



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi

Kinematisk kartlegging og posisjonering av jernbane ved bruk av en enkel måletralle

Kinematic mapping and positioning of railroad using
a simple trolley

Kjetil Hatlen
Geomatikk

Sammendrag

Oppgaven hovedformål er å undersøke om en enkelt måletralle i form av et mini mobile mapping system vil klare å tilfredsstille Bane NOR sine nøyaktighetskrav for kartlegging av jernbane.

Resultatene vil være basert på innsamlede data ved bruk av en målesekk på Kongsvingerbanen. I tillegg er det brukt et ekstra datasettet, samlet inn av TerraTec sitt Lynx Mobile Mapper system. Datasettet fra Lynx er bruk til å undersøke effekten av de nye satellittsystemene Galileo og BeiDou, i håp om å underbygge resultatene fra målesekken.

Resultatene vise at datasettet fra målesekken ikke tilfredsstiller kravene til Bane NOR. Mye tyder likevel på at under de rette forutsetningen og rette utstyret vil dette endre seg. Metoden antas derfor å ha et stort potensiale.

Abstract

The main purpose for this master thesis is to investigate whether or not a single trolley, in the form of a mini mobile mapping system, will be able to satisfy the requirements for railroad mapping set by Bane NOR.

The results will be based on collected data using a backpack with built in sensors' on Kongsvingerbanen. An additional data set collected by TerraTec's Lynx Mobile Mapper system will also be used. The data set from Lynx is used to investigate the effect of the new satellite systems Galileo and BeiDou, hoping to support the results from the built-in backpack.

The results show that the data set from the built-in backpack does not meet the requirements set by Bane NOR. However, much suggests that under the right circumstances, and using the right equipment, this will change. The method is therefore assumed to have a great potential.

Forord

Denne oppgaven symboliserer en avslutning på min 5-årige mastergrad i geomatikk ved Norges Miljø- og Biovitenskaplige universitet (NMBU). Oppgaven er skrevet i samarbeid med TerraTec AS, våren 2018 og tilsvarer 30 studiepoeng.

Jeg vil takke min veileder Narve Schipper Kjørsvik ved TerraTec AS for hjelp med oppgaven. Døren til kontoret sto alltid åpen, og jeg hadde ikke kommet i mål med oppgaven uten hans kunnskap og veiledning

Jeg vil også rette en stor takk til mine venner, familie og studiekamerater for all motivasjon, og støtte gjennom hele studieløpet. En ekstra stor takk til min samboer Kathrine Tanbjør som har holdt ut med meg i alle lange, og tunge dager dette siste halvåret.

Til slutt vil jeg rette en spesiell takk til min far, Lars Olav Hatlen. Han har hjulpet meg gjennom disse fem årene med faglig innput, praksis, diskusjon og støtte. Jeg hadde ikke vært der jeg er i dag uten innspill fra han. Denne oppgave er derfor dedikert til han.



Innhold

Sammendrag	iii
Abstract	vii
Forord	ix
1 Introduksjon og problemdefinisjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemdefinisjon	3
2 Dagens metode	7
2.1 Jernbanesporets beliggenhet	7
2.2 Dagens metoder	8
2.2.1 Sporbukk	8
2.2.2 Roger 1000	10
2.2.3 Testprosjekt med GNSS og CPOS	12
3 Navigasjonssystemer	15
3.1 Introduksjon	15
3.2 Referanserammer	16
3.2.1 Inertiell referanseramme: i-frame	16
3.2.2 Jordas referanseramme (ECEF): e-frame	16
3.2.3 Lokalt geografisk referanseramme (NED): g-frame	17
3.2.4 Kjøretøyets referanseramme: b-frame	18
3.2.5 s-frame: Sensorens referanseramme	18
3.3 Satellittnavigasjon: GNSS	19
3.3.1 Observasjonsmetoder	19
3.3.2 Observasjonsligninger	22
3.4 Treghetsnavigasjon: INS	23
3.4.1 Gyroskop	25
3.4.2 Akselerometer	27

3.5	Navigasjonsligninger	31
3.5.1	Navigasjonsligninger i e-frame	31
3.6	Treghetsnavigasjon med støttesensorer	34
3.7	Kalmanfilter	36
3.7.1	Linealiserte feilligninger	42
4	Laserskanning	45
4.1	Introduksjon	45
4.2	Prinsippet bak laserskanning	46
4.2.1	Time-of-flight målinger	46
4.2.2	Trianguleringsbasert måling	48
4.2.3	Stasjonær skanmatching	49
4.2.4	Kinematisk skanmatching	49
5	Utstyr og Metode	51
5.1	Introduksjon	51
5.2	Sensorer som ble brukt	51
5.2.1	GNSS	52
5.2.2	INS	52
5.2.3	Laserskanner - VLP-16	53
5.2.4	Målesekk	54
5.3	Datainnsamling og feltarbeid	55
5.3.1	Ekstra datasett fra Lynx Mobile Mapper	55
5.3.2	Feltarbeid	57
6	Resultater	61
6.1	Introduksjon	61
6.2	Nye satellittsystem	62
6.2.1	Lynx Mobile Mapper	64
6.2.2	Målesekk	74
6.2.3	Vurdering av resultatet	81
6.3	Tids- og økonomiske påvirkninger	82
6.3.1	Tidspåvirkning	82
6.3.2	Økonomiske påvirkninger	84
6.4	Rollen til måletrallen	86
6.4.1	Sporbukk	86
6.4.2	Roger 1000	86
6.4.3	Måletrallen	86
6.4.4	Vurdering	87
6.5	Systemets nøyaktighet	88
6.5.1	Absolutt posisjonering	88

6.5.2	Relativ posisjonering	91
6.5.3	Feilbudsjett	94
6.5.4	Vurdering av systemets nøyaktighet	97
7	Konklusjon	99
7.1	Konklusjon	99
7.2	Veidere arbeid	100
	Bibliografi	103

Figurer

2.2.1	Sporbukk	10
2.2.2	Roger 1000	12
3.2.1	Inertiell referanseramme: i-frame	16
3.2.2	Jordas referanseramme: e-frame	17
3.2.3	Lokal geografisk referanseramme: g-frame	17
3.2.4	Kjøretøyets referanseramme: b-frame	18
3.3.1	Basic konsept for DGNSS	21
3.3.2	Multipath	21
3.4.1	Gimbalmontering	24
3.4.2	Integrasjon av gimbal observasjoner	24
3.4.3	Integrasjon av strapdown observasjoner	25
3.4.4	Ulike typer gyroskoper	27
3.4.5	Ulike typer akselerometer	29
3.7.1	Flytdiagram for integrasjon av treghetsnavigasjon med andre sensorer, som f.eks. GNSS	37
4.2.1	Flere returer fra en laserskanning	47
4.2.2	Footprint til en laserskanner	47
4.2.3	Puls og returavstand	48
4.2.4	Enkelpunkts triangulering	49
5.2.1	Septentrio PolaNt-x	52
5.2.2	Applanix APX-15 UAV GNSS Inertial System	53
5.2.3	Velodyne LiDAR PUCK VLP-16	54
5.2.4	Målesekk med de fastmonterte sensorene	55
5.3.1	Optech Lynx Mobile Mapper SG1	57
5.3.2	Oversikt over kartlagt strekning med målesekk	58
5.3.3	Rombel lastetraktor	59
6.2.1	Kartlagt strekning med Lynx Mobile Mapper & Målesekk	62
6.2.2	Frekvensdomenet tli GNSS	64

6.2.3 Lynx navigasjonsløsning GNSS	65
6.2.4 DGNSS løsning for Lynx datasettet med bruk av GPS, GLONASS, Galileo & BeiDou	66
6.2.5 Lynx posisjons nøyaktighet GNSS	67
6.2.6 Lynx posisjons nøyaktighet GLONASS	68
6.2.7 Antall satellitter GNSS	69
6.2.8 Antall satellitter GPS + GLONASS	70
6.2.9 Utvalgt dårlig del Lynx 13:15-13:30	70
6.2.10 Lynx navigasjonsløsning 13:15-13:30	71
6.2.11 Lynx DGNSS 13:15-13:30	72
6.2.12 Antall satellitter GLONASS, Lynx 13:15-13:30	73
6.2.13 Målesekk sin navigasjonsløsning GNSS	75
6.2.14 DGNSS Målesekk	75
6.2.15 Fix & Float ved bruk av GNSS og målesekk	76
6.2.16 Målesekk posisjonsnøyaktighet GNSS	77
6.2.17 Målesekk posisjonsnøyaktighet GNSS	77
6.2.18 Antall GLONASS satellitter ved bruk av målesekk	78
6.2.19 Fix & Float ved bruk av GLONASS og målesekk	79
6.2.20 Antall GLONASS & Galileo satellitter ved bruk av målesekk	80
6.5.1 Laserdata fra VLP-16 og Lynx	89
6.5.2 Langsgående høyre skinnestreng	90
6.5.3 Langsgående venstre skinnestreng	90
6.5.4 Sporvidden målt ved et landmålt kontrollpunkt	92
6.5.5 Sporvidden målt over en jernbanesville	93
6.5.6 Sporvidden målt 70m vest for kontrollpunkt	93

Kapittel 1

Introduksjon og problemdefinisjon

1.1 Bakgrunn

Kartlegging og posisjonering av eksisterende og nye jernbanespor spiller en viktig rolle for Bane NOR sin drift av jernbanen i Norge. Denne informasjonen brukes både til å kontrollere sporets beliggenhet og tilstand. I tillegg indikerer denne informasjonen hvor det er behov for vedlikehold. Pålitelige og oppdaterte opplysninger fra kartlegging og posisjonering vil være et godt grunnlag for drift og vedlikehold for Bane NOR.

Det å ha rett informasjon om skinnenes innbyrdes beliggenhet er derfor helt avgjørende. Denne informasjon får man ved at man måler skinnenes faktiske posisjon i forhold til Bane NOR sitt fastmerkenettverk. I tillegg måles den relative avstanden mellom skinnene. Denne avstanden kalles sporvidde og måles mellom skinnenes innerkant. I Norge skal denne avstanden være 1435 mm [BaneNor, 2017d, kap 3]. Sentersporet beregnes ut fra målt skinnebeliggenhet og disse beregningene brukes for å fastsette sporets faktiske beliggenhet.

I tillegg må man vite hvilken skinne som er referanseskinne. Kunnskap om referanseskinne er essensielt for lokomotivførerne for å vite hvilken skinne toget skal legge vekt på. Bane NOR har definert at strekninger sør for Trondheim har løpende kilometerstand ut fra Oslo S med to unntak. Hvor Østfoldbanen østre linje (Ski-Mysen-Sarpsborg) har nullpunkt på Ski stasjon og Alnabanen (Alnabru-Grefsen) har nullpunkt på Grefsen stasjon. Banene nord for Trondheim har nullpunkt ut fra Trondheim stasjon med unntak av Ofotbanen (Narvik-Riksgrensen) som har nullpunkt på Narvik Havn. Står man med nullpunktet i ryggen vil høyre skinne

dermed være på høyre hånd. Bane NOR sin standard sier da at når skinnene er parallelle vil det på rette strekninger og i venstrekurver være den høyre skinnen som er referanseskinnen. I høyrekurver blir dermed venstre skinne definert som referanseskinne. Dersom skinnene er korrekt plassert skal de være like høye. Ved ulik høyde defineres den laveste skinnen som referanseskinnen [BaneNOR, 2018].

