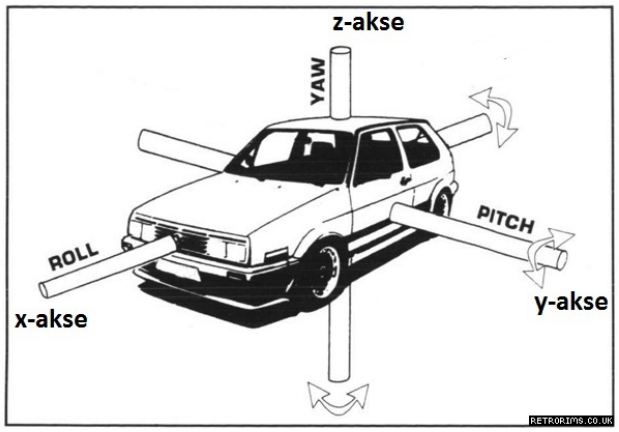


Figur C.3 – Figuren viser hvordan det ved hjælp af signalerne fra kanalerne A og B er muligt at detektere rotation i to retninger; med uret (CW) og mod uret (CCW).
©http://mechatronics.mech.northwestern.edu/design_ref/sensors/encoders.html

C.2 Ashtech GPS-modtager, MEMS gyro og MEMS accelerometre

I smallPOS II er det muligt at tilslutte en række forskellige GPS-antenner og alternativt hertil er der lavet en udgave af smallPOS II boksen, hvor en GPS-antenne er indbygget. Formålet med GPS'en er hovedsagligt at bidrage med tidstempling af data fra smallPOS II systemets sensorer for at muliggøre positionering. Til dette formål anvendes en Ashtech GPS-antenne. Dog er det muligt at anvende en GPS, der benytter sig af DGPS/RTK.

MEMS gyro og accelerometrene, er de samme sensorer, der indgår i en IMU, hvorfor disse anvendes på samme måde som en IMU til at give informationer om orientering og hældninger.
Gyroen giver information køretøjets orientering - drejningen omkring z-aksen også kaldet *yaw*. Accelerometrene er monteret således, at de måler langs køretøjets x- og y-akse. Accelerometrenes funktion er at give informationer til beregning af køretøjets *pitch* og *roll* drejninger. For illustration af akser og drejninger, se figur C.4.



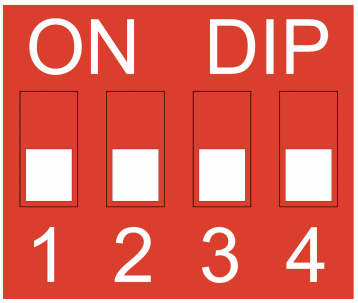
Figur C.4 – Illustration af et køretøjs akser og drejningerne om disse.

C.3 Opsætning af smallPOS II's DIP switch

Der er to blokke på hver printplade. Den øverste bestemmer opløsningen på udgangen "PULS CORALBA" og den nederste på udgangen "PULS GPS", som er blevet anvendt i dette projekt. DIP switchen består af fire kontakter, som kan være tændt eller slukket, se figur C.5. Når alle kontakter er slukket fås størst muligt output og for hver kontakt der tændes reduceres outputtet med en faktor ti, se figur C.6. Det maksimale output er 10000 impulser per rotation. I rapporten er det maksimale antal udlæsninger anvendt.



Figur C.5 – DIP switch på smallPOS II.



Figur C.6 – Illustration af DIP switche indstillet til maksimalt output.

Specifikationer for Leica TCR 1205+ og RX1210T

D

Dette appendiks har til formål at præsentere de instrumenter, der er anvendte til kontrolmåling og kalibrering. Præsentationen vil have fokus på hvilke nøjagtigheder, der kan opnås med de to instrumenter og hvordan instrumenter er blevet sat op i forbindelse med anvendelsen i projektet.

D.1 Leica TCR 1205+

Den anvendte totalstation er en Leica TCR 1205+ og har specifikationerne med betydning for rapporten, der ses af tabel D.1.

Vinkelmåling (Hz og V)	1.5 mgon
Afstandsmåling	1 mm + 1.5 ppm

Tabel D.1 – Specifikationer for Leica TCR 1205+. Alle spredninger er standard afvigelse (σ). [3]

I [Jensen, 2005] beregnes skøn for punktspredningen på et detailpunkt i forskellige målesituationer ved anvendelse af totalstation. På baggrund af disse skøn vurderes det, at et detailpunkt i denne rapport kan bestemmes med en spredning på ca. σ = 1 mm.

I rapporten anvendes to forskellige totalstationer, der begge er verificeret. Under måling er der korrigeret for tryk og temperatur, hvilket er indstillet ens på begge instrumenter. Prismet, der anvendes, er et Leica Miniprisme med en prismekonstant på 17.5 mm.

D.2 Leica RX1210T

Nøjagtigheden af anvendelse af Leica RX12010T er defineret af den referencetjeneste, der anvendes under opmåling. I denne rapport er referencetjenesten Spidernet.dk anvendt og det forventes at referencetjenesten har følgende spredninger, jf. [Jensen, 2005]:

	S = 1 km	S = 5 km	S = 10 km	S = 20 km
σ_{plan}	7 mm	11 mm	15 mm	25 mm
$\sigma_{højde}$	13 mm	17 mm	22 mm	32 mm

Tabel D.2 – Forventet nøjagtighed ved anvendelse af referencetjenesten Spidernet. S er afstanden mellem rover og den virtuelle referencestation. Alle spredninger er standard afvigelse (σ).

I og med at der oprettes en virtuel referencestation i det koordinat, hvori GNSS-modtageren opstartes og GNSS-modtageren opstartes nær de steder, hvor testene udføres, forventes den plane spredning ikke væsentligt at overstige 7 mm.

I opsætningen af Leica RX12010T vælges en dataopsamlingsfrekvens på 1 Hz og automatisk forløbende punktnummerering.

MATLAB-scripts E

Dette appendiks indeholder en gennemgang af væsentlige MATLAB-scripts, som er blevet anvendt i projektet.

Alle scripts bør køres fra Bilags CD'en, da formateringen i dette afsnit kan medføre fejl ved kopiering.

E.1 smallpos_wepos_circjust.m

Dette afsnit beskriver hvorledes MATLAB-scriptet, *smallpos_wepos_circjust.m*, som er blevet anvendt til positionering med WE'erne, er opbygget. Scriptet er at finde på Bilags CD'en.

Der startes med at rydde alle gemte variable m.m. Herefter sættes de faste parametre for antal ticks per omdrejning, radius på hjulene samt afstanden mellem hjulene.

```
clc
clear all
close all

%% Sæt parametre
% Antal klik per omdrejning (N)
N       = 10000;

% Radius på hjul - beregning ud fra dækstørrelsen giver 0.3322 m
R_v     = 2.04219/(2*pi); % m - Kalibreret
R_h     = 2.03895/(2*pi); % m - Kalibreret

% Afstand mellem hjul
omega   = 1.5806;    % m Datablad siger 1.574m, kalibreret til 1.5806
```

Der skal importeres data fra henholdsvis WE'er og fra GNSS, disse importeres som formateret i den specifikke filtype, gemmes i et cell array, og kan herefter udlæses som ønskes. GNSS-tiden er formateret som dato og tid, da alene tiden skal anvendes bliver denne streng behandlet og tiden udtrukket. For både WE- og GNSS-tid foretages omregning til hele sekunder for nemmere sammenknytning.

```
%% Importer data
% Spørg om fil navn
filtmp  = input('Hvad hedder filen med data (uden .txt): ','s');
filnavn = sprintf('%s.txt',filtmp);
fil     = fopen(filnavn);
data    = textscan(fil,'%s %s %f %s %s %f %s %f %s %f %s %s %s %s ...
    %s %s %s %s %s','delimiter',',');
NMEA    = textread(filnavn,'%s'); % læser de fulde data  linier til ...
    brug i checksum beregning!

% Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
    Disse skal
% konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
wetid = data(:,3);            % Tiderne læses ind til omregning til sek
we_v  = cell2mat(data(:,6));  % Vektor med alle tick udlæsninger ...
    fra venstre WE
we_h  = cell2mat(data(:,8));  % Vektor med alle tick udlæsninger ...
    fra højre WE
back  = cell2mat(data(:,10)); % Vektor med 1 for kørsel fremad og 0 ...
    for hvis der er bakket

% WE tid til sekunder omregning
we_tid    = zeros(length(wetid{1,1}),1); % Klargør vektor til den ...
    fulde tid
we_sek = zeros(length(wetid{1,1}),1); % Klargør vektor til sek

for cnt = 1:length(wetid{1,1})
    tempwetid   = sprintf('%s',wetid{1,1}{cnt}(1:end));
    we_tid(cnt) = str2double(tempwetid);
    % Tiden i sekunder bestemmes
    tempwetim   = sprintf('%s',wetid{1,1}{cnt}(1:2));
    we_sek(cnt) = str2double(tempwetim) * 3600;
    tempwemin   = sprintf('%s',wetid{1,1}{cnt}(3:4));
    we_sek(cnt) = we_sek(cnt) + str2double(tempwemin) * 60;
    tempwesek   = sprintf('%s',wetid{1,1}{cnt}(5:end));
    we_sek(cnt) = we_sek(cnt) + str2double(tempwesek);
end


% Importer GNSS data (Leica)
gnss_filnavn = sprintf('%s_GPS.txt',filtmp);
gnss_fil     = fopen(gnss_filnavn);
gnss_data    = textscan(gnss_fil,'%s %f %f %f %f %f %f %f %f %f %s ...
    %s %s %s','delimiter',',','HeaderLines',7);
% Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
    Disse skal
% konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
gnss_e    = cell2mat(gnss_data(:,2)); % GNSS easting koordinat
gnss_n    = cell2mat(gnss_data(:,3)); % GNSS northing koordinat
gnss_h    = cell2mat(gnss_data(:,4)); % GNSS højde
gnss_dato = gnss_data(:,14);          % GNSS dato
```

```
% GNSS Dato: Her skal alene tiden udtrækkes fra GNSS datoen
gnss_tid = zeros(length(gnss_dato{1,1}),1); % Klargør vektor til tid
gnss_sek = zeros(length(gnss_dato{1,1}),1); % Klargør vektor til sek

for cnt = 1:length(gnss_dato{1,1})
    temptidstr    = ...
        sprintf('%s',gnss_dato{1,1}{cnt}(12:13),gnss_dato{1,1}{cnt} ...
        (15:16),gnss_dato{1,1}{cnt}(18:19));
    gnss_tid(cnt) = str2double(temptidstr);
    tempgnsstim   = sprintf('%s',gnss_dato{1,1}{cnt}(12:13));
    gnss_sek(cnt) = str2double(tempgnsstim) * 3600;
    tempgnssmin   = sprintf('%s',gnss_dato{1,1}{cnt}(15:16));
    gnss_sek(cnt) = gnss_sek(cnt) + str2double(tempgnssmin) * 60;
    tempgnsssek   = sprintf('%s',gnss_dato{1,1}{cnt}(18:19));
    gnss_sek(cnt) = gnss_sek(cnt) + str2double(tempgnsssek) - 1;
end
```