Bakgrunnen for denne oppgave er å undersøke om det er mulig å utvikle en måletralle med ulike sensorer som kan erstatte dagens metode for kartlegging og posisjonering av jernbanesporet. Dagens metoder vurderes som både tungvinte og tidskrevende. Målet er at nye målemetoder med bruk av en ny måletralle vil vise seg å være både bedre arbeidsmessig og økonomisk enn metodene som brukes i dag. I tillegg kreves det at kvaliteten på måledataene må være innenfor Bane NOR sine gjeldene nøyaktighetskrav.

1.2 Problemdefinisjon

Bane NOR er avhengig av jevnlig kartlegging av eksisterende jernbanespor for å sikre forsvarlig drift og vedlikehold. Informasjonen denne kartleggingen gir brukes til å kontrollere tilstanden, beliggenheten og kvaliteten til sporet. Videre analyse forteller om man er nødt til å utføre tiltak på sporet for å sikre seg at de kan brukes forsvarlig.

På grunn av de store hastighetene togene holder blir hjulene påvirket av små ujevnheter og variasjoner i sporgeometrien. En dårlig beskrivelse av høyeste og laveste skinne kan føre til at toget legger vekt på feil skinne i kurver. I verste tilfelle kan dette føre til at toget sporer av. I tillegg vil forskjeller i skinnehøyden føre til at det er ubehagelig å sitte i toget, ved at man kan føle kast og rykk i selve togsettet.

Det stilles derfor ekstremt strenge krav til målemetode og målenøyaktighet for å bestemme beliggenheten til sporet. Målinger av dårlig kvalitet kan resultere i at man detekterer feil som ikke er der. Unøyaktigheter og feilmålinger medfører en unødvendig økonomisk utgift for Bane NOR. Verre er det dersom en med grunnlag i måleresultatene ikke oppdager de reelle feilene. Konsekvensene av dette kan være fare for store materielle skader på skinner og togsettet i tillegg til personsaker.

Dagens metode for kartlegging benytter i hovedsak en såkalt sporbukk (se delkapittel 2.2.1) og totalstasjon hvor man utnytter Bane NOR sitt fastmerkenett til å bestemme sporets faktiske beliggenhet i forhold til den teoretisk bestemte linjen. Sporets teoretiske beliggenhet bestemmes ut fra veldefinerte GVUL-punkter. GVUL er Bane NOR sitt eget fastmerkenett. Dette er fastsatt ved bruk av en kombinasjon av statistisk GNSS måling, polygondragsmålinger med totalstasjon samt nivellering [Statens Kartverk Geodesidivisjonen, 2009] og [BaneNor, 2017c, kap 4]. Ut ifra disse punktene bruker man en matematisk koordinatbestemt linjeberegning til å finne sporets teoretiske beliggenhet.

Målingene som er relatert til det fysiske sporet gir oss informasjon om sporets geometri. Målingene gjøres ved bruk av en sporbukk som er kalibrert mot skinnene. Den relative avstanden mellom sporene måles normalt hver 10 meter. Dette er svært tidskrevende ettersom sporbukken må horisonteres i hver oppstilling. En mulig effektivisering av denne måleprosessen er å bruke en laserskanner som er koblet sammen til plattformen som består av en eller to GNSS-mottakerer og et INS. Dette gjør at laserdataen blir direkte koblet sammen med GNSS observasjonene, og kan på denne måten relateres til det fysiske sporet. Fordelen med denne metoden er at målingene kan gjøres mens man er i bevegelse. Dette resultere i at måleprosessen blir mer effektiv. Ved etterprosessering i ulike software kan man da

beregne sporets geometri direkte fra laserdataene.

Bane NOR har i 2017 og 2018 utført et par testprosjekter hvor man brukes GNSS med støtte fra CPOS til denne kartleggingen. CPOS er en posisjonstjeneste levert fra Kartverket, som lar brukeren bestemme posisjonen med centimeters nøyaktighet [Kartverket, 2017a]. Forventningene er at denne metoden skal gi god absolutt posisjonering av sporbeliggenheten. Datainnsamlingen med denne metoden er tidskrevende da man må innom samme målepunkt flere ganger for å få flere uavhengige registreringer [Statens Kartverk Geodesidivisjonen, 2009].

En av hovedgrunnen til at kartlegging og posisjonering med GNSS ikke har blitt tatt i bruk av Bane NOR, er de strenge kravene til nøyaktighet og pålitelighet som er satt. Enkelpunktbestemmelse med RTK målinger ikke gir den nødvendige påliteligheten eller nøyaktigheten som kreves. Bane NOR sin standard er laget på en tid hvor man kun hadde tilgang til signal fra GPS og GLONASS. I nyere tid er systemene Galileo og BeiDou blitt operative. Muligheten for posisjonering med bruk av GNSS bør derfor vurderes på ny i lys av denne utviklingen med flere systemer som gir oss bedre geometri og nøyaktighet.

Dårlig eller ingen GNSS-dekning er også en utfordring med denne metoden. Dette medfører at man må gå polygondrag med totalstasjon for å deretter å foreta detaljinnmålinger. Dette er utfordrende både med tanke på tid og økonomi. Ved bruk av en kombinasjon med GNSS og treghetssystem kan man få gode posisjonsestimater der GNSS-dekningen er dårlig. Dersom strekningene ikke er for lange og man har god GNSS-dekning i områdene før og etter vil bruken av totalstasjon kunne reduseres eller ikke være nødvendig i det hele tatt.

Roger 1000 er Bane NOR sitt eget måletog og brukes for å kontrollere jernbanesporets status. Men fordi Roger 1000 kun gir oss en god relativ nøyaktighet, kan ikke dette systemet brukes til å finne en absolutt posisjon. Det er kanskje mulig å løse dette problemet, ved å sette flere multi-frekvente GNSS-mottakere som får inn signal fra GPS og GLONASS i tillegg til både Galileo og BeiDou på systemet. Men dette ligger utenfor omfanget av denne oppgaven. Et annet problem med Roger 1000 er størrelsen samt at det er et proprietært¹ og lukket system. Dette betyr at det er problematisk å få ut rådata fra målingene. Man har kun tilgang til de oppgitte parameterne bestemt av produsenten. Dersom man ønsker å gjøre modifiseringer på toget må også dette godkjennes av produsenten. Ved vedlikeholdsarbeid på et mindre område krever det en del logistikk å få et stort tog inn mellom alle anleggsmaskinene. En mulig løsning kan være en liten måletralle med

¹https://no.wikipedia.org/wiki/Propriet%C3%A6r_programvare

fastmonterte sensorer som er lett å få av og på uten å forårsake ulemper for resten av arbeidet. Dette har ført til følgende problemstilling.

Dette har ført til følgende hovedproblemstilling:

- Kan en enkel måletralle med fastmontert laserskanner, GNSS-antenner og INS-sensorer innhente data som tilfredsstillende nøyaktighetskravene til jernbanesporene slik Bane NOR krever.

I tillegg reises følgende underproblemstillinger:

- Hva er rollen til et lite og fleksibelt system i forhold til dagens metoder.
- I lys av den teknologiske utviklingen, kan de nye satellittsystemene Galileo og BeiDou bidra til en bedre nøyaktighet og dermed til en revurdering av det tekniske regelverket til Bane NOR.
- Vurdere om det finnes en tids- og økonomisk besparelse ved å bruke et nytt og mindre system sammenlignet med dagens målemetoder.

Kapittel 2

Dagens metode

2.1 Jernbanesporets beliggenhet

Informasjon om beliggenheten til jernbanesporet deles inn i to grupper - en teoretisk beliggenhet og en faktisk beliggenhet. I henhold til det tekniske regelverket til Bane NOR finnes det to metoder å bestemme jernbanesporets teoretiske beliggenhet, *VUL* og *GVUL*. Den teoretiske beliggenheten forteller hvor jernbanesporet skal være plassert i et ytre referansesystem ved stabil temperatur. Mens den faktiske beliggenheten forteller hvor sporet faktisk ligger plassert i dette referansesystemet. I de tilfeller hvor det er avvik mellom den teoretiske og den faktiske beliggenheten må man foreta en justering av det eksisterende sporet, [BaneNor, 2017c].

VUL

VUL står for ”*Varig utfesting av linjen*”. Denne metoden definerer sporets faktiske beliggenhet i et ytre referansesystem. Dette gjøres ved å måle avstanden fra sporet til VUL-merker. Disse merkene er ofte kontaktmastene som står langs jernbanen. Dersom det er store avvik mellom den teoretiske og den faktiske beliggenheten må sporet justeres, , [BaneNor, 2017c, Kap 2].

GVUL

GVUL står for ”*Geodetisk varig utfesting av linjen*”. Denne metoden definerer også sporets faktiske beliggenhet i forhold til den teoretiske beliggenheten. Forskjellen mellom VUL og GVUL er at GVUL- metoden definerer sporets beliggenhet ved bruk av en matematisk koordinatbestemt linjeberegning, [BaneNor, 2017c, Kap 3]. I motsetning til VUL-merkene danner GVUL-merkene det geodetiske fastmerkenettet til Bane NOR. Dette betyr at GVUL-merkene er bedre definert både i grunnriss og i høyde enn VUL- merkene. Dette resulterer i at man ønsker å bruke

GVUL-merkene framfor VUL-merkene når man beregner den teoretiske beliggenheten.

SVUL

Etter samtaler med fagansvarlig for geomatikk i Bane NOR, Jon Haugland, har det blitt informert om at Bane NOR nylig har vedtatt at de åpner for muligheten til å kartlegge med bruk av GNSS med støtte fra CPOS på strekninger med hastigheter under 130 km/t. Etterhvert vil denne metoden også bli implementert på alle jernbanestrekninger i Norge, og vil dermed kunne være en erstatning for dagens metode. Denne nye metoden har foreløpig fått navnet SVUL som står for *Satellittbasert varig utfesting av linjen*”.

Hovedmålet med den satellittbaserte metoden er å slippe å benytte seg av det geodetiske fastmerkenettverket til Bane NOR. Dette skyldes blant annet at det ikke finnes fastmerker på alle jernbanestrekningene, i tillegg er det både tidkrevende og økonomisk kostbart å etablere nye fastmerker. Bane NOR har som mål at i en nær framtid kan man gjøre nøyaktige målinger på jernbane med nye og moderne metoder som er mer lønnsomme enn de metodene som allerede er implementert i det tekniske regelverket. Dette betyr at feltet innenfor jernbanekartlegging går en spennende tid i møte.

2.2 Dagens metoder

Kartlegging av jernbanespolet gjøres med to ulike metoder avhengig av hvilken informasjon man ønsker. Dersom man skal bestemme jernbanespolets absolutte posisjon brukes det en sporbukk og totalstasjon. I tillegg trengs informasjon om hvordan skinnene er plassert relativt til hverandre. Til dette formålet bruker Bane NOR sitt eget måletog, Roger 1000.

Informasjon og beskrivelse av metodene er basert på samtaler med Kine Sjøberg prosjektleder for samferdsel (bane) i TerraTec AS og Jon Haugland fagansvarlig for geomatikk i Bane NOR.

2.2.1 Sporbukk

For å kartlegge eksisterende jernbanespor i henhold til Bane NOR sitt tekniske regelverk brukes idag en sporbukk. En sporbukk kan beskrives som en avansert form for prismestang, se figur 2.2.1. Det festes et prisme til sporbukken og ved å måle høyden til prismet over selve sporbukken kan man beregne sporets geometri med

en høy nøyaktighet. Det er også mulig å feste en GNSS-mottaker på sporbukken istedenfor et prisme for å bestemme sporbukkens posisjon. Denne metoden er per dags dato ikke implementert i Bane NOR sitt tekniske regelverk.

For at kartleggingen av sporene skal være innenfor nøyaktighetskravene spesifisert av Bane NOR, må man bruke totalstasjon og Bane NOR sitt eget fastmerkenett. Fastmerkene (*GVUL-punktene*) er definerte i både grunnriss og høyde og brukes som tilsiktingspunkt for frioppstilling med totalstasjon. Dette gjør at posisjonen til totalstasjonen vil bli nøyaktig bestemt. Når totalstasjonen er korrekt etablert kan selve arbeidet med innmåling av jernbaneskinnen starte. Da sikter man fra totalstasjonen til prismet på sporbukken for å bestemme sporbukken sin posisjon. Det er avgjørende at sporbukken er horisontert korrekt før man starter innmålingene da dette er essensielt for den senere beregningsmetoden. Når sporbukken er korrekt horisontert vil den registrere senterspor og høyden fra laveste skinne. Dersom det ikke er noen *overhøyde*, høydeforskjell mellom skinnene, hentes høyden fra høyre skinnestreng etter stigende kilometrering. Nullpunktet for kilometreringen til jernbanen er valgt å være Oslo S. Dette betyr at på rette strekninger og venstrekurver er det høyreskinne som betegnes som referanseskinnen, mens det i høyrekurver er venstre skinnen som er referanseskinnen. Det er også viktig at sporbukken er plassert rett i forhold til hvilken skinnestreng som betegnes som referanseskinnen. Dette betyr at dersom man har en høyrekurve eller en rett strekning i stigende kilometrering trenger man ikke gjøre noe, men dersom man kommer til en venstrekurve må man snu sporbukken i overgangskurvens begynnelse.

I henhold til teknisk regelverk JD 530 kap 13 [BaneNor, 2017c] skal det måles inn spormidt og overhøyde hver 10 meter, og hver 5 meter i kurver som er mindre enn 500 meter. På grunn av de høye nøyaktighetskravene som stilles er det viktig at avstanden (sikt lengden) mellom totalstasjonen og sporbukken ikke blir for stor. Normal praksis er at man tar en ny frioppstilling for hver 200 meter. Denne praksisen fører til at man kan måle skinnegangen 100 meter i hver retning fra totalstasjonen.

En av de største ulempene med denne metoden er at det er ekstremt tidkrevende. Denne metoden krever at man må ha en ny frioppstilling hver 200 meter hvor man bruker GVUL-punkter eller andre veldefinerte punkter til å etablere posisjonen. I tillegg må man horisontere sporbukken i alle punkter og sørge for at den står rett vei i forhold til referanseskinnen. Tilgang til spor spiller også en stor rolle ettersom man må avbryte arbeidet dersom det kommer tog. Dersom det er høyt trafikkerte strekninger sier det seg selv at arbeidet kommer til å ta betydelig lengre tid av sikkerhetsmessige årsaker.



Figur 2.2.1: Sporbukk

2.2.2 Roger 1000

Roger 1000 er Bane NOR sin egen målevogn som brukes til å kontrollere sporets tilstand og kontaktledningens beliggenhet, se figur 2.2.2. Målevognen er produsert i Italia og står for Riliveo Ottico Geometrica delle Rotale”. Roger 1000 er 24 meter lang og har en vekt på 62 tonn. Om bord er det med fire ulike typer målesystemer [BaneNor, 2017a].

- Optisk system (laser og kamera)
- Treghetssystem (gyroskoper og inclinometer)
- Elektromekanisk system (strømvagtere med lastceller)
- Radiosystem (GSM-R)

Disse ulike systemene måler følgende parameter. *Sporvidden* som er avstanden målt mellom skinnenenes innerkant. Normalt er denne 1435 mm. *Overhøyden* som sier noe om differansen mellom høyeste og laveste skinne, samt overhøyden i kurven. Situasjonen til skinnene måles for å avdekke slitasje. I tillegg gjøres det flere målinger med tanke på kontaktledningene. Høyden fra skinnetopp til kontaktledningene registreres, trykket mellom målepantograf (strømvagter) til kontaktledning og sideveis beliggenhet av kontaktledningen registreres. Det brukes også et radiosystem for å bestemme dekningskvalitet på jernbanen sitt mobilnett. I tillegg er det montert to kameraer som tar bilder hver 20 meter på hele strekningen som kjøres, [BaneNor, 2017b].

Informasjonen samlet inn fra målingene brukes til å kontrollere status og videre for å planlegge framtidig vedlikeholdsarbeid på jernbanestrekningene. Alle jernbanestrekningen skal kontrolleres flere ganger i året for å kunne avdekke eventuelle feil både i sporet og ved kontaktledningene. Hvor ofte en strekning måles er fastsatt i Bane NOR sitt tekniske regelverk JD 532, kap 13 [BaneNor, 2017d]. På strekninger med en hastighetsbegrensning på 130 km/t skal det kontrolleres to ganger årlig. Ved tillatte hastigheter opp til 160 km/t skal det kontrolleres fire ganger i året, og med hastigheter over 160 km/t, slik som Gardermobanen, skal det kontrolleres hele seks ganger i året. Disse målingene gjennomføres normalt på våren og høsten fordi sporet da oftere er i en stabil tilstand med en skinnetemperatur på rundt 21 °C. Det godkjennes at skinnetemperaturen kan variere med $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

En av de største fordelene med Roger 1000 er også dens største ulempe – målevognens størrelse og tilgang til ledig spor. I de tilfellene hvor lengre strekninger kontrolleres har Roger 1000 en betydelig fordel. Fordi systemene er fastmontert på selve måletoget kan man kjøre med en hastighet opptil 160 km/t og få kontrollert store strekninger på kort tid og uten å måtte ta hensyn til personell i sporet. Roger 1000 kan også kjøre mellom normal togtrafikk noe som vil redusere problemer for reisende. Ved kontroll over korte strekninger kan det være nødvendig å stenge for normal togtrafikk. Dette fører til utfordringer med å få Roger 1000 inn på aktuelle spor over korte strekninger. Samtidig krever det mye logistikk når man skal ha flere anleggsmaskiner inn på et lite strekk fordi maskinene må plasseres i den rekkefølgen de skal utføre arbeidet i. Det å komme inn med Roger 1000 mellom andre anleggsmaskiner har vist seg ikke å være optimalt ettersom hele arbeidsprosessen blir forsinket. Dette fører til at man må omorganisere på rekkefølgen til anleggsmaskinene og kjøre av og på sporet for til enhver tid å ha rett plassering. En liten kompakt måletralle vil være et betydelig bedre alternativ ettersom det ikke vil være et problem å få den inn mellom anleggsmaskinenes planlagte kjøreruter. I tillegg er måletrallen så liten at man raskt kan ta den av og på sporene for å slippe fram de store maskinene. Dette medfører at det er lettere å opprettholde planlagt arbeidstid.



Figur 2.2.2: Røger 1000

2.2.3 Testprosjekt med GNSS og CPOS

Bane NOR sitt tekniske regelverk setter store begrensinger for hvilke målemetoder som er tillatt for kartlegging og posisjonering av jernbanen. Dette opprettholdes fortsatt selv om det har vært en betydelig forbedring i teknologi og metoder siden det tekniske regelverket ble utarbeidet og godkjent. I håp om å finne en mer effektiv metode for å beregne sporets beliggenhet på har Bane NOR i 2017 og 2018 gjennomført testprosjekter på Rørosbanen og Nordlandsbanen. Her ble det brukt GNSS med støtte fra CPOS til å kartlegge jernbaneskinneene. Målet med dette testprosjektet var å undersøke om det er mulig å oppnå Bane NOR sine egne nøyaktighetskrav med bruk av sanntidsmålinger med CPOS.

Det ble bestemt at man skulle måle punktene like tett som man gjør ved bruk av tradisjonell sporbukk og totalstasjon. Det vil si at man skulle måle et punkt hver 10 meter. For at punktenes posisjon skulle bli godt bestemt skulle det logges data i intervall på 20-30 sekunder og med flere uavhengige registreringer hvor man bryter fix-løsningen i hvert punkt. Denne prosessen skulle gjentas tre ganger, slik at man får flere uavhengige registreringer. I testprosjektet ble det bestemt at hvert punkt skal måles fire ganger med minimum 15 minutters mellomrom for at satellittenes posisjon skal endre seg. Dette tilfredsstillter Kartverket sin standard [Statens Kartverk Geodesidivisjonen, 2009, Kap 6.4.3]. I tillegg til dette skal det også logges statistisk i eksisterende grunnlagspunkter i lengre tidsperioder på minimum 2 timer. Disse tidskravene er i henhold til Kartverkets standard om satellittbasert posisjonsbestemmelse [Statens Kartverk Geodesidivisjonen, 2009, Kap 8.2]

Disse dataene har blitt analysert av Kartverket (Olav Vestøl) og resultatet viser at man må innom samme punkt tre til fire ganger for å få en pålitelighet innenfor Bane NOR sine spesifikasjoner med en nøyaktighet innenfor 10 mm i 90 % av tilfellene. Denne målemetoden vil bare fungere i områder hvor man har god GNSS dekning, noe som ikke er tilfellet for hele jernbanenettet i Norge. Flere strekninger er preget av mye vegetasjon, fjellskjæringer og tunneller. Dette medfører at det ofte må etableres nye polygondrag med totalstasjon og brukes disse sammen med eksisterende fastmerker for å oppnå ønsket nøyaktighet. Et annet problem med disse testprosjektene var den store avstanden mellom Kartverket sine permanente GNSS basestasjoner. Dette påvirket også sanntidsmålingene som ikke ble nøyaktige nok.

Noen av disse problemene kan løses på følgende måte. Man kan bruke multifrekvente GNSS-mottakere som får inn signal fra alle de fire store satellittsystemene. I områder hvor det tidligere var få satellitter kan en dermed få tilgang til Galileo- og eventuelt BeiDou satellitter. Summen av dette gir en bedre satellittgeometri, bedre GNSS-dekning og oftere fix-løsning. En annen løsning er å ha med eksterne basestasjoner som logger statisk. Ved å ha med egne basestasjoner kan man sørge for at baselinjene blir kortere og posisjonsbestemmelsen bedre. Bane NOR har i samarbeid med Kartverket vedtatt at det skal etableres flere basestasjoner i Nord-Norge for å prøve å løse dette problemet.

Kapittel 3

Navigasjonssystemer

3.1 Introduksjon

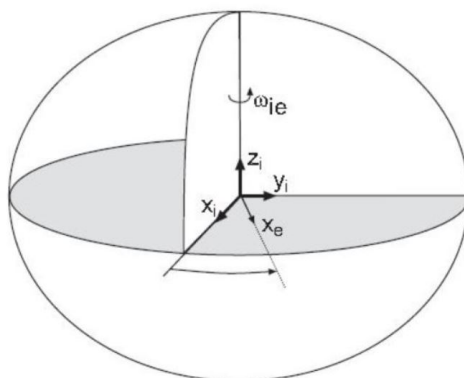
Det finnes flere ulike typer navigasjonssystemer som er i bruk i dag. Disse brukes til å bestemme posisjonen til et stasjonært eller et bevegelig objekt. Det er vanlig å dele posisjonsbestemmelsen inn i *absolutt*- og *relativ* posisjonering. Den absolutte posisjonen bestemmes ved bruk av satellittnavigasjon, mens det er vanlig å bruke treghetsnavigasjon til å bestemme den relative posisjonen til objektet. Begge disse systemene har sine fordeler og ulemper. Det er helt nødvendig å kunne kombinere disse navigasjonssystemene ettersom det i noen bruksområder stilles ekstremt høye krav til nøyaktighet og pålitelighet. Hver for seg klarer ikke disse systemene å oppfylle disse kravet alene.