Der oprettes en resultatfil, og den første linje i denne skrives.

```
%% Opret fil til resultater
restmp  = sprintf('%s.res',filtmp);
res_fil = fopen(restmp,'w');
fprintf(res_fil,' Tæller        Tid            S             Phi ...
           X           Y          Checksum ok? (1 = ja, 0 = nej)\n');
```

Checksummen for WE-data beregnes, og kontrolleres op mod den i dataene angivne checksum; 1 skrives hvis de er ens og 0 skrives hvis de ikke er.

```
%% Checksum
% Checksummen skal behandles og udregnes så det kan konstateres ...
    hvorvidt
% data er korrupt

check = data{:,19}; % Indlæs checksummen i 'check'

for cnt = 1:length(check)
    %Først indlæses og forkortes checksummen til sammenligning med den
    % beregnede checksum
    tempstr = sprintf('%s',[check{cnt,:}]);
    kortcheck(cnt,:) = tempstr(3:end);

    % Så beregnes checksummen så denne kan sammenholdes med den udlæste
    checksum = 0; % reset checksum variablen

    NMEA_String = sprintf('%s',[NMEA{cnt,1}]);
    % se om strengen indeholder * som starter checksummen og behold
    % strengen op til * for at udregne checksummen
```

```
    NMEA_String = strtok(NMEA_String,'*');

    NMEA_String_d = double(NMEA_String); % Konverter charactere i ...
        strengen til "double" værdier
    for count = 2:length(NMEA_String) % Checksum beregningen ...
        ignorer $ i starten
        checksum = bitxor(checksum,NMEA_String_d(count)); % ...
            checksum beregning
        checksum = uint16(checksum); % Sørger for at checksummen er ...
            unsigned int16
    end

    % Konverter checksummen til hex værdi
    checksum = double(checksum);
    checksum = dec2hex(checksum);

    % Tilføjer 0 til starten af checksummen hvis den kun består af et
    % nekelt ciffer, f.eks. 4 bliver til 04
    if length(checksum) == 1
        checksum = strcat('0',checksum);
    end
    % Gem værdierne i 'bercheck'
    bercheck(cnt,:) = checksum;

    % Sammenlign de to checksumme og gem resultatet (1 = ens, 0 = uens)
    checkcheck(cnt,:) = strcmpi(bercheck(cnt,:),kortcheck(cnt,:));
end
```

Næste skridt er at sætte startværdier for position og retning. Start positionen bestemmes ved at finde den første WE-epoke, som passer med tiden for første GNSS-punkt indenfor -0.041 til 0 sekunder. Herefter korrigeres den første observation efter denne med tidsforskydningen. Retningen beregnes fra første GNSS-punkt og til det første punkt der ligger over 0.5 m fra dette. Denne beregning foretages ud fra en antagelse om, at der ikke er blevet drejet i dette tidsrum.

```
% Start værdier
% Beregn start punkt som første gang WE tid stemmer indenfor 0.041 ...
    sek af
% GNSS tid
test = 1;
cnt = 1;
while test == 1;
    for cnt1 = 1:length(we_sek)
        if -0.041 ≤ we_sek(cnt1) - gnss_sek(cnt) && we_sek(cnt1) - ...
            gnss_sek(cnt) ≤ 0.001
            westart = cnt1 + 1;
            gnssstart = cnt;
            test = 0;
        end
```

```
    end
    cnt = cnt + 1;
end


x_forr   = gnss_e(gnssstart,1); % Start x-koord taget fra det først ...
    GNSS koordinat der stemmer i tid
y_forr   = gnss_n(gnssstart,1); % Start y-koord taget fra det først ...
    GNSS koordinat der stemmer i tid
s_forr   = 0; % Start afstand

% Korriger for tidsforskyldelsen på den første observation efter start
% punktet
forskydning     = (we_sek(westart) - gnss_sek(gnssstart)) * 100; % ...
    Find tidsforskydningen
forskel         = (we_sek(westart) - we_sek(westart-1)) * 100; % ...
    Find tidsforskellen (bør være 5/100 sek)
we_v(westart,1) = we_v(westart,1) * (forskydning/forskel); % ...
    Korriger observationen
we_h(westart,1) = we_h(westart,1) * (forskydning/forskel); % ...
    Korriger observationen

% Beregn start vinkel
cnt = gnssstart;
test = 1;
while test == 1
    cnt = cnt + 1;
    gnss_afst = ...
        sqrt((gnss_e(cnt,1)-gnss_e(gnssstart,1))^2+(gnss_n(cnt,1) ...
        -gnss_n(gnssstart,1))^2);
    if gnss_afst ≥ 0.5; % Første gang afstanden mellem start GNSS ...
        pkt og det beregnede punkt  er større end 0.5 meter stoppes
        test = 0;
    end
end
phi_forr = atan2((gnss_n(cnt,1)-gnss_n(gnssstart,1)),(gnss_e(cnt,1) ...
    -gnss_e(gnssstart,1))); % Start retning beregnet ud fra det ...
    fundne punkt og det første GNSS punkt
```

Der forberedes matrice til resultater og den første linje skrives til denne.

```
% Prealloker res matrix
res      = zeros(length(we_tid)-(westart-2),7);

res(1,1) = westart-1;
res(1,2) = we_tid(westart-1,1);
res(1,3) = s_forr;
res(1,4) = phi_forr*(180/pi);
res(1,5) = x_forr;
res(1,6) = y_forr;
```

```
res(1,7) = phi_forr;
% Skriv værdier til fil
fprintf(res_fil,'%5.0f %15.2f %13.4f %12.3f %12.4f %12.4f ...
    %12.0f\n',res(1,1:6),checkcheck(westart-1,:));

rescnt = 2; % Resultatcounter
```

Der skal beregnes en position for hver epoke, hvorfor der beregnes positioner i en løkke, som starter i "westart" og ender i antallet af epoker.

Først beregnes afstanden for det enkelte hjul og afstanden for midtpunktets i epoken bestemmes, her tages der hensyn til hvorvidt der er blevet bakket i epoken. Afstanden for epoken lægges til den samlede afstand for at kunne afgøre den samlede tilbagelagte afstand. Herefter foretages beregning af vinkelændring for epoken, ud fra denne beregnes den nuværende retning ud fra ændringen og den forrige, hvis den nuværende er større end 2π korrigeres dette.

Ud fra den beregnede afstand og vinkelændringen i epoken beregnes positionen. Hvis vinkelændringen har været 0, anvendes justeringsfaktoren ikke.