3.2 Referanserammer

Moderne referanserammer er definert ved et tredimensjonalt geosentrisk koordinat-system [Kartverket, 2017b]. Fordi de ulike navigasjonssystemene gjør observasjoner i forskjellige referanserammer trengs det en metode for å transformere mellom de ulike referanserammene. Dette gir oss muligheten til å utnytte informasjon fra alle de tilgjengelige sensorene. Transformasjonen gjøres ved hjelp av rotasjonsmatriser. De vanligste referanserammene er definert og hentet fra [Farrell, 2008, kap. 2.2, s. 23-27].

3.2.1 Inertiell referanseramme: i-frame

En inertiell referanseramme er en referanseramme hvor Newtons bevegelseslover gjelder, noe som betyr at referanserammen ikke akselererer. Origo kan velges vilkårlig i denne referanserammen. Aksene må stå vinkelrett på hverandre men kan også peke i vilkårlige retninger. Alle treghetssensorer som gyroskoper og akselerometre gjør målinger relativt til den inertielle referanserammen.

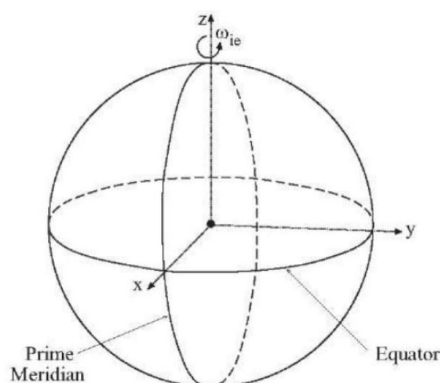


Figur 3.2.1: Rotasjonen av ECEF-rammen med hensyn til det jord-sentrerte inertial rammen. Vektorene x_i, y_i, z_i definerer aksene til ECI rammen. Vektoren x_e definerer x-aksen i ECEF. [Farrell, 2008].

3.2.2 Jordas referanseramme (ECEF): e-frame

ECEF står for Earth-Centered Earth-Fixed, denne referanserammen har origo i jordas masse-middelpunkt. Aksene er definert slik at z -aksen peker opp langs rotasjonsaksen gjennom Nordpolen, x -aksen peker mot Greenwich-meridianen ved ekvator, og y -aksen står 90° på x -aksen. Dette gjør at aksene fullfører et kartesisk

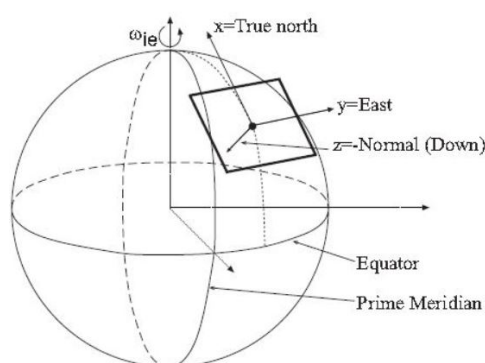
høyrehåndssystem. I dette systemet roterer aksene med jordrotasjonen, noe som resulterer i at Newtons lover ikke kan anvendes direkte. Alle observasjoner fra satellittnavigasjon blir gitt i denne referanserammen.



Figur 3.2.2: Aksene x, y, z definert i ECEF. [Farrell, 2008].

3.2.3 Lokalt geografisk referanseramme (NED): g-frame

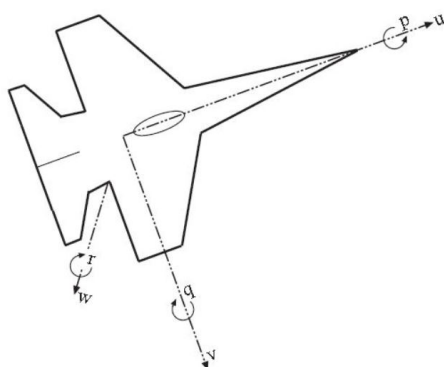
En lokal geografisk referanseramme er definert slik at aksene peker mot nord, øst og ned. Dette er kjent som et NED-system som står for *north, east, down*. Her peker x -aksen mot sann nord, z -aksen peker inn mot jordas indre og y -aksen peker mot øst og fullfører dermed det kartesiske systemet. Systemet er definert lokalt relativt til jordas geoide. Dette betyr at origo og referansesystemet beveger seg i samsvar med sensoren, og vil rotere når kjøretøyet beveger seg mot nord eller øst.



Figur 3.2.3: Lokalt geografisk referanseramme i forhold til ECEF. [Farrell, 2008].

3.2.4 Kjøretøyets referanseramme: b-frame

Denne referanserammen er festet og definert i et gitt punkt i kjøretøyet, ofte i massemiddelpunktet. Denne referanserammen brukes i hovedsak til å bestemme hvordan sensorene er monter i forhold til hverandre. U -aksen peker i kjøreretningen, w -aksen peker ned mot bunnen av kjøretøyet og v -aksen fullfører et høyrehånds kartesisk system. Rotasjonen om aksene u , v og w kalles $roll(p)$, $pitch(q)$ og $heading/yaw(r)$. I et *strapdown* system sammenfaller sensorens akser med kjøretøyets akser.



Figur 3.2.4: Oversiktsbilde av kjøretøyets koordinatsystem. Hvor rotasjonen $p = roll$, $q = pitch$ og $r = yaw$. [Farrell, 2008].

3.2.5 s-frame: Sensorens referanseramme

Dette er treghetssensorenes referanseramme. Aksene i s-frame utspenner et kartesisk høyrehåndssystem.

3.3 Satellitnavigasjon: GNSS

Formålet med satellitnavigasjon er å bestemme den absolutte posisjonen til objekter og punkter på landjorda, på havet, i lufta eller i rommet. Dette gjøres ved bruk av satellitter som går i bane rundt jorda. Disse satellittene sender ut radiosignaler med informasjon om satellittens posisjon, hastighet og tidspunkt for signalet. Sammen med tilhørende kontrollstasjoner på bakken er det mulig å bestemme posisjonen til de aktuelle objektene [Hofmann-Wellenhof et al., 2007].

GNSS står for ”*Global Navigation Satellite System*” og er en felles betegnelse for alle satellitnavigasjonssystemer som finnes i dag. I dag har vi fire store systemer og flere små støttesystemer. Av de store systemene er kun to av disse fullstendig utbygget. Disse to er det amerikanske GPS (”*Global Positioning System*”) og det russiske GLONASS (”*Global’naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*”). Disse to kan dermed gi oss en global dekning på hele landjorda uten støtte fra andre systemer. De to siste store systemene som fremdeles er under utbygging forventes å være fullstendig operative i løpet av 2020 [Tegeador, 2015]. Den europeiske romorganisasjonen (ESA) og EU sitt samarbeidssystem Galileo har per november 2017 18 oppskutte satellitter ¹. Det siste systemet er det kinesiske BeiDou som per 12.februar 2018 har 26 operative satellitter ². Både Galileo og BeiDou kan brukes sammen med GPS og GLONASS for å gi en bedre global dekning, spesielt i områder hvor det er få GPS- og GLONASS- satellitter tilgjengelig. Men de klarer ikke per dags dato å gi oss en global dekning alene.

3.3.1 Observasjonsmetoder

Dagens GNSS-mottakere anvender to ulike observasjonsmetoder for å måle avstanden mellom satellitter og mottakere.

Kodemålinger

Ved bruk av *kodemålinger* observeres avstanden mellom mottakeren og satellitten direkte. Dette gjøres ved å registrere tiden signalet bruker fra satellitten til det treffer mottakeren. Siden signalet beveger seg med lysets hastighet, er det ikke spesielt krevende å regne ut avstanden. Det er mulig å bestemme mottakerens posisjon med en nøyaktighet ned på 0,5 m - 3 m ved å triangulere signalet til minst fire satellitter ved samme tidspunkt [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]. Siden denne metoden å beregne posisjonen på ikke er veldig avansert, er mottakerne

¹http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_GAL.php#Satellites

²http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.php#Satellites

billige og brukes i for eksempel mobiltelefoner og klokker, som ikke krever høyere nøyaktighet enn på meternivå.

Fasemålinger

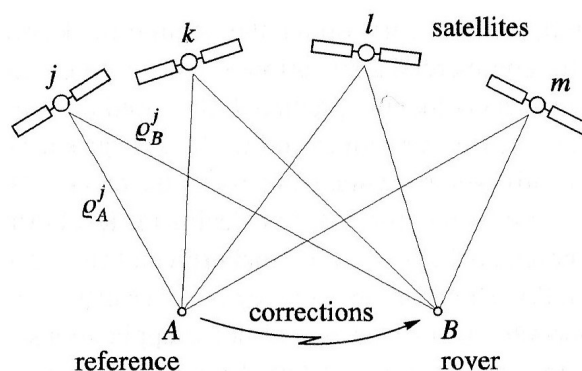
Fasemålinger gir en betydelig bedre nøyaktighet enn kodemålinger. Det er mulig å oppnå en nøyaktighet helt ned på millimeters nivå (typisk 0.005 m – 0.002 m) [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]. Denne nøyaktigheten oppnås ved at man måler antall hele bølgelengder på signalets bærebølge fra satellitten til mottakeren. Dette tallet kalles også for heltallet. Det er mulig å finne dette heltallet ved å måle mot to satellitter og to mottakere samtidig. I motsetning til kodemålinger blir fasemålinger påvirket av forhold i atmosfæren, noe som medfører at man er nødt til å foreta korreksjoner for atmosfæriske forstyrrelser. Dette løses ved å måle på flere frekvenser samtidig og ved modellering av de atmosfæriske forstyrrelsene. Mottakere som utnytter fasemålinger anvendes til profesjonelt bruk. Dette skyldes blant annet at fasemålinger er mer nøyaktighet enn kodemålinger, samt at prosessen med å beregne heltallsløsningen er krevende og utstyret blir dermed dyrere.

Differensiell GNSS (DGNSS)

Differensiell posisjonering med GNSS er en sanntidsteknikk der to eller flere mottakere blir brukt samtidig. Ved bruk av dobbeltdifferanse er det mulig å oppnå en nøyaktighet ned mot noen centimeters nøyaktighet. Dersom dataen etterprosesserer er det mulig å oppnå en nøyaktighet på $5\text{mm} + 1\text{ppm}$ [Statens Kartverk Geodesidivisjonen, 2009]. Normalt ligger en av mottakerne i ro, med en posisjon med antatt kjente koordinater i form av en referanse- eller basestasjon. Den/de andre mottakerne er i bevegelse, og man ønsker å bestemme posisjonen til mottakerne som er i bevegelse se figur 3.3.1. Ved å bruke flere mottakere samtidig er det mulig å danne en dobbeltdifferanse. Dobbeldifferanser har en rekke fordeler framfor enkelt-differanser, hvor man kun bruker en mottaker. Det gjør det mulig å eliminere en rekke feil i observasjonsligningen, blant annet klokkefeilen til både satellitt og mottaker. Videre kan man også redusere påvirkningene fra troposfæren og ionosfæren. Dette gjør at man kan estimere heltallsløsningen for antall hele bølgelengder fra satellitten til mottakeren [Hofmann-Wellenhof et al., 2007].