Resultaterne gemmes i en matrice til senere brug. Værdierne skrives til resultatfilen og forrige værdier gemmes til anvendelse i næste iteration.

```
for cnt = westart:length(we_tid)
    % Beregn afstand for det enkelt hjul
    ∆_s_l = R_v * (((2 * pi) / 10000) * (we_v(cnt)));
    ∆_s_r = R_h * (((2 * pi) / 10000) * (we_h(cnt)));

    % Afstand for middelpunkt i epoken
    if back(cnt) == 1; % Hvis bak indikatoren er 1, køres der fremad
        s_epo     = 0.5*(∆_s_l+∆_s_r);
    else % Hvis indikkatoren er 0, bakkes der og afstanden skal ...
        ganges med -1
        s_epo     = (0.5*(∆_s_l+∆_s_r))*(-1);
    end

    % Samlede tilbagelagte distance
    s         = s_forr+s_epo;

    % Ændring til phi i denne epoke
    ∆_phi = (∆_s_r-∆_s_l)/omega;

    % Nuværende retning phi
    phi       = phi_forr + ∆_phi;

    % Hvis phi er større end 2*pi (en hel omgang) træk 2pi fra
    if phi ≥ 2*pi
        phi = phi - (2*pi);
```

```
    else if phi < 0
            phi = phi + (2*pi);
        end
    end

    if Δ_phi == 0 % Hvis vinkelændringen er 0 skal circ ...
        justeringsfaktoren ikke anvendes!
        x         = x_forr + s_epo * cos(phi_forr + Δ_phi/2);
        y         = y_forr + s_epo * sin(phi_forr + Δ_phi/2);
    else    % Beregning af nuværende koordinater for midtpunkt med ...
        justeringsfaktor
        x         = x_forr + (sin(Δ_phi/2))/(Δ_phi/2) * s_epo * ...
            cos(phi_forr + Δ_phi/2);
        y         = y_forr + (sin(Δ_phi/2))/(Δ_phi/2) * s_epo * ...
            sin(phi_forr + Δ_phi/2);
    end


    % Gem resultater
    res(rescnt,1) = cnt;
    res(rescnt,2) = we_tid(cnt,1);
    res(rescnt,3) = s;
    res(rescnt,4) = phi*(180/pi);
    res(rescnt,5) = x;
    res(rescnt,6) = y;
    res(rescnt,7) = phi;

    % Skriv værdier til fil
    fprintf(res_fil,'%5.0f %15.2f %13.4f %12.3f %12.4f %12.4f ...
        %12.0f\n',res(rescnt,1:6),checkcheck(cnt,:));

    % Gem værdier til næste iteration
    s_forr   = s;
    phi_forr = phi;
    x_forr   = x;
    y_forr   = y;

    % Læg et til resultatcounteren
    rescnt = rescnt + 1;
end
```

Efter beregningerne er fuldendt, plottes henholdsvis rute for WE'erne alene samt WE og GNSS sammen. Resultat- og plotfilerne lukkes.

```
%% Plot
% Plot WE rute
plot(res(:,5),res(:,6));
plotnavn = sprintf('%s_WE.png',filtmp);
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r300');
```

```
axis equal
hold on
% Plot WE og GNSS sammen
plot(gnss_e,gnss_n,'*r');
plotnavn = sprintf('%s_WE+GNSS.png',filtmp);
hleg1 = legend('WE','GNSS');
set(hleg1,'Location','Best');
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r300');

%% Luk ting og ryd op
fclose all;
```

E.2 kalib_hjulomk.m

Dette appendiks beskriver MATLAB-scriptet, som er blevet udarbejdet og anvendt til kalibrering af hjulafstand ved brug af totalstation. Scriptet er at finde på Bilags CD'en.

Først ryddes alle gemte variable og eventuelle filer og figurer lukkes. Der oprettes en resultatfil og den første linje i denne skrives.

```
clc
clear all
close all

%% Åben resultatfil
resfil = fopen('HJULOMKKALIB.RES','w');

% Skriv første linie
fprintf(resfil,'Resultat for beregning af hjulomkreds\r\n');
```

Der læses data ind fra totalstations målingerne. Data fra WE'erne indlæses i en løkke som kører én gang for hver kørsel. I den enkelte løkke indlæses en fil med WE-data og denne data gemmes i to vektorer, for henholdsvis venstre og højre WE.

```
% Angiv antallet af kørsler
koersler = 5;

% Fra totalstation (Afstande mellem start-stop for de enkelte tests)
afst_vh = load('HJULOM_TOTAL.TXT');

% Fra WE, læser fra filer i forhold til cnt
for cnt = 1:koersler
    % Åben filen
    filopen = sprintf('fopen(''KALIBHJULOMK0%1.0f.TXT'',''r'')',cnt);
    fil     = eval(filopen);
```

```
    % Indlæs data til et cell array
    data    = textscan(fil,'%s %s %f %s %s %f %s %f %s %f %s %s %s ...
        %s %s %s %s %s %s','delimiter',',');

    % Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
        Disse skal
    % konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
    we_v_temp = cell2mat(data(:,6)); % Venstre WE
    we_h_temp = cell2mat(data(:,8)); % Højre WE
```

Summen af ticks beregnes for den enkelte WE. Ud fra summen og den med totalstation målte afstand for den enkelte WE beregnes en omkreds for højre og venstre hjul. De beregnede værdier gemmes for at der kan foretages udjævning af resultaterne.

```
    % Der beregnes sum af ticks for den enkelte WE
    we_v_sum(cnt,1) = sum(we_v_temp); % Venstre WE
    we_h_sum(cnt,1) = sum(we_h_temp); % Højre WE

    % Beregn en omkreds for det enkelt hjul for hver test
    v_omk(cnt,1) = afst_vh(cnt,1)/(we_v_sum(cnt,1)/10000);
    h_omk(cnt,1) = afst_vh(cnt,2)/(we_h_sum(cnt,1)/10000);

    % Opstil b vektor til brug for mindste kvadraters
    b(cnt,1)     = v_omk(cnt,1);
    b(cnt+5,1)   = h_omk(cnt,1);

end
```

Der foretages mindste kvadraters udjævning af resultatet af omkredsberegningen for højre og venstre hjul. Slutteligt beregnes spredningen på residualerne.

```
%% Mindste kvadraters udjævning
A = [1 0
    1 0
    1 0
    1 0
    1 0
    0 1
    0 1
    0 1
    0 1
    0 1]; % Designmatricen

C = diag(ones(length(b),1));  % Vægtmatricen
x_hat=(A'*C*A)^-1*A'*C*b;       % X_hat estimerede værdier!
r=A*x_hat-b;                    % Residualer
m=size(A,1);                    % Størrelsen af A matricen
```

```
n=size(A,2);                    % Størrelsen af A matricen

spred_resV = std(r(1:5));       % Spredning for residualerne for ...
    Venstre hjul
spred_resH = std(r(6:10));      % Spredning for residualerne for ...
    Højre hjul
```

Sidst printes resultaterne til resultatfilen og denne lukkes.

```
%% Print resultaterne til en fil
fprintf(resfil,'Venstre:\t %6.4f m\r\n',x_hat(1,1));
fprintf(resfil,'Højre:  \t %6.4f m\r\n\n',x_hat(2,1));

fprintf(resfil,'Værdier for venstre hjul:\n');
fprintf(resfil,'Målte afstand    Antal ticks    Beregnet omkreds    ...
    Residual\n');
fprintf(resfil,'     (m)                              (m) ...
                \n');
for cnt = 1:5
    fprintf(resfil,'%11.4f    %10.0f     %13.4f   ...
        %13.4f\n',afst_vh(cnt,1),we_v_sum(cnt),v_omk(cnt),r(cnt,1));
end
fprintf(resfil,'\nSpredning på residualerne:                    ...
    %13.5f\n',spred_resV);
fprintf(resfil,'\nVærdier for højre hjul:\n');
fprintf(resfil,'Målte afstand    Antal ticks    Beregnet omkreds    ...
    Residual\n');
fprintf(resfil,'     (m)                              (m) ...
                \n');
for cnt = 1:5
    fprintf(resfil,'%11.4f    %10.0f     %13.4f   ...
        %13.4f\n',afst_vh(cnt,2),we_h_sum(cnt),h_omk(cnt),r(cnt+5,1));
end
fprintf(resfil,'\nSpredning på residualerne:                    ...
    %13.5f\n',spred_resH);

%% Ryd op
fclose(resfil);
```

E.3 kalib_hjulomk_gnss.m

Dette appendiks beskriver MATLAB-scriptet, som er blevet udarbejdet og anvendt til kalibrering af hjulafstand ved brug af GNSS. Scriptet er at finde på Bilags CD'en.