Det er også mulig å eliminere heltallsløsningen ved å danne trippeldifferanser. I trippeldifferanser bruker man flere mottakere og i tillegg gjøres observasjonene over to ulike tidsepoker. Problemet med denne metoden er at dersom det er et fasebrudd er det ikke mulig å eliminere heltallsløsningen. Et annet problem ved bruk av trippeldifferanser er at man får en korrelasjon over tid, ettersom fasebrudd er et vanlig og reelt problem i den den virkelige verden. Dette har resultert i at

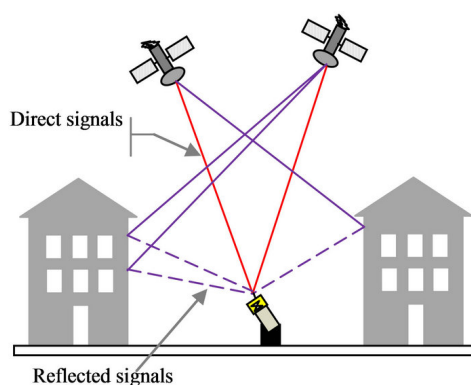
man foretrekker å bruke dobbeltdifferanser fremfor trippeldifferanser [Kristiansen, 2015].



Figur 3.3.1: Basic konsept for DGNS [Hofmann-Wellenhof et al., 2007].

Multipath

Multipath eller flerveisinterferens er det fenomenet som oppstår når radiosignalet fra satellittene blir reflektert fra andre objekter før det treffer mottakeren, slik at signalet har mer enn en reisevei, se figur 3.3.2. Påvirkningen av multipath er størst i områder med dårlig satellittgeometri, noe som betyr at det er utbredt i områder som byer, daler og skogsområder. Satellitter som står lavt på horisonten opplever også ofte multipath. Der deler av signalet blir reflektert før det treffer mottakeren blir reisetiden signalet bruker lengre og dette resulterer i at posisjonen blir feilbestemt. En mulig løsning ved multipath er å gjøre målingene på flere frekvenser [Hofmann-Wellenhof et al., 2007].



Figur 3.3.2: Multipath [Kumar, 2014].

3.3.2 Observasjonsligninger

Observasjonsligningen for henholdsvis kodemålinger (P) og fasemålinger (L) mellom en mottaker (r) og en satellitt (s), for en gitt frekvens (f_i), kan settes opp på følgende måte, [Tegedor, 2015]:

$$P_{R_i}^s = \rho_r^s + T_r^s + I_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(p_{ri} - p_i^s) + \epsilon_P \quad (3.3.1)$$

$$L_{r_i}^s = \rho_r^s + T_r^s + I_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) - c(l_{ri} - l_i^s) + N_r^s \lambda + \epsilon_L \quad (3.3.2)$$

hvor:

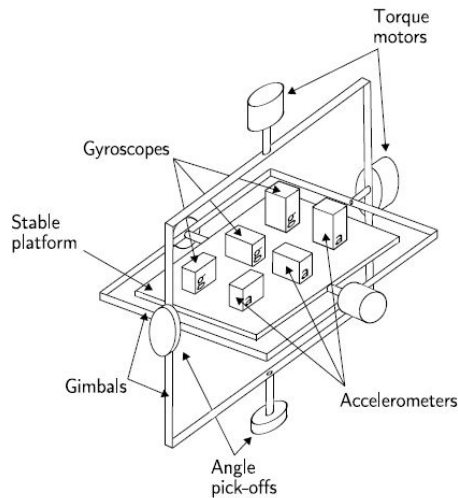
- ρ_r^s er den geometriske avstanden mellom satellitt og mottaker.
- c er lysets hastighet i vakuum
- δt^s og δt_r er klokkefeil i henholdsvis satellitten og mottakeren.
- T_r^s er den troposfæriske forsinkelsen mellom satellitt og mottaker.
- I_r^s er forsinkelsen gjennom ionosfæren. Denne kan reduseres dersom man sender på flere ulike frekvenser.
- p_{ri} og p_i^s er pseudorange hardware forsinkelsen til mottaker og satellitt for den gitt frekvensen f_i .
- l_{ri} og l_i^s er fase hardware forsinkelsen til mottaker og satellitt for frekvensen f_i .
- λ er signalets bølgelengde.
- N_r^s er antall hele bølgelender (heltallet) mellom satellitt og mottaker.
- ϵ_P og ϵ_L er restfeil for henholdsvis kode og fasemålinger. Denne inneholder blandt annet støy og multipath (flerveisinterferens).

3.4 Treghetsnavigasjon: INS

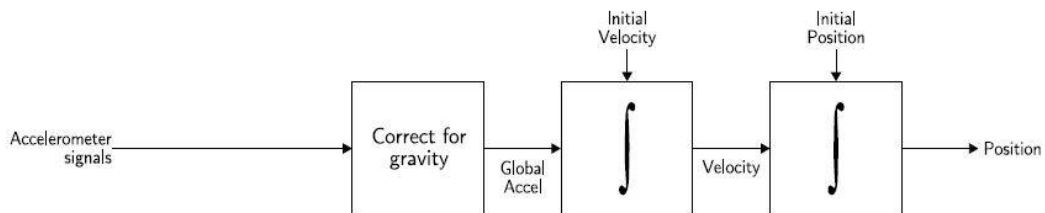
Treghetsnavigasjon er en navigasjonsteknikk hvor observasjoner gitt av akselerometere og gyroskoper brukes til å beregne objektets endring i posisjon, hastighet og orientering. Det er en forutsetning at man har en kjent starttilstand, orientering og hastighet. De ulike observasjonene gjøres ved bruk av en IMU "*Inertial measurement unit*". En IMU inneholder tre ortogonale akselerometer og tre ortogonale gyroskoper på de tre aksene til systemet. En IMU er et høyhastighetssensor som typisk logger med en frekvens på noen hundre hertz. I en IMU måler akselerometeret den lineære akselerasjonen mens gyroskopet måler vinkelhastigheten. Ved å kombinere en IMU med en datamaskin er det mulig å beregne posisjonen og orienteringen til det ønskede objektet. Dette systemet kalles da for et INS "*Inertial Navigation System*". Et problem med INS er at feilene i sensoren drifter over tid, fordi et INS kontinuerlig legger til den målte endringen til den siste beregnede posisjonen. Det er vanlig å bruke eksterne støttesensorer som for eksempel GNSS til å forbedre posisjonen og orienteringen gitt av et INS, slik at man kan beregne en absolutt posisjon. Et INS kan deles inn i to ulike grupper etter hvordan de er monter i forhold til kjøretøyet. Disse metodene kalles for skrogmonterte systemer og gimbal systemer [Woodman, 2007].

Gimbal system

I et gimbal system er treghetssensorene montert ved bruk av gimbaler som korrigerer for all rotasjon i kjøretøyet. Dette gjør at alle sensorene kan bevege seg fritt i de tre aksene, se figure 3.4.1. Det resulterer i at uansett hvordan plattformen er definert vil sensorene alltid gjøre målinger relativt til den globale referanserammen. Orienteringen til sensoren beregnes ved at man måler vinkelen mellom de omkringliggende gimbalene. Da kan man beregne den endelige posisjonen til sensorene ved å integrere målingene fra akselerometeret to ganger og korrigere for tyngdeakselerasjonen, se figur 3.4.2 [Woodman, 2007].



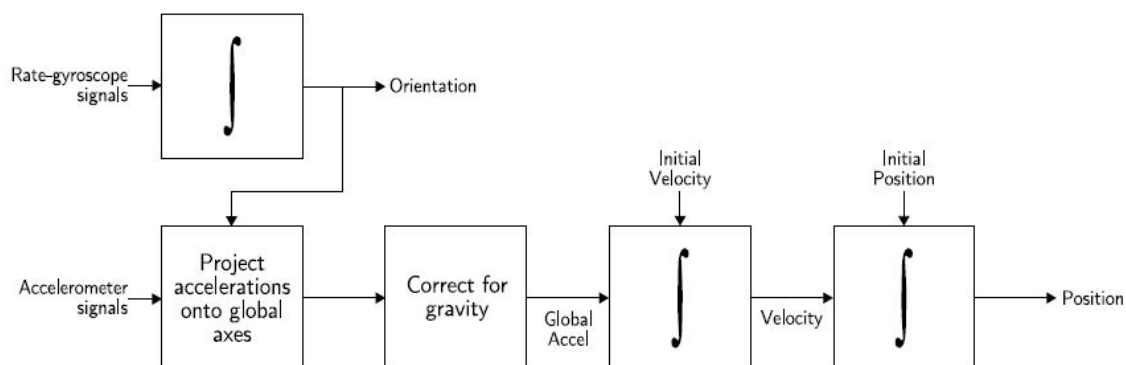
Figur 3.4.1: Gimbalmontering [Woodman, 2007].



Figur 3.4.2: Integrasjon av gimbal observasjoner [Woodman, 2007]..

Skrogmontert system (*Strapdown*)

I et skrogmontert system er treghetssensorene montert fast i kjøretøyet. Dette medfører at alle observasjonene gitt av IMU er relativt til kjøretøyets referanseramme. Ved å integrere vinkelobservasjonene gitt av gyroskopet kan man estimere orienteringen. Akselerasjonsobservasjonene transformeres deretter til den globale referanserammen ved hjelp av den estimerte orienteringen. Da er det mulig å finne et estimat til posisjonen ved å integrerer de transformerte akselerasjonene, se figur 3.4.3. Ulempen med et skrogmontert system er at det krever betydelig mer regnekraft for å beregne den endelige posisjonen, enn hva som trengs i et gimbal system. Fordelen med et skrogmontert system er at de har en tendens til å være både fysisk mindre og mekanisk enklere. Noe som resulterer i at de skrogmonterte systemene er mest brukt [Woodman, 2007].



Figur 3.4.3: Integrasjon av strapdown observasjoner [Woodman, 2007]..

3.4.1 Gyroskop

Det finnes tre hovedtyper gyroskoper. Et gyroskop sin oppgave er å måle vinkelhastigheten. Følgende definisjoner er hentet fra [Woodman, 2007].

Mekaniske gyroskoper

Et mekanisk gyroskop består av et spinnhjul som er montert på to gimbal. Dette lar gyroskopet rotere fritt om alle tre aksene, se figur 3.4(a). Gyroskopet vil motstå endringer i orientering og forblir derfor i en konstant global orientering. Vinkelen mellom de tre aksene finnes ved å lese av gimbalenes vinkelendring. Mekaniske gyroskoper har ulempen med at det består av bevegelige deler som skaper friksjon mellom delene. Denne friksjonen fører videre til at man opplever en drift i observasjonene over tid. De mekaniske gyroskopene trenger også noen minutter på å starte opp og bli skikkelig varme, noe som ikke er ideelt i mange tilfeller.