Først ryddes alle gemte variable og eventuelle filer og figurer lukkes. Der oprettes en resultatfil og den første linje i denne skrives.

```
clc
clear all
close all

%% Åben resultatfil
resfil = fopen('HJULOMKKALIB.RES','w');

% Skriv første linie
fprintf(resfil,'Resultat for beregning af hjulomkreds\r\n');
```

Det bestemmes hvilke filer der er tilstede i mappen til brug for kalibrering. Data fra WE'er og GNSS indlæses i en løkke, der kører en gang for hver kørsel (bestemt ud fra antallet af WE filer). I den enkelte løkke indlæses én fil med WE-data og én fil med GNSS-data og data fra WE'erne gemmes i to vektorer, for henholdsvis venstre og højre WE. GNSS-dataen anvendes til at beregne afstanden fra første til sidste GNSS-punkt.

```
% OBS: Der læses i mappen, og der skal være matchende WE filer ...
    (.txt) og
% GNSS filer (.gps)

we_filer   = ls('*.txt');
gnss_filer = ls('*.gps');

% Fra WE, læser fra filer i forhold til cnt
for cnt = 1:size(we_filer,1)
    filnavn = sprintf('%s',we_filer(cnt,:));
    fil     = fopen(filnavn);
    data    = textscan(fil,'%s %s %f %s %s %f %s %f %s %f %s %s %s ...
        %s %s %s %s %s %s','delimiter',',');

    % Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
        Disse skal
    % konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
    we_v_temp = cell2mat(data(:,6));  % Vektor med alle tick ...
        udlæsninger fra venstre WE
    we_h_temp = cell2mat(data(:,8));  % Vektor med alle tick ...
        udlæsninger fra højre WE

    % Importer GNSS data (Leica)
    gnss_filnavn = sprintf('%s',gnss_filer(cnt,:));
    gnss_fil     = fopen(gnss_filnavn);
    gnss_data    = textscan(gnss_fil,'%s %f %f %f %f %f %f %f %f %f ...
        %s %s %s %s','delimiter',',','HeaderLines',7);

    % Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
        Disse skal
    % konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
    gnss_e    = cell2mat(gnss_data(:,2)); % GNSS easting koordinat
```

```
    gnss_n    = cell2mat(gnss_data(:,3)); % GNSS northing koordinat

    % Beregn afstand fra først GNSS punkt til sidste GNSS punkt
    afst_vh(cnt,1) = ...
        sqrt((gnss_e(end,1)-gnss_e(1,1))^2+(gnss_n(end,1)-gnss_n(1,1))^2);
```

Summen af ticks beregnes for den enkelte WE. Ud fra summen og den med GNSS målte afstand beregnes en omkreds for højre og venstre hjul. De beregnede værdier gemmes for at der kan foretages udjævning af resultaterne.

```
    % Der beregnes sum af ticks for den enkelte WE
    we_v_sum(cnt,1) = sum(we_v_temp); % Venstre WE
    we_h_sum(cnt,1) = sum(we_h_temp); % Højre WE

    % Beregn en omkreds for det enkelt hjul for hver test
    v_omk(cnt,1) = afst_vh(cnt,1)/(we_v_sum(cnt,1)/10000);
    h_omk(cnt,1) = afst_vh(cnt,1)/(we_h_sum(cnt,1)/10000);

    % Opstil b vektor til brug for mindste kvadraters
    b(cnt,1)                    = v_omk(cnt,1);
    b(cnt+size(we_filer,1),1)   = h_omk(cnt,1);

end
```

Der foretages mindste kvadraters udjævning af resultatet af omkredsberegningen for højre og venstre WE. Slutteligt beregnes spredningen på residualerne.

```
%% Mindste kvadraters udjævning
for cnt = 1:size(we_filer,1)
    A(cnt,1) = 1;
    A(cnt,2) = 0;
    A(cnt+size(we_filer,1),1) = 0;
    A(cnt+size(we_filer,1),2) = 1; % Designmatricen
end

%C = diag(ones(length(b),1));   % Vægtmatricen
x_hat=(A'*A)^-1*A'*b;           % X_hat estimerede værdier!
r=A*x_hat-b;                    % Residualer
m=size(A,1);                    % Størrelsen af A matricen
n=size(A,2);                    % Størrelsen af A matricen

spred_resV = std(r(1:size(we_filer,1)));       % Spredning for ...
    residualerne for Venstre hjul
spred_resH = std(r(size(we_filer,1)+1:size(we_filer,1)*2));      % ...
    Spredning for residualerne for Højre hjul
```

Sidst printes resultaterne til resultatfilen og denne lukkes.

```
%% Print resultaterne til en fil
fprintf(resfil,'Venstre:\t %6.4f m\r\n',x_hat(1,1));
fprintf(resfil,'Højre:  \t %6.4f m\r\n\n',x_hat(2,1));

fprintf(resfil,'Værdier for venstre hjul:\n');
fprintf(resfil,'Målte afstand    Antal ticks    Beregnet omkreds    ...
    Residual\n');
fprintf(resfil,'     (m)                              (m) ...
                \n');
for cnt = 1:size(we_filer,1)
    fprintf(resfil,'%11.4f    %10.0f     %13.4f   ...
        %13.4f\n',afst_vh(cnt),we_v_sum(cnt),v_omk(cnt),r(cnt,1));
end
fprintf(resfil,'\nSpredning på residualerne:                    ...
    %13.5f\n',spred_resV);
fprintf(resfil,'\nVærdier for højre hjul:\n');
fprintf(resfil,'Målte afstand    Antal ticks    Beregnet omkreds    ...
    Residual\n');
fprintf(resfil,'     (m)                              (m) ...
                \n');
for cnt = 1:size(we_filer,1)
    fprintf(resfil,'%11.4f    %10.0f     %13.4f   ...
        %13.4f\n',afst_vh(cnt),we_h_sum(cnt),h_omk(cnt),r(cnt+ ...
        size(we_filer,1),1));
end
fprintf(resfil,'\nSpredning på residualerne:                    ...
    %13.5f\n',spred_resH);

%% Ryd op
fclose(resfil);
fclose all;
```

E.4 kalib_hjulafstand.m

Dette appendiks beskriver MATLAB-scriptet, der er blevet udarbejdet og anvendt til kalibrering af hjulafstand. Scriptet er at finde på Bilags CD'en.

Først ryddes alle gemte variable og eventuelle filer og figurer lukkes. Der oprettes en resultatfil for hele kalibreringen og den første linje i denne skrives. Det bestemmes hvilke filer som er tilstede i mappen, hvori filerne, der skal anvendes til kalibrering, findes.

```
%% Gør klar
clc
clear all
close all
```

```
% Opret fil til resulater
resfil = fopen('HJULAFSTKALIB.RES','w');

% Skriv første linie
fprintf(resfil,'Resultat for beregning af hjulafstand\r\n');

%% Afgør hvilke filer der er tilstede til kalibrering
% OBS: Der læses i mappen, og der skal være matchende WE filer ...
    (.txt) og
% GNSS filer (.gps)

we_filer   = ls('*.txt');
gnss_filer = ls('*.gps');
```

Der startes en løkke, som beregner et sæt ad gangen, det vil sige der beregnes et sæt GNSS-data med det tilhørende WE datasæt. Data indlæses fra henholdsvis WE- og GNSS-filerne.

```
%% Løkke som laver et sæt ad gangen
res_udj = zeros(size(we_filer,1),5); % Variabel til at gemme ...
    resultater til brug i udjævning

residualer = []; % til at vise hvad residualer for cirkel fit har været

for filcnt = 1:size(we_filer,1);
    filnavn = sprintf('%s',we_filer(filcnt,:));
    fil     = fopen(filnavn);
    data    = textscan(fil,'%s %s %f %s %s %f %s %f %s %f %s %s %s ...
        %s %s %s %s %s %s','delimiter',',');

    % Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
        Disse skal
    % konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
    we_v = cell2mat(data(:,6));  % Vektor med alle tick udlæsninger ...
        fra venstre WE
    we_h = cell2mat(data(:,8));  % Vektor med alle tick udlæsninger ...
        fra højre WE
    back = cell2mat(data(:,10)); % Vektor med 1 for kørsel fremad ...
        og 0 for hvis der er bakket

    % Importer GNSS data (Leica)
    gnss_filnavn = sprintf('%s',gnss_filer(filcnt,:));
    gnss_fil     = fopen(gnss_filnavn);
    gnss_data    = textscan(gnss_fil,'%s %f %f %f %f %f %f %f %f %f ...
        %s %s %s %s','delimiter',',','HeaderLines',7);
    % Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
        Disse skal
    % konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
```

```
gnss_e    = cell2mat(gnss_data(:,2)); % GNSS easting koordinat
gnss_n    = cell2mat(gnss_data(:,3)); % GNSS northing koordinat
gnss_h    = cell2mat(gnss_data(:,4)); % GNSS højde
```

Der sættes parametre, som skal anvendes i forbindelse med beregningerne. Hjulenes radius skal være bestemt ved kalibrering (omkredsen omregnes til en radius). Der angives en foreløbig værdi for hjulafstanden. Resultatfil for den enkelte beregning oprettes og den første linje skrives.

```
%% Sæt parametre til test
% Antal klik per omdrejning (N)
N       = 10000;

% Radius på hjul - omkredsen er bestemt ved kalibrering
R_v     = 2.04219/(2*pi); % m
R_h     = 2.03895/(2*pi); % m

% Afstand mellem hjul - angiv en foreløbig værdi
omega   = 1.574;    % m Datablad siger 1.574m

% Åben fil til resultater
restmp  = sprintf('%s.res',we_filer(filcnt,1:end-4));
res_fil = fopen(restmp,'w');
fprintf(res_fil,' Tæller        Tid            S             ...
    Phi         X            Y\n');
```

Der foretages beregning af WE-ruten, hvilket foretages på samme måde som beskrevet i afsnit E.1.

For GNSS ønskes det at bestemme en cirkel ud fra dataene, hvilket foretages ved mindste kvadraters udjævning. Til dette er Peter Cederholms script *cirfit2d.m* blevet anvendt, dog er det blevet tilpasset til dette scripts opbygning. Peter Cederholms script *cirfit2d.m* er at finde på Bilags CD'en. Outputtet af dette er koordinater for cirkelcentrum og radius.

Der foretages beregning af hjulafstanden. Først bestemmes radius for den cirkel WE beregningen har bestemt, herefter beregnes forholdet mellem WE og GNSS cirklernes radius. Forholdet ganges på den foreløbige hjulafstand for at bestemme den kalibrerede hjulafstand i testen. Resultaterne gemmes i en matrice til brug i forbindelse med udjævning af resultaterne.

```
%% Beregning af hjulafstand

% Først beregnes radius for WE cirklen
r_we      = s/phi;
```

```
    % Beregn forholdet mellem radius for GNSS og WE
    r_forhold = r/r_we;

    % Beregn den kalibrede hjulafstand
    hjul_afstand_kalib = omega * r_forhold;


    %% Gem værdier til brug i udjævning
    res_udj(filcnt,1) = r_we;
    res_udj(filcnt,2) = r;
    res_udj(filcnt,3) = varfak;
    res_udj(filcnt,4) = r_forhold;
    res_udj(filcnt,5) = hjul_afstand_kalib;

    residualer = [residualer;res];
end
```

Der foretages mindste kvadraters udjævning af de beregnede hjulafstande. Der beregnes spredning for de enkelte resultater.

```
%% Mindste kvadraters udjævning
b = res_udj(:,5);

A = ones(length(b),1); % Designmatricen

C = diag(ones(length(b),1)); % Vægtmatricen
x_hat=(A'*C*A)^-1*A'*C*b;    % X_hat estimerede værdier!
r=A*x_hat-b;                 % Residualer
m=size(A,1);                 % Størrelsen af A matricen
n=size(A,2);                 % Størrelsen af A matricen
sigma_hat=(r'*C*r)/(m-n);    % Variansfaktor

%% Spredninger på de enkelte resultater
spred_r_we               = std(res_udj(:,1)); % Spredning for ...
    radius for WE
spred_r                  = std(res_udj(:,2)); % Spredning for ...
    radius for GNSS
spred_r_forhold          = std(res_udj(:,4)); % Spredning for ...
    radius forhold
spred_hjul_afstand_kalib = std(res_udj(:,5)); % Spredning for ...
    hjulafstand kalibreret
```

Slutteligt skrives resultaterne til resultatfilen og denne lukkes.

```
%% Print resultaterne til en fil
fprintf(resfil,'Hjulafstand:\t %6.4f m\t\t(Anvendt start værdi: ...
    %6.3f m)\r\n\n',x_hat,omega);
fprintf(resfil,'Værdier for de enkelte testkørsler:\n');
```

```
fprintf(resfil,'Nummer    GNSS radius    WE radius     Radius ...
    forhold    Hjulafstand\r\n');
fprintf(resfil,'              (m)           (m) ...
                                (m)\r\n');
for cnt = 1:1:size(we_filer,1)
    fprintf(resfil,'%2.0f    %13.4f %13.4f   %13.5f    ...
        %13.4f\r\n',cnt,res_udj(cnt,2),res_udj(cnt,1),res_udj(cnt,4), ...
        res_udj(cnt,5));
end
fprintf(resfil,'\nSpredning: %8.4f %13.4f   %13.5f    ...
    %13.4f\r\n',spred_r,spred_r_we,spred_r_forhold, ...
    spred_hjul_afstand_kalib);

%% Ryd op
fclose(resfil);
```

E.5 test_we.m

Dette appendiks beskriver MATLAB-scriptet, som er blevet udarbejdet og anvendt at beregne 2D-koordinat- og retningsafvigelser i forbindelse med test af WE'erne. Scriptet er at finde på Bilags CD'en.

De første dele af scriptet med indlæsning af data, behandling af GNSS-data og beregning af WE-positioner, foretages som beskrevet i afsnit E.1.

Efter positioner fra WE'erne er blevet beregnet, startes beregningen af afvigelser. Der startes en løkke som for alle GNSS-tider gennemløber alle WE-tider for at finde et nært match. Hvis tiderne stemmer præcist sammenlignes koordinaterne direkte. Hvis tiderne ikke stemmer præcist, foretages interpolation af WE-koordinatet i forhold til tidsforskydningen. Koordinatafvigelsen beregnes i 2D og gemmes til senere plot og skrivning til resultatfilen.

```
%% Beregning af afvigelser
cnt = 1;
afvigcnt = 1;
while cnt ≤ length(gnss_sek)
    for cnt1 = 1:length(we_sek)
        if -0.041 ≤ we_sek(cnt1) - gnss_sek(cnt) && we_sek(cnt1) - ...
            gnss_sek(cnt) ≤ 0.001
            rescnt = cnt1 - (westart - 2);
            if we_sek(cnt1) - gnss_sek(cnt) == 0
                % Hvis tiderne stemmer helt kan afvigelserne beregnes
                % direkte
                e_int = res(rescnt,5);
                n_int = res(rescnt,6);
```

```
        % Afstanden gemmes
        afst_int(afvigcnt,1) = res(rescnt,3);
    else
        % Hvis tiderne ikke stemmer helt, skal der ...
            interpoleres et
        % punkt
        forskydning     = (gnss_sek(cnt) - we_sek(cnt1)) * ...
            100;     % Find tidsforskydningen
        forskel         = (we_sek(cnt1 + 1) - we_sek(cnt1)) ...
            * 100;  % Find tidsforskellen (bør være 5/100 sek)

        e_int = (res(rescnt+1,5) - res(rescnt,5)) * ...
            (forskydning / forskel) + res(rescnt,5); % ...
            Interpoleret E-koordinat
        n_int = (res(rescnt+1,6) - res(rescnt,6)) * ...
            (forskydning / forskel) + res(rescnt,6); % ...
            Interpoleret N-koordinat

        % Afstanden skal interpoleres
        afst_int(afvigcnt,1) = res(rescnt,3) + ...
            ((res(rescnt+1,3) - res(rescnt,3)) * ...
            (forskydning / forskel));
    end
    %% Koordinat afvigelsen beregnes og gemmes
    kooafvigelse(afvigcnt,1) = sqrt(((gnss_e(cnt) - ...
        e_int)^2) + (gnss_n(cnt) - n_int)^2);

    % De beregnede WE koordinater gemmes til plot
    eintplot(afvigcnt,1) = e_int;
    nintplot(afvigcnt,1) = n_int;
```

Herefter beregnes retningsafvigelsen. Hvis det er første match i tid, hentes retning fra resultatfilen (da denne er beregnet som startværdi). Efterfølgende beregnes retningsafvigelserne ved først at bestemme retningen fra forrige til nuværende interpolerede WE-koordinat og herefter fra forrige GNSS-position til nuværende GNSS-position og trække disse to fra hinanden for at bestemme afvigelsen.

```
    %% Så beregnes retningsafvigelsen som kun kan bestemmes ...
        fra 2. GNSS punkt og frem (da der regnes bagud)
    if afvigcnt == 1
        % Hvis det er første gang de stemmer overens, er ...
            værdierne
        % bare start værdierne
        we_retning(afvigcnt,1)   = res(1,7);
        gnss_retning(afvigcnt,1) = res(1,7);

        ret_afvig(afvigcnt,1) = 0;
    else
        % Først bestemmes retningen mellem forrige og ...
```

```
                    nuværende WE
                % punkt
                we_retning(afvigcnt,1)    = atan2(n_int - ...
                    nintplot(afvigcnt-1,1),e_int - ...
                    eintplot(afvigcnt-1,1));
                % Så bestemmes retning mellem forrige og nuværende ...
                    GNSS punkt
                gnss_retning(afvigcnt,1) = atan2(gnss_n(cnt) - ...
                    gnss_n(cnt-1),gnss_e(cnt) - gnss_e(cnt-1));

                % Så kan retningsafvigelsen beregnes
                ret_afvig(afvigcnt,1) = gnss_retning(afvigcnt,1) - ...
                    we_retning(afvigcnt,1);
                ret_afvig_grad(afvigcnt,1) = ret_afvig(afvigcnt,1) ...
                    * (180/pi);
            end
            % Afvigelses counteren
            afvigcnt = afvigcnt + 1;
        end

    end
    cnt = cnt + 1;
end
```

Slutteligt gemmes resultaterne i en resultatfil og plottes.

```
%% Opret fil til resultater af test
testrestmp  = sprintf('%s_TEST.res',filtmp);
testres_fil = fopen(testrestmp,'w');

fprintf(testres_fil,'Afvigelse efter       Retningsafvigelse        ...
    2D afvigelse             Afstand\r\n');
fprintf(testres_fil,'     sek                    grader ...
                    m                      m\r\n');
for cnt5 = 1:length(ret_afvig_grad)
    fprintf(testres_fil,'%7.0f               %13.4f          %13.4f ...
                    ...
        %13.4f\r\n',cnt5,ret_afvig_grad(cnt5),kooafvigelse(cnt5), ...
        afst_int(cnt5));
end

figure
plot(afst_int,kooafvigelse)
title('2D koordinat afvigelse');
xlabel('Afstand (m)')
ylabel('Afvigelse (m)')

plotnavn = sprintf('%s_2DAFV.png',filtmp);
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r300');
```

```
figure
plot(afst_int(6:end-5,1),ret_afvig_grad(6:end-5,1))
title('Retnings afvigelse');
xlabel('Afstand (m)')
ylabel('Afvigelse (grader)')

plotnavn = sprintf('%s_RETAFV.png',filtmp);
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r300');
%% Luk ting og ryd op
fclose all;
```

E.6 topcon_test.m

Dette appendiks beskriver MATLAB-scriptet *topcon_test.m*, som er blevet udarbejdet og anvendt at beregne 2D-koordinatafvigelser i forbindelse med test af WE'ernes indflydelse på positionering af TOPCON's system i Del II. Scriptet er at finde på Bilags CD'en.