Optiske gyroskoper

I optiske gyroskoper måles rotasjonen med at to lysstråler/laserstråler sendes inn i spoler i motsatt retning, se figur 3.4(b). Dersom sensoren er i rotasjon vil den utsendte strålen som beveger seg med rotasjonsretningen bruke lengre tid enn strålen som beveger seg mot rotasjonen. Dermed vil disse strålene lage et interferenstmønster, denne prosessen kalles Sagnac-effekten. Ved hjelp av det aktuelle interferenstmønsteret er det mulig å beregne vinkelhastigheten.

Optiske gyroskoper kan deles inn i to undergrupper, fiberoptiske- og ringlaser-gyroer. Forskjellen på et fiberoptisk gyroskop (*FOG*) og et ringlaser gyroskop (*RLGs*) er måten de styrer lyset på. Et fiberoptisk gyroskop bruker optisk fiber, mens et ringlaser gyroskop bruker speil til dette formålet.

Optiske gyroskoper har en fordel framfor de mekaniske gyroskopene med at de starter opp på bare noen få sekunder og har ingen bevegelige deler. Ulempen med de optiske gyroskopene er at nøyaktigheten er avhengig av lengden på lysstrålen/spolen. Nøyaktigheten øker med størrelsen på lysbanen, noe som betyr at de store optiske gyroskopene er de mest nøyaktige. Fordi man gjerne ønsker at gyroskopene skal være små er ikke dette optimalt til navigasjonsformål.

MEMS gyroskoper (Mikroelektromekaniske systemer)

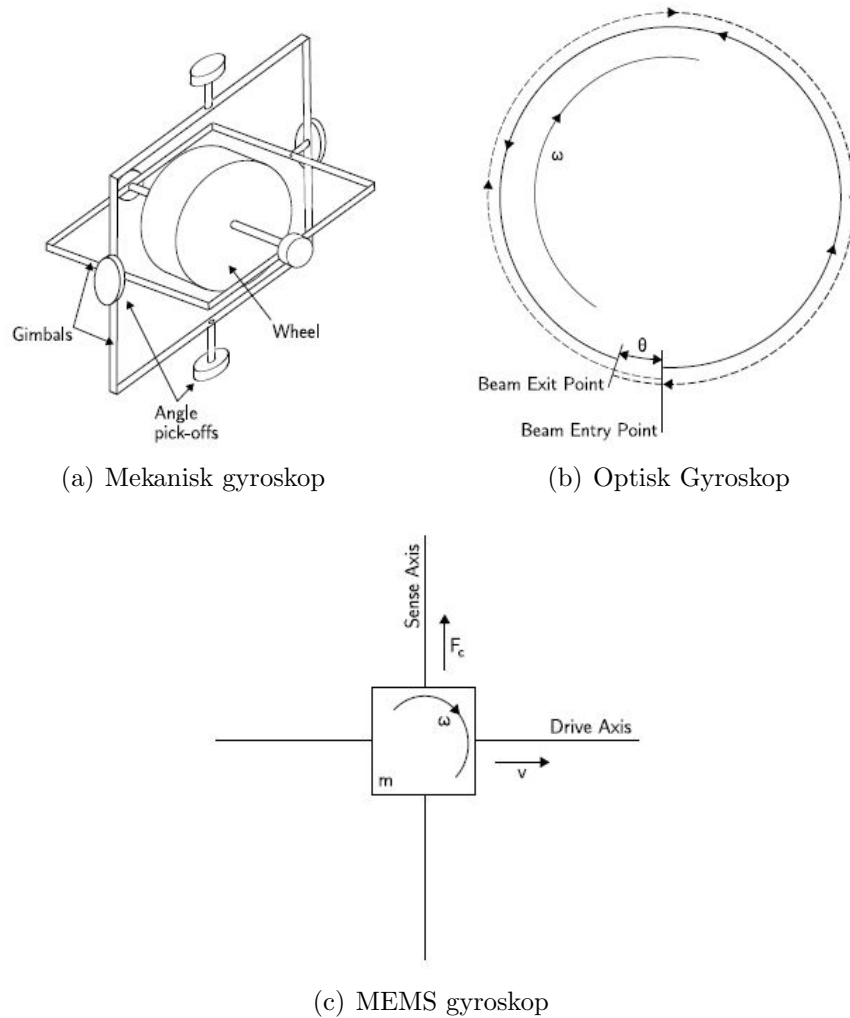
MEMS gyroskoper ble utviklet for å finne et mer rimelig alternativ til de mekaniske og optiske gyroskopene som var dyre og besto av flere deler. Dette har resultert i at MEMS gyroskoper er veldig små, enkle og består av billige sensorer. Et MEMS gyroskop inneholder vibrerende elementer som gjør at man kan måle Coriolis-kraften, se figur 3.4(c). Når gyroskopet roteres vil det oppstå en ny vibrasjon, og denne vibrasjonen brukes til å beregne vinkelhastigheten.

Den grunnleggende observasjonslikningen til et gyroskop er definert i [Kjørsvik, 2010], og kan skrives som:

$$\omega_{es}^s = \omega_{is}^s - C_e^s \omega_{ie}^e \quad (3.4.1)$$

Hvor

- ω_{es}^s er gyroskopets vinkelhastighet i s-frame, relativt e-frame.
- ω_{is}^s er gyroen sin målte vinkelhastighet i s-frame, relativt i-frame.
- ω_{ie}^e er jordas rotasjonshastighet, naturligvis gitt i e-frame, relativt i-frame.
- C_e^s er rotasjonsmatrisa for å transformere jordrotasjonen slik at den blir gitt i s-frame.



Figur 3.4.4: Ulike typer gyroskoper [Woodman, 2007]

3.4.2 Akselerometer

Oppgaven til et akselerometer er å måle akselerasjonen langs sensorens tre akser. Man kan klassifisere akselerometre i tre hovedtyper. Følgende definisjoner er hentet fra [Woodman, 2007].

Mekanisk akselerometer

Et mekanisk akselerometer har en testmasse som er festet til en fjær, se figur 3.5(a). Når sensoren opplever en akselerasjon vil testmassen bevege seg bort fra likevekts

punktet. Denne forskyvningen registreres og brukes til å bestemme akselerasjonen ved hjelp av Newtons andre lov $F = ma$.

Solid state akselerometer

Kjennetegnet med Solid state akselerometre er at de er små, pålitelige og robuste. Denne typen akselerometre kan igjen deles inn i tre undergrupper. Disse gruppene er frekvens-, vibrasjons- og silikonbaserte. En type solid state akselerometer er *Surface Acoustic Wave akselerometre (SAW)*, se figur 3.5(b). Denne type akselerometer består av en bjelke med en testmasse. Denne testmassen kan bevege seg fritt i den ene enden, mens den andre enden er montert fast. Når sensoren akselererer vil testmassen svinge med en gitt frekvens som er avhengig av akselerasjonen. Det er da mulig å beregne den aktuelle akselerasjonen ved å måle denne frekvensendringen.

MEMS akselerometer

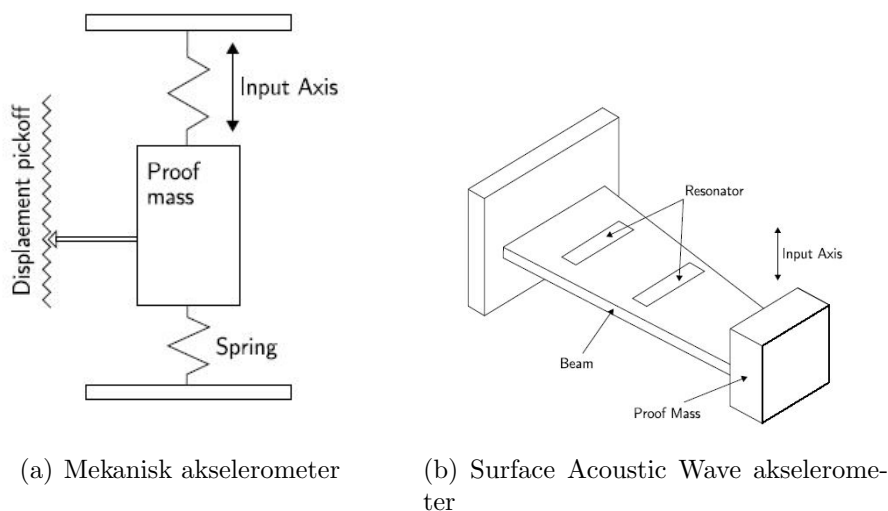
MEMS (Mikroelektromekanisk system) akselerometrene kan deles inn i to undergrupper. Begge typene er bygget med MEMS teknologi. Dette betyr at de er mindre og mer robuste enn de tradisjonelle akselerometrene. I tillegg har de en kortere oppstartstid og er betydelig billigere å produsere. Den første typen MEMS akselerometre er mekaniske akselerometre. Disse opererer med de samme prinsippene som et vanlig mekanisk akselerometer. Den andre typen MEMS akselerometre måler frekvensendringer i et vibrerende element på samme måte som et Solid state akselerometer. Selv om MEMS akselerometrene bygger på de samme prinsippene som de tradisjonelle akselerometrene, vil pris og størrelse medføre at nøyaktigheten ikke blir like bra som hos de større tradisjonelle akselerometrene.

Observasjonligningen for akselerasjonen er definert i [Kjørsvik, 2010]. Gitt i i-frame kan observasjonligningen skrives som:

$$\ddot{x}^i = f^i + g_{att}^i \quad (3.4.2)$$

Hvor

- \ddot{x}^i er akselerasjonen gitt i i-frame.
- f^i er den observerte spesifikke kraften.
- g_{att}^g er graviitasjonsakselerasjonen.



Figur 3.4.5: Ulike typer akselerometer [Woodman, 2007]

Inertial Measurement Unit (IMU)

En typisk IMU inneholder som nevnt tidligere et akselerometer og gyroskop på sensorens tre akser, og klarer ikke bestemme en absolutt posisjon alene. For at man i det hele tatt skal kunne få noen posisjonsestimater fra en IMU trenger man noen startverdier for posisjon, hastighet og orientering.

I et tenkt ideelt tilfelle har man korrekte startverdier og ingen instrumentfeil. Da vil en IMU gi kontinuerlig oppdatert posisjon, hastighet og orientering til den bevegelige plattformen, uten bruk av andre sensorer. I den faktiske verden er ikke dette et realistisk tilfelle. Det vil alltid være diverse instrumentfeil tilstede. Dette fører til at en IMU er svært ustabil helt alene og er avhengig av eksterne sensorer som f.eks GNSS for å kunne gi et nøyaktig nok estimat.

Videre definisjoner og utledninger av observasjonene fra en IMU er hentet fra [Kjørsvik, 2010].

Akselerometeret sin oppgave er å måle akselerasjonen langs de tre aksene. Typiske verdier man får ut fra akselerometeret er hastighetsinkrementer som er målt i sensorens ramme (s-frame). Disse må korrigeres for deterministiske sensor feil. Dermed kan målingene skrives som:

$$\Delta \tilde{v}^s = \int_{\delta t} \tilde{f}^s dt = \int_{\delta t} f^s + \delta f^s dt \quad (3.4.3)$$

hvor tilde ($\tilde{}$) brukes for observerte verdier, f^s er den målte spesifikke kraften, δf^s er instrumentfeilen, og δt er IMU dataen sitt logge intervall.