Der er på forhånd udregnet faste værdier for vinkler og afstande fra de to Leica GNSS-modtagere til TOPCON referencepunktet. Disse angives som faste værdier. Der er konstateret 15 sekunders forskydning mellem Leica tiderne og TOPCON tiderne, hvorfor der korrigeres for denne.

```
%% Forud beregnede værdier:
vinkel_Vtop  = 1.065866700024003; % Vinkel mellem retning mod leica ...
    19 og retning mod topcon fra leica 13 (venstre GNSS)
dist_Vtop = 1.5311;               % Afstand mellem leica 13 og topcon
vinkel_Htop  = 1.242379771484011; % Vinkel mellem retning mod leica ...
    19 og retning mod topcon fra leica 19 (højre GNSS)
dist_Htop = 1.4157;               % Afstand mellem leica 19 og topcon


gnsstfor = 15; % Tidsforskydning på GNSS tid
```

Der indlæses data ved at konstatere hvilke filer der er tilstede i mappen, hvorfra der skal foretages beregning. Herefter køres der en beregningsgang for hvert sæt af filer. Det er vigtigt at filerne sætvis er navngivet ens og med de rigtige endelser. Det første der gøres i løkken er at rydde alle variable, undtagen de faste værdier som ønskes anvendt i alle løkker.

```
%% Indlæs data
% OBS: Der læses i mappen, og der skal være matchende filer (nummeret
% fortløbende skal de passe sammen
```

```
% Leica rtk filer fra de to GNSS modtagere skal hedde .g## (Til ...
    disse test
% .g13 og .g19
leicaV_filer = ls('*.g13');
leicaH_filer = ls('*.g19');

% Topcon filer skal hedde .top
top_filer    = ls('*.top');

%% Kør en gang per filsæt
for maincnt = 1:size(top_filer,1)
    close all
    clearvars -except top_filer leicaV_filer leicaH_filer maincnt ...
        vinkel_Vtop dist_Vtop vinkel_Htop dist_Htop gnsstfor
```

Først indlæses og behandles filerne fra Leica GNSS-modtagerne. Der beregnes en spredning på det enkelte punkt ud fra de i GNSS-filerne angivne værdier for sigma E og N. Tiden behandles og omregnes til hele sekunder for at undgå fejl ved sammenholdelse af tider. Nedenfor beskrives hvorledes venstre GNSS behandles, da højre behandles på samme måde og vises denne ikke.

```
    %% Leica filer indlæses og behandles
    % Først Venstre side
    gnssV_filnavn = sprintf('%s',leicaV_filer(maincnt,:));
    gnssV_fil     = fopen(gnssV_filnavn);
    gnssV_data    = textscan(gnssV_fil,'%s %f %f %f %f %f %f %f %f ...
        %f %s %s %s %s','delimiter',',','HeaderLines',7);
    % Data er nu et cell array med de forskellige søjler fra filen. ...
        Disse skal
    % konverteres til matrix (cell2mat) og skrives i hver deres vektor.
    gnssV_e    = cell2mat(gnssV_data(:,2)); % GNSS easting koordinat
    gnssV_n    = cell2mat(gnssV_data(:,3)); % GNSS northing koordinat
    gnssV_h    = cell2mat(gnssV_data(:,4)); % GNSS højde
    gnssV_dato = gnssV_data(:,14);          % GNSS dato
    % Sigma e, n og h
    gnssV_sig_e = cell2mat(gnssV_data(:,5));
    gnssV_sig_n = cell2mat(gnssV_data(:,6));
    gnssV_sig_h = cell2mat(gnssV_data(:,7));
    % Beregn sigma 2d
    gnssV_sig2d = sqrt(((gnssV_sig_e.^2 + gnssV_sig_n.^2))/2);

    % GNSS Dato: Her skal alene tiden udtrækkes fra GNSS datoen
    gnssV_tid = zeros(length(gnssV_dato{1,1}),1); % Klargør vektor ...
        til tid
    gnssV_sek = zeros(length(gnssV_dato{1,1}),1); % Klargør vektor ...
        til sek

    for cnt1 = 1:length(gnssV_dato{1,1})
        temptidstr    = ...
```

```
            sprintf('%s',gnssV_dato{1,1}{cnt1}(12:13),gnssV_dato{1,1} ...
            ... {cnt1}(15:16),gnssV_dato{1,1}{cnt1}(18:19));
        gnssV_tid(cnt1) = str2double(temptidstr);
        tempgnsstim   = sprintf('%s',gnssV_dato{1,1}{cnt1}(12:13));
        gnssV_sek(cnt1) = str2double(tempgnsstim) * 3600;
        tempgnssmin   = sprintf('%s',gnssV_dato{1,1}{cnt1}(15:16));
        gnssV_sek(cnt1) = gnssV_sek(cnt1) + str2double(tempgnssmin) ...
            * 60;
        tempgnsssek   = sprintf('%s',gnssV_dato{1,1}{cnt1}(18:19));
        gnssV_sek(cnt1) = gnssV_sek(cnt1) + str2double(tempgnsssek) ...
            + gnsstfor;
    end
```

Herefter indlæses TOPCON-filen og denne behandles. Tiden i TOPCON-filen er angivet i GPS-tid, hvorfor denne omregnes til henholdsvis time, minut og sekund, samt hele tiden i sekunder. Dette gøres ved hjælp af dele, taget fra Peter Cederholms script *sowinv.m*.

```
%% Topcon filer indlæses og behandles
    top_filnavn = sprintf('%s',top_filer(maincnt,:));
    top_fil     = load(top_filnavn); % Sølje 1 er GPS tid, 2 er ...
        Easting, 3 er Northing og 4 er højde
    % Topcon data stilles i enkelte vektorer
    top_gpstid  = top_fil(:,1); % GPS tid
    top_e       = top_fil(:,2); % Easting
    top_n       = top_fil(:,3); % Northing
    top_h       = top_fil(:,4); % Højde

    % Topcon GPS tid omregnes til samme tidsformat som Leica
    % Dele heraf er taget fra Peter Cederholmds sowinv.m script

    % Der forberedes vektorer til at gemme tiderne i
    top_tid = zeros(length(top_gpstid),1);
    top_sek = zeros(length(top_gpstid),1);

    for cnt_toptid = 1:length(top_gpstid)
        % Data hentes fra top_gpstid
        gpstime = top_gpstid(cnt_toptid);

        % Først beregnes antal uger siden gps start
        week = floor(gpstime/60/60/24/7);

        % Så skal seconds of week beregnes
        sow = gpstime - week*60*60*24*7;

        % Juliansk dato for starttidspunkt af GPS tid (6. januar 1980)
        GPS = 2444244.5;

        % Juliansk dato for epoke
```

```
        JD = GPS+7*week+sow/86400;

        % Hjælpestørrelser
        a = fix(JD+0.5);
        b = a+1537;
        c = fix((b-122.1)/365.25);
        d = fix(365.25*c);
        e = fix((b-d)/30.6001);

        % Måned
        month = e-1-12*fix(e/14);

        % Dag
        day = b-d-fix(30.6001*e);

        % År
        year = c-4715-fix((7+month)/10);

        % Time
        JD = JD+0.5;
        temp = ((JD)-floor(JD))*24; % Decimal time
        hour = floor(temp);

        % Minut
        temp = (temp-hour)*60; % Decimal minut
        min = floor(temp);

        % Sekund
        sec = (temp-min)*60;

        % Toptid gemmes
        top_tid(cnt_toptid,1) = (hour * 10000) + (min * 100) + sec;

        % Top sekund beregns
        top_sek(cnt_toptid,1) = (hour * 3600) + (min * 60) + sec;
    end
```

Derefter skal Leica$_{ref}$ beregnes ud fra Leica positioner, for at kunne sammenligne det indlæste TOPCON referencepunkts position direkte med de positioner Leica GNSS-modtagerne har optaget. Leica$_{ref}$ beregnes fra den GNSS-modtager som i epoken har haft den mindste sigma-spredning i 2D. For at sikre at det er sammen epoke, sammenholdes tiderne fra Leica GNSS-modtagerne.

```
%% Beregn Topcon positioner ud fra leica positioner
    gemcnt = 1;
    for cnt = 1:length(gnssV_sek)
        for cnt1 = 1:length(gnssH_sek)
            if gnssV_sek(cnt) - gnssH_sek(cnt1) == 0;
                if gnssV_sig2d(cnt) - gnssH_sig2d(cnt1) < 0
```

```
        % Hvis sigma2d for venstre gnss minus sigma2d ...
            for højre gnss
        % er mindre end 0 (negativ) er Venstre gnss ...
            bedst i epoken

        % Beregn retning fra V til H i epoken
        ret_epoke(gemcnt,1) = atan2(gnssH_n(cnt1) - ...
            gnssV_n(cnt),gnssH_e(cnt1) - gnssV_e(cnt));

        % Beregn topcon punktet i epoken ud fra leica gnss
        leica_top_e(gemcnt,1) = gnssV_e(cnt) + ...
            dist_Vtop * cos(ret_epoke(gemcnt) + ...
            vinkel_Vtop);
        leica_top_n(gemcnt,1) = gnssV_n(cnt) + ...
            dist_Vtop * sin(ret_epoke(gemcnt) + ...
            vinkel_Vtop);

        % Sprednings beregning
        leica_top_sig2d(gemcnt,1) = ...
            sqrt(((gnssV_sig2d(cnt)^2 + ...
            gnssH_sig2d(cnt1)^2)) / 2);

    else % Hvis tallet er positivt er højre gnss bedst ...
        i epoken
        % Beregn retning fra V til H i epoken
        ret_epoke(gemcnt,1) = atan2(gnssV_n(cnt) - ...
            gnssH_n(cnt1),gnssV_e(cnt) - gnssH_e(cnt1));

        % Beregn topcon punktet i epoken ud fra leica gnss
        leica_top_e(gemcnt,1) = gnssH_e(cnt1) + ...
            dist_Htop * cos(ret_epoke(gemcnt) - ...
            vinkel_Htop);
        leica_top_n(gemcnt,1) = gnssH_n(cnt1) + ...
            dist_Htop * sin(ret_epoke(gemcnt) - ...
            vinkel_Htop);

        % Sprednings beregning
        leica_top_sig2d(gemcnt,1) = ...
            sqrt(((gnssV_sig2d(cnt)^2 + ...
            gnssH_sig2d(cnt1)^2)) / 2);
    end
    leica_top_sek(gemcnt,1) = gnssV_sek(cnt);

    afst_epoke(gemcnt,1) = sqrt(((gnssH_e(cnt1) - ...
        gnssV_e(cnt))^2) + ((gnssH_n(cnt1) - ...
        gnssV_n(cnt))^2));

    if gemcnt == 1;
        leica_top_afst(gemcnt,1) = 0;
    else
        leica_top_afst(gemcnt,1) = ...
```

```
                    leica_top_afst(gemcnt-1,1) + ...
                    sqrt(((leica_top_e(gemcnt,1) - ...
                    leica_top_e(gemcnt-1,1))^2) + ...
                    ((leica_top_n(gemcnt,1) - ...
                    leica_top_n(gemcnt-1,1))^2));
                end

                % Gem counteren sættes op med 1
                gemcnt = gemcnt + 1;
            end
        end
    end
```

Herefter skal der foretages beregning af afvigelsen mellem det beregnede referencepunkt Leica$_{ref}$ og det indlæste TOPCON referencepunkt. For at sikre det bedst mulige grundlag for afvigelsesberegningen findes det indlæste TOPCON referencepunkt, som passer bedst i tid med Leica$_{ref}$. Dette gøres ved at bestemme det første punkt i de indlæste punkter, der stemmer tidsmæssigt med Leica$_{ref}$ indenfor 0.02 sekunder. Hvis tiden stemmer helt overens beregnes afvigelsen direkte, hvis dette derimod ikke er tilfældet interpoleres et punkt mellem det indlæste TOPCON referencepunkt og det næste. Hvis det næste TOPCON referencepunkt ligeledes stemmer overens i tid indenfor 0.02 sekunder af Leica$_{ref}$, overskrives det sidste beregnede punkt således det punkt tættest på Leica$_{ref}$ rent tidsmæssigt anvendes.

```
%% Beregn 2d afvigelser mellem de fra leica beregnede topcon ...
   positioner og positioner beregnet i geoclean
gemcnt = 1;

for cnt = 1:length(leica_top_e)
    for cnt1 = 1:length(top_sek)
        if -0.021 ≤ leica_top_sek(cnt) - top_sek(cnt1) && ...
            leica_top_sek(cnt) - top_sek(cnt1) ≤ 0.00001
            if leica_top_sig2d(cnt) ≥ 10 % Hvis den beregnede ...
                spredning er større end 10 meter stoppes der
                break
            else
                if gemcnt == 1
                    forskydning = (leica_top_sek(cnt) - ...
                        top_sek(cnt1)) * 100; % Find ...
                        tidsforskydningen
                    forskel     = (top_sek(cnt1 + 1) - ...
                        top_sek(cnt1)) * 100;  % Find ...
                        tidsforskellen (bør være 5/100 sek)

                    e_int = (top_e(cnt1+1,1) - top_e(cnt1,1)) * ...
                        (forskydning / forskel) + top_e(cnt1,1); ...
                        % Interpoleret E-koordinat
```

```
            n_int = (top_n(cnt1+1,1) - top_n(cnt1,1)) * ...
                (forskydning / forskel) + top_n(cnt1,1); ...
                % Interpoleret N-koordinat

            kooafvig(gemcnt,1) = sqrt((leica_top_e(cnt) ...
                - e_int)^2 + (leica_top_n(cnt) - n_int)^2);

            counter(gemcnt,1) = cnt;
            counter(gemcnt,2) = cnt1;

            % De beregnede WE koordinater gemmes til plot
            eintplot(gemcnt,1) = e_int;
            nintplot(gemcnt,1) = n_int;

            % Afstanden sættes til 0
            afstplot(gemcnt,1) = leica_top_afst(cnt);

            % Spredning fra leica_top_sigma2d gemmes ...
                til plotning
            ber_top_s2d(gemcnt,1) = leica_top_sig2d(cnt);

            % Normaliseret afvigelse i forhold til
            % spredning
            normafvig(gemcnt,1) = kooafvig(gemcnt,1) / ...
                leica_top_sig2d(cnt);

            % Gem counteren sættes op med 1
            gemcnt = gemcnt + 1;

        else
            if cnt == counter(gemcnt-1,1)
                forskydning = (leica_top_sek(cnt) - ...
                    top_sek(cnt1)) * 100; % Find ...
                    tidsforskydningen
                forskel     = (top_sek(cnt1 + 1) - ...
                    top_sek(cnt1)) * 100;  % Find ...
                    tidsforskellen (bør være 5/100 sek)

                e_int = (top_e(cnt1+1,1) - ...
                    top_e(cnt1,1)) * (forskydning / ...
                    forskel) + top_e(cnt1,1); % ...
                    Interpoleret E-koordinat
                n_int = (top_n(cnt1+1,1) - ...
                    top_n(cnt1,1)) * (forskydning / ...
                    forskel) + top_n(cnt1,1); % ...
                    Interpoleret N-koordinat

                kooafvig(gemcnt-1,1) = ...
                    sqrt((leica_top_e(cnt) - e_int)^2 + ...
                    (leica_top_n(cnt) - n_int)^2);
```

```
            counter(gemcnt-1,2) = cnt1;

            % De beregnede TOPCON koordinater ...
                gemmes til plot
            eintplot(gemcnt-1,1) = e_int;
            nintplot(gemcnt-1,1) = n_int;

            % Afstand gemmes
            afstplot(gemcnt-1,1) = leica_top_afst(cnt);

            % Spredning fra leica_top_sigma2d ...
                gemmes til plotning
            ber_top_s2d(gemcnt-1,1) = ...
                leica_top_sig2d(cnt);

            % Normaliseret afvigelse i forhold til
            % spredning
            normafvig(gemcnt-1,1) = ...
                kooafvig(gemcnt-1,1) / ...
                leica_top_sig2d(cnt);

        else
            forskydning = (leica_top_sek(cnt) - ...
                top_sek(cnt1)) * 100; % Find ...
                tidsforskydningen
            forskel     = (top_sek(cnt1 + 1) - ...
                top_sek(cnt1)) * 100;  % Find ...
                tidsforskellen (bør være 5/100 sek)

            e_int = (top_e(cnt1+1,1) - ...
                top_e(cnt1,1)) * (forskydning / ...
                forskel) + top_e(cnt1,1); % ...
                Interpoleret E-koordinat
            n_int = (top_n(cnt1+1,1) - ...
                top_n(cnt1,1)) * (forskydning / ...
                forskel) + top_n(cnt1,1); % ...
                Interpoleret N-koordinat

            kooafvig(gemcnt,1) = ...
                sqrt((leica_top_e(cnt) - e_int)^2 + ...
                (leica_top_n(cnt) - n_int)^2);

            counter(gemcnt,1) = cnt;
            counter(gemcnt,2) = cnt1;

            % De beregnede TOPCON koordinater ...
                gemmes til plot
            eintplot(gemcnt,1) = e_int;
            nintplot(gemcnt,1) = n_int;

            % Afstand gemmes til plot
```

```
                        afstplot(gemcnt,1) = leica_top_afst(cnt);

                        % Spredning fra leica_top_sigma2d ...
                            gemmes til plotning
                        ber_top_s2d(gemcnt,1) = ...
                            leica_top_sig2d(cnt);

                        % Normaliseret afvigelse i forhold til
                        % spredning
                        normafvig(gemcnt,1) = ...
                            kooafvig(gemcnt,1) / ...
                            leica_top_sig2d(cnt);

                        % Gem counteren sættes op med 1
                        gemcnt = gemcnt + 1;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

Slutteligt plottes de forskellige resultater og MATLAB workspacet med alle variable gemmes til senere behandling inden næste løkke, og dermed sæt af filer, beregnes.