Et gyroskop måler vinkelhastigheter langs gyroens tre akser. Typiske verdier man får ut fra et gyroskop er vinkelinkrementer som er gitt i s-frame som er korrigert for deterministiske sensor feil. Disse målingene kan skrives som:

$$\Delta \tilde{\Theta}^s = \int_{\delta t} \tilde{\omega}_{is}^s dt = \int_{\delta t} \omega_{is}^s + \delta \omega_{is}^s dt \quad (3.4.4)$$

hvor tilde ($\tilde{}$) igjen brukes for den observerte verdien, ω_{is}^s er sensorens målte vinkelhastigheten relativt i-frame, gitt i s-frame, og $\delta \omega_{is}^s$ betegner instrumentfeil.

Deretter brukes informasjon om vinkelinkrementene gitt av gyroen til å oppdatere sensorens orientering. Videre brukes denne oppdaterte rotasjonsmatrisen til å transformere hastighetsinkrementene gitt i s-frame til e-frame. Dette lar oss finne den oppdaterte posisjons- og hastighetsestimater ved tiden $t_0 + \delta t$ ved hjelp an en enkel numerisk integrasjonsprosedyre.

3.5 Navigasjonsligninger

De ulike sensorene som brukes i et navigasjonssystem er relatert til hverandre. Disse gjør, som nevnt tidligere, observasjoner i ulike referanserammer. For å løse dette problemet trenger man en måte å transformere mellom disse ulike referanserammene. Dette løses ved hjelp av rotasjonsmatriser. I denne oppgaven betegnes en rotasjonsmatrisene som C , hvor rotasjonsmatrisen C_a^b transformerer observasjoner fra referanseramme a til referanseramme b. På samme måte vil da den inverse av rotasjonsmatrisen C_a^b transformere fra referanseramme b til referanseramme a. Fullstendig utledning av disse transformasjonene kan ses i [Farrell, 2008, kap. 2.4, s. 35-39]

3.5.1 Navigasjonsligninger i e-frame

Bruk av treghetssystemer til navigasjons- og posisjoneringformål gjøres ved hjelp av integrasjon av den observerte akselerasjonen. Det er da helt nødvendig å finne en sammenheng mellom de observerte og de ukjente tilstandene i navigasjonssystemet. Til dette formålet trenger man et sett med navigasjonsligninger hvor man tar utgangspunkt i de primære navigasjonstilstandene: posisjon, fart og akselerasjon. For å finne akselerasjonsligningen må man først derivere posisjonsligningen slik at man får en fartslikning. Denne deriveres igjen slik at man får den endelige akselerasjonsligningen.

Den følgende spesifikke utledningen for navigasjon i e-frame er hentet fra [Kjørsvik, 2010]. En generell utledning for de ulike referanserammene kan også finnes i [Jekeli, 2001, kap 4.3].

Rotasjonsmatrisen C_e^i transformerer fra e-frame til i-frame. Det er mulig å finne posisjonen gitt i i-frame x^i ved å venstre multiplisere posisjonen gitt i e-frame med rotasjonsmatrisen.

$$x^i = C_e^i x^e \quad (3.5.1)$$

Ved å derivere posisjonsligningen med hensyn på tiden får vi et uttrykk på hastigheten \dot{x}^i :

$$\dot{x}^i = \dot{C}_e^i x^e + C_e^i \dot{x}^e \quad (3.5.2)$$

Den tidsderiverte av rotasjonsmatrisen forteller noe om hvor mye to systemer roterer i forhold til hverandre, i forhold til det ene systemet.

$$\dot{C}_e^e = C_e^i \Omega_{ie}^e \quad (3.5.3)$$

Ettersom transformasjonen også er avhengig av jordrotasjonen, må man ta hensyn til denne. Jordrotasjonen er definert som $\Omega_{ie}^e = [\omega_{ie}^e \times]$. Dette medfører at det faktiske uttrykket for hastigheten blir:

$$\dot{x} = C_e^i \Omega_{ie}^e x^e + C_e^i \dot{x}^e \quad (3.5.4)$$

Videre kan man finnes akselerasjonen \ddot{x}^i ved å dobbeltderivere posisjonsligningen med hensyn på tiden. Da får man følgende uttrykk:

$$\ddot{x}^i = C_e^i (\Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e + \dot{\Omega}_{ie}^e) x^e + 2C_e^i \Omega_{ie}^e \dot{x}^e + C_e^i \ddot{x}^e \quad (3.5.5)$$

Det antas at jordrotasjonen er konstant ($\dot{\Omega}_{ie}^e = 0$). Dette medfører at akselerasjonen gitt i e-frame kan skrives som:

$$\ddot{x}^e = C_i^e f^i + C_i^e g_{att}^i - \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e x^e - 2\Omega_{ie}^e \dot{x}^e \quad (3.5.6)$$

$$\ddot{x}^e = f^e + g_{att}^e - \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e x^e - 2\Omega_{ie}^e \dot{x}^e \quad (3.5.7)$$

Ved å bruke $g_{att}^e = g^e + \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e x^e$ som representerer tyngde- akselerasjonen i e-frame blir den endelige formelen for akselerasjonen i e-frame:

$$\ddot{x}^e = f^e + g^e - 2\Omega_{ie}^e \dot{x}^e \quad (3.5.8)$$

Posisjon og hastighet i e-frame

Den endelige ligningen for posisjon (x^e) og hastighet (\dot{x}^e) er da definert som:

$$\frac{d}{dt} x^e = \dot{x}^e \quad (3.5.9)$$

$$\frac{d}{dt} \dot{x}^e = f^e + g^e - 2\Omega_{ie}^e \dot{x}^e \quad (3.5.10)$$

Ved å innføre ett sett av kjente startbetingelser kan disse differensialligningene løses ved bruk av numerisk integrasjon.

Orientering i e-frame

I et skrogmontert treghetssystem er sensoren fastmontert til kjøretøyet. Dette betyr at både vinkelhastigheten målt av gyroskopene og akselerasjonen målt av akselerometrene gjøres i s-frame relativt til i-frame. Noe som betyr at observasjonene må transformeres til e-frame. Dette gjøres ved hjelp av rotasjonsmatrisen C_s^e . Sensorens orientering blir da gitt i s-frame relativt til i-frame, definert som:

$$\dot{C}_s^e = C_s^e \Omega_{es}^s \quad (3.5.11)$$

hvor $\Omega_{es}^s = [\omega_{es}^s \times]$.

3.6 Treghetsnavigasjon med støttesensorer

Treghetsnavigasjon brukes som tidligere nevnt til å bestemme den relative posisjonen. Dette gjøres med hjelp av en IMU. En IMU har en typisk målefrekvens i intervallet 100-500 Hz. I motsetning til en IMU kan GNSS gi en god absolutt posisjon. Normalt er målefrekvensen i et GNSS-system i intervallet 1-2 Hz. Dette resulterer i at man får betydelig flere observasjoner per sekund med en IMU. Det er vanlig at en IMU betegnes som en høyhastighetssensor, mens GNSS betegnes som en lavhastighets- sensor.

For noen navigasjons- og posisjoneringsformål kreves det en bedre nøyaktighet enn hva man klare å oppnå kun ved bruk av GNSS eller INS (treghetsnavigasjonssystem) separat. Dette gjelder spesielt i tilfeller hvor man samler inn data ved kinematisk logging og der dataene må etterprosesseres.

Fordelen med GNSS er at den gir en god absolutt posisjon i områder med god satellittgeometri og dekning. Dette er sjelden tilfellet i Norge som er preget av svært varierende topografi med fjell og daler, samt på samferdselsstrekninger med tunneller. Dette resulterer i at man ikke klarer å bestemme en god absolutt posisjon ved kinematisk datafangst i store deler av Norge.

Fordelen med en IMU er at den kan bestemme en god relativ posisjon samt at IMU'en har en høy målefrekvens som resulterer i at den relative posisjonen oppdateres ofte. Ulempen med en IMU er at nøyaktigheten på den relative posisjonen avtar med tid. Dette skyldes hovedsakelig at både gyroskopene og akselerometrene drifter over tid. De billige IMU drifter mer og raskere enn de dyre.

Problemene beskrevet over kan løses med å kombinere et GNSS og en IMU. Da vil de høyfrekvente IMU-observasjonene kunne gi gode posisjonsestimater mellom de lavfrekvente GNSS-observasjonene. Effekten er at den absolutte posisjonen ikke vil drifte like fort i områder med dårlig eller ingen satellittdekning. I tillegg vil de nøyaktige GNSS-observasjonene brukes til å rette opp de høyfrekvente IMU-målingene. Dette resulterer videre i at driften minker også i dette systemet. For å kombinerer disse metodene må man integrere observasjonene. Dette kan gjøres ved ulike algoritmer hvor en av de vanligste metodene er å integrere observasjonen i et Kalmanfilter.

Ønsker man å bestemme en absolutt posisjon ved bruk av et INS er man helt avhengig av å kombinere dette systemet med eksterne sensorer. Normalt vil man velge å bruke GNSS som den eksterne støttesensoren. I de tilfellene hvor det ikke brukes en ekstern sensor, har man ingen måte å korrigere for driften til IMU'en på.

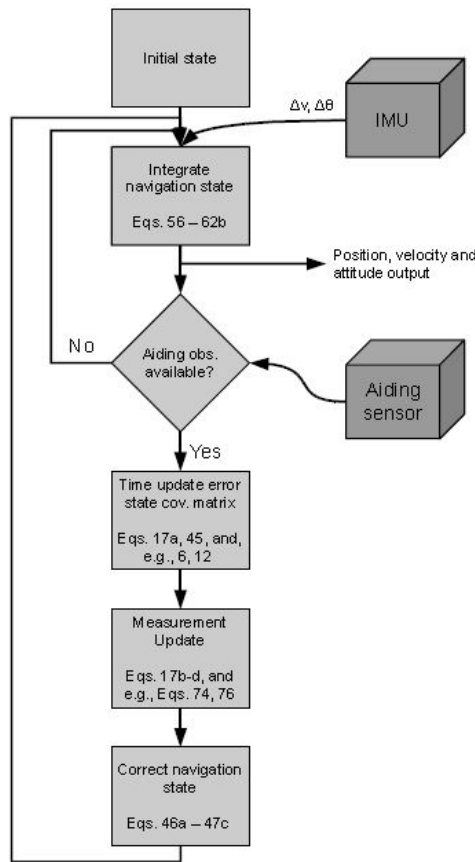
Dette resultere i at den absolutte posisjonen heller ikke kan bestemmes nøyaktig nok.

3.7 Kalmanfilter

Et Kalmanfilter er en algoritme og et nyttig beregningsverktøy for flere navigasjonsformål når man benytter flere ulike typer sensorer. Kalmanfilteret brukes spesielt i kinematisk datafangst som i bilbåren kartlegging (mobile mapping) eller kartlegging fra lufta ved bruk av fly og helikoptre. Fordelen med et Kalmanfilter er at algoritmen klarer å håndtere at nye observasjonen tilføres når en kjenner tilstanden på foregående tidspunkt [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]. Samtidig kan et Kalmanfilter i motsetning til flere andre algoritmer håndtere informasjon fra ulike sensorer samtidig. Det er normalt at man deler algoritmen inn i to steg: *Tidsoppdatering* og *Måleoppdatering*.