```
%% Plot resultater

% Plot af positioner
plot(top_e,top_n) % Topcon positioner
axis equal
hold on
plot(leica_top_e,leica_top_n,'*r') % Positioner beregnet fra GNSS
plot(eintplot,nintplot,'*g') % Interpolerede topcon positioner

title('Plot af positioner');
xlabel('Easting (m)')
ylabel('Northing (m)')
hleg1 = legend('TOPCON pos','GNSS beregnet pos','Interpoleret ...
    TOPCON pos');
set(hleg1,'Location','Best');

plotnavn = sprintf('%s_pos.png',top_filer(maincnt,1:end-4));
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r400');

% Plot af koordinat afvigelser i forhold til tid
figure
plot(kooafvig)
title('Plot af koordinatafvigelser');
xlabel('Tid (s)')
```

```
ylabel('Afvigelse (m)')

plotnavn = ...
    sprintf('%s_kooafvigtid.png',top_filer(maincnt,1:end-4));
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r400');

% Plot af spredning for positioner beregnet fra GNSS i forhold ...
    til tid
figure
plot(leica_top_sig2d)
title('Plot af spredning på position beregnet fra GNSS');
xlabel('Tid (s)')
ylabel('Spredning (m)')

plotnavn = sprintf('%s_sigma2dtid.png',top_filer(maincnt,1:end-4));
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r400');

% Plot af koordinat afvigelser i forhold til afstand
figure
plot(afstplot,kooafvig)
title('Plot af koordinatafvigelser');
xlabel('Afstand (m)')
ylabel('Afvigelse (m)')

plotnavn = ...
    sprintf('%s_kooafvigafst.png',top_filer(maincnt,1:end-4));
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r400');

plotnavn = ...
    sprintf('%s_kooafvigafst.fig',top_filer(maincnt,1:end-4));
saveas(gcf,plotnavn);

% Plot af spredning for positioner beregnet fra GNSS i forhold til
% afstand
figure
plot(afstplot,ber_top_s2d)
title('Plot af spredning på position beregnet fra GNSS');
xlabel('Afstand (m)')
ylabel('Spredning (m)')

plotnavn = ...
    sprintf('%s_sigma2dafst.png',top_filer(maincnt,1:end-4));
print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r400');

plotnavn = ...
    sprintf('%s_sigma2dafst.fig',top_filer(maincnt,1:end-4));
saveas(gcf,plotnavn);

% Plot af normaliseret afvigelse i forhold til spredning, over ...
    afstand
figure
```

```
    plot(afstplot,normafvig)
    title('Plot af normaliseret koordinatafvigelse i forhold til ...
        afstand');
    xlabel('Afstand (m)')
    ylabel('Normaliseret afvigelse')

    plotnavn = sprintf('%s_normafvig.png',top_filer(maincnt,1:end-4));
    print(gcf,plotnavn,'-dpng','-r400');

    plotnavn = sprintf('%s_normafvig.fig',top_filer(maincnt,1:end-4));
    saveas(gcf,plotnavn);

    %% Gem workspace

    workspacenavn = ...
        sprintf('%s_workspace.mat',top_filer(maincnt,1:end-4));
    save(workspacenavn)
end
```

Efter endt beregning af alle sæt filer i mappen ryddes der op og åbne filer lukkes.

Resultatfiler F

Dette appendiks indeholder resultatfiler fra de forskellige beregninger foretager med MATLAB-scripts.

F.1 Kalibrering af hjulomkreds

Dette afsnit indeholder resultatfiler fra kalibrering af hjulomkreds.

F.1.1 20120409 med totalstation

```
Resultat for beregning af hjulomkreds
Venstre:          2.0422 m
Højre:            2.0389 m

Værdier for venstre hjul:
Målte afstand    Antal ticks    Beregnet omkreds    Residual
     (m)                             (m)
    94.9867         465230           2.0417          0.0005
   102.0280         499549           2.0424         -0.0002
    95.7482         468899           2.0420          0.0002
   102.9471         503990           2.0426         -0.0005
    97.3842         476862           2.0422         -0.0000
Spredning på residualerne:                           0.00036

Værdier for højre hjul:
Målte afstand    Antal ticks    Beregnet omkreds    Residual
     (m)                             (m)
    94.9996         465788           2.0395         -0.0006
   102.0509         500566           2.0387          0.0002
    95.7641         469645           2.0391         -0.0001
   102.9630         505144           2.0383          0.0007
    97.3882         477602           2.0391         -0.0002
Spredning på residualerne:                           0.00047
```

F.1.2 20120502 med GNSS

```
Resultat for beregning af hjulomkreds
Venstre:          2.0417 m
Højre:            2.0370 m

Værdier for venstre hjul:
Målte afstand     Antal ticks     Beregnet omkreds     Residual
     (m)                               (m)
  1116.9927        5479806             2.0384           0.0033
  1177.8486        5764359             2.0433          -0.0016
  1159.2946        5673509             2.0433          -0.0017
Spredning på residualerne:                             0.00286

Værdier for højre hjul:
Målte afstand     Antal ticks     Beregnet omkreds     Residual
     (m)                               (m)
  1116.9927        5492402             2.0337           0.0033
  1177.8486        5777714             2.0386          -0.0016
  1159.2946        5686117             2.0388          -0.0018
Spredning på residualerne:                             0.00289
```

F.1.3 20120507 med GNSS

```
Resultat for beregning af hjulomkreds
Venstre:          2.0409 m
Højre:            2.0362 m

Værdier for venstre hjul:
Målte afstand     Antal ticks     Beregnet omkreds     Residual
     (m)                               (m)
  1193.7507        5849674             2.0407           0.0002
  1198.3695        5870192             2.0414          -0.0006
  1193.8708        5848856             2.0412          -0.0003
  1198.3758        5873901             2.0402           0.0007
Spredning på residualerne:                             0.00057

Værdier for højre hjul:
Målte afstand     Antal ticks     Beregnet omkreds     Residual
     (m)                               (m)
  1193.7507        5862349             2.0363          -0.0001
  1198.3695        5884764             2.0364          -0.0002
  1193.8708        5861811             2.0367          -0.0005
  1198.3758        5887559             2.0354           0.0008
Spredning på residualerne:                             0.00054
```

F.2 Kalibrering af hjulafstand

Dette afsnit inderholder resultatfiler fra kalibrering af hjulafstand.

F.2.1 20120409

```
Resultat for beregning af hjulafstand
Hjulafstand:         1.5802 m        (Anvendt start værdi:  1.574 m)

Værdier for de enkelte testkørsler:
Nummer    GNSS radius    WE radius     Radius forhold    Hjulafstand
              (m)           (m)                             (m)
 1          12.8526       12.8185         1.00265           1.5782
 2          12.8512       12.7974         1.00421           1.5806
 3          12.8377       12.7836         1.00423           1.5807
 4          12.8425       12.7875         1.00430           1.5808
 5          12.8396       12.7966         1.00336           1.5793
 6          12.8446       12.7866         1.00454           1.5811
 7          12.8466       12.7896         1.00446           1.5810
 8          12.8492       12.7957         1.00418           1.5806
 9          12.8511       12.8154         1.00279           1.5784
10          12.8517       12.7894         1.00487           1.5817

Spredning:   0.0054        0.0119         0.00076           0.0012
```

F.2.2 20120502

```
Resultat for beregning af hjulafstand
Hjulafstand:         1.5788 m        (Anvendt start værdi:  1.574 m)

Værdier for de enkelte testkørsler:
Nummer    GNSS radius    WE radius     Radius forhold    Hjulafstand
              (m)           (m)                             (m)
 1           4.5218        4.4852         1.00816           1.5869
 2           4.5067        4.4749         1.00711           1.5852
 3           4.5701        4.5749         0.99896           1.5724
 4          13.4329       13.4378         0.99963           1.5734
 5          13.3392       13.3161         1.00173           1.5767
 6          13.2382       13.2050         1.00251           1.5780

Spredning:   4.8225        4.8250         0.00382           0.0060
```

F.2.3 20120507

```
Resultat for beregning af hjulafstand
Hjulafstand:          1.5862 m        (Anvendt start værdi:  1.574 m)

Værdier for de enkelte testkørsler:
Nummer    GNSS radius    WE radius     Radius forhold    Hjulafstand
              (m)           (m)                             (m)
 1           9.3030        9.2220         1.00878           1.5878
 2           9.2121        9.1494         1.00685           1.5848
 3           9.1243        9.0335         1.01005           1.5898
 4           8.8632        8.8133         1.00565           1.5829
 5           8.7810        8.7119         1.00793           1.5865
 6           8.6515        8.5888         1.00731           1.5855

Spredning:   0.2606        0.2534         0.00154           0.0024
```