Ved påfølgende beregninger over tid vil estimatet på de ukjente tilstandene gitt fra Kalmanfilteret falle sammen med den sanne verdien. Variansen vil også minimeres og dermed gi minst mulig feil på estimatet. Dette fordi algoritmen utnytter og kombinerer informasjonen gitt fra ulike sensorer. I tilfeller hvor man bruker ett GNSS og en IMU vil et Kalmanfilter estimere eventuell drift og feilkilder i treghetssensorene, samtidig som IMU observasjonen brukes til å forbedre GNSS posisjonene. Det er ønskelig at man opererer med et lineært system, noe som betyr at Kalmanfilteret estimerer feiltilstandene og ikke de faktiske tilstandene. Denne formen for Kalmanfilter kalles for et *komplementærfilter*, [Farrell, 2008].

De følgende avsnittene vil gi en beskrivelse av gangen i et Kalmanfilter, og denne flyten kan ses i figur 3.7.1.



Figur 3.7.1: Flyttdiagram for integrasjon av treghetsnavigasjon med andre sensorer, som f.eks. GNSS [Kjørsvik, 2010].

Numerisk integrasjon

Ved å innføre et sett av startbetingelser kan man finne en løsning på differensial-ligningen ved hjelp av numerisk integrasjon [Kjørsvik, 2010].

Det første steget i algoritmen er å beregne tilstanden ved tidspunkt k , ved hjelp av numerisk integrasjon der man kjenner informasjonen om forrige tilstand $k-1$. Ved hvert tidspunkt har man tre målte gyroinkrementer og tre hastighetsinkrementer. Ettersom disse inkrementene er gitt i s-frame må de transformeres til e-frame. Den gjennomsnittlige rotasjonen over tidsintervallet (δt) er gitt ved:

$$\ddot{x}^e = \overline{C_s^e} \ddot{x}^s - (2\Omega_{ie}^e \dot{x}^e - C_g^e g^g) \delta t \quad (3.7.1)$$

Der rotasjonsmatrisen (\overline{C}_s^e) er definert som:

$$\overline{C} = C_s^e(t_{k+1})[I - \frac{1}{2}(\rho^2 \times)] \quad (3.7.2)$$

I løpet av en måling vil jorda rotere relativt til inertialsystemet. Dette betyr at gyroskopmålingene må korrigeres for dette. Dette gjøres ved at vinkelinkrementene fra fra gyroskopene ($\Delta\theta_{is}^s$) blir korrigert ved hjelp av:

$$\rho^s = \Delta_{is}^s - C_e^s \omega_{ie}^e \delta t \quad (3.7.3)$$

Hvor ω_{ie}^e er jordas rotasjonshastighet relativt til i-frame. Ved hjelp av rekkeutvikling kan da rotasjonsmatrisen som inneholder informasjon om orienteringen fremskrives [Titterton and Weston, 2004, kap 11, s.309-214].

$$C_{k+1} = C_k A_k \quad (3.7.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2} \quad (3.7.5)$$

$$\sum = [\sigma \times] \quad (3.7.6)$$

Der kryssproduktet er definert som:

$$[\sigma \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_z & \sigma_y \\ \sigma_z & 0 & -\sigma_x \\ -\sigma_y & \sigma_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7.7)$$

$$A_k = I + \frac{\sin\sigma}{\sigma} \sum + \frac{(1 - \cos\sigma)}{\sigma^2} \sum^2 \quad (3.7.8)$$

$$C_s^e(t_{k+1}) = C_s^e(t_k) A \quad (3.7.9)$$

Dermed kan man oppdatere posisjonen og hastigheten ved hjelp av forrige tilstand:

$$x^e(t_{k+1}) = x^e(t_k) + \dot{x}^e(t_k)\delta t + \ddot{x}^e \frac{\delta t}{2} \quad (3.7.10)$$

$$\dot{x}^e(t_{k+1}) = \dot{x}^e(t_k) + \ddot{x}^e \delta t \quad (3.7.11)$$

Den gjennomsnittlige hastigheten på tidsintervallet til IMU'en er avgjørende for hastigheten på disse oppdateringene. Dette betyr at med en høy målefrekvens får man en hyppigere oppdateringsrate av tilstandene enn hva man gjør hvis IMU'en har en lav målefrekvens.

Tidsoppdatering

Neste steg i integrasjonen av en støttesensor er tidsoppdateringen. I treghetsnavigasjon er det normalt at et GNSS-system velges som en støttesensor. GNSS har som nevnt tidligere en betydelig lavere målefrekvens enn hva en IMU har. Som et resultat av dette vil den numeriske integrasjonen gå helt til man får inn en observasjon fra støttesensoren. Dette betyr at man kan få flere hundre oppdateringer basert på numerisk integrasjon fra IMU-observasjonene, før man får inn en fra GNSS. Når man får en observasjon fra støttesensoren vil Kalmanfilteret foreta en tidsoppdatering av kovariansmatrisen. Utgangspunktet for det lineært dynamiske systemet er en første ordens differensialligning. Utledningen av de følgende ligningene kan ses i, Kjørsvik [2010] eller i [Brown and Hwang, 1997].

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)u(t) \quad (3.7.12)$$

Der $x(t)$ er en tilstandsvektoren som inneholder de ukjente tilstandene man ønsker å finne. Matrisene $F(t)$ og $G(t)$ er kjente og som inneholder informasjon om hvordan forholdet mellom de tidligere og nåværende tilstandene fordelt. Variabelen $u(t)$ er en vektor som inneholder *Gaussisk hvit støy*. Ved å løse den kontinuerlige differensialligningen med hensyn på $x(t)$ får man:

$$x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, t')G(t')u(t')dt' \quad (3.7.13)$$

Der $\Phi(t, t')$ er en transisjonsmatrise. Denne matrisen overfører tilstandsvektoren fra tidspunkt t_k til t_{k+1} . Den første leddet sier noe om den foregående tilstanden, mens det andre leddet sier noe om systemets utvikling frem i tid. Denne fremskrivingen av tilstanden fra t_k til t_{k+1} kan skrives som:

$$\Phi(t, t') = e^{F(t-t')} \quad (3.7.14)$$

Videre kan man rekkeutvikle matrisen F ved hjelp av Taylor rekker:

$$\Phi(t, t') = I + F(t-t') + \frac{1}{2!}(F(t-t'))^2 + \frac{1}{3!}(F(t-t'))^3 + \dots + \frac{1}{n!}(F(t-t'))^n \quad (3.7.15)$$

Tidsoppdatering er da gitt som:

$$x_k = \Phi(t_k, t_{k-1})x_{k-1} + w_k \quad (3.7.16)$$

Der w_k sier noe om hvordan støyen hoper seg opp over et gitt tidsintervall.

$$w_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t, t')G(t')u(t')dt' \quad (3.7.17)$$

Kovariansen til w_k er dermed gitt som:

$$Q_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t, \eta)G(\eta)WG^T(\eta)\Phi^T(t, \eta)^T d\eta \quad (3.7.18)$$

Der W sier noe om spektraltettheten til støyen og denne virker som en skalering. Den endelige kovariansmatrisen kan dermed defineres som:

$$P_k = \Phi(t_k, t_{k-1})P_{k-1}\Phi^T(t_k, t_{k-1}) + Q_k \quad (3.7.19)$$

Måleoppdatering

Etter tidsoppdateringen kommer observasjonene fra den eksterne sensoren inn og man foretar en måleoppdatering. Banen (*trajectory*) som gis av et INS vil etter en tid avvike fra den faktiske banen som følge av sensorfeil til IMU'en. Man er da avhengig av observasjonene man får fra de eksterne sensorene for å rette opp i dette. Dette gjøres ved en måleoppdatering hvor både tilstandene og kovariansmatrisen oppdateres som følge av de nye observasjonene. Det brukes da et sett med ligninger for et *Extended Kalman filter (EKF)*, hvor algoritmene prøver å tilfredsstille den lineære tilnærmingen på en tidsvarierende prosess eller en ikke-lineær observasjon [Jekeli, 2001]. Utledningen av EKF ligningene kan ses i [Kjørsvik, 2010] og [Brown and Hwang, 1997].

$$x_k = \tilde{x}_k + \delta x_k \quad (3.7.20)$$

Beskriver sammenhengen mellom a priori (\tilde{x}_k), den sanne tilstanden (x_k) og korrek-sjonen (δx_k). Målingene er gitt av vektoren (z_k) som er relatert til tilstandsvektoren (x_k) ved den ikke lineære funksjonen (h_k), hvor v_k er observasjonsstøy:

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (3.7.21)$$

En lineær tilnærming er gitt ved:

$$\begin{aligned}\delta z_k &= z_k - h(\tilde{x}_k) \\ &= h(x_k) + v_k + h(\tilde{x}_k) \\ &\approx H_k \delta x_k + v_k\end{aligned}\tag{3.7.22}$$

hvor designmatrisen (H_k) er definert:

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\tilde{x}_k}\tag{3.7.23}$$

I motsetning til den lineære versjonen av Kalmanfilteret, blir feilestimatene brukt til å oppdatere tilstanden i et EKF. Det resulterer i at $\delta \tilde{x}_k \equiv 0$. Dette medfører igjen at $x_k = \tilde{x}_k$. Det betyr at tidsoppdateringen til tilstandsvektoren er triviell og kan utelates. De endelige ligningene for *Extended Kalman filter* er dermed definert som:

$$\tilde{P}_k = \Phi_{k-1} \hat{P}_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q\tag{3.7.24}$$

$$\delta \hat{x}_k = K_k \delta z_k\tag{3.7.25}$$

$$\hat{P}_k = (I - K_k H_k) \tilde{P}_k\tag{3.7.26}$$

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T [H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k]^{-1}\tag{3.7.27}$$

Der \tilde{P} er den tidsoppdaterte kovariansmatrisen. K_k kalles for *Kalman gain* og brukes til å vekte modellens estimer mot målingene. En dårlig måling med mye målestøy vil derfor gjøre at Kalmanfilteret vekter ned denne, og man stoler derfor mer på selve systemmodellen. Korreksjonen til tilstandene er gitt ved $\delta \hat{x}_k$ og \hat{P} er den måleoppdaterte kovariansmatrisen.

Det siste steget til EKF algoritmen er å oppdatere tilstandene:

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + \delta \hat{x}_k\tag{3.7.28}$$

Korreksjon av navigasjonstilstanden

Neste steg er å korrigere navigasjonstilstanden ved bruk av de estimerte korreksjonene:

$$\tilde{x}_k^e = \tilde{x}_k^e + \delta \hat{x}_k^e \quad (3.7.29)$$

$$\hat{x}^e = \tilde{x}^e + \delta \hat{x}^e \quad (3.7.30)$$

$$\hat{C}_s^e = (I + \hat{\Psi}^e) \tilde{C}_s^e \quad (3.7.31)$$

Her er systemets orientering definert av $\hat{\Psi}^e = [\hat{\Psi}^e \times]$. I tillegg til at man må korrigere navigasjonstilstandene. Må man korrigere sensorbiasene (\hat{b}_f^s og \hat{b}_ω^s) og tyngdekorreksjonen (\hat{g}^e). Disse korreksjonene medfører at de estimerte tilstandene blir bedre og bedre over tid.

$$\hat{b}_f^s = \tilde{b}_f^s + \delta \hat{b}_f^s \quad (3.7.32)$$

$$\hat{b}_\omega^s = \tilde{b}_\omega^s + \delta \hat{b}_\omega^s \quad (3.7.33)$$

$$\hat{g}^e = \tilde{g}^e + \delta \hat{g}^e \quad (3.7.34)$$

3.7.1 Lineariserte feilligninger

For å kunne bruke rammeverket for det lineærdynamiske systemet, og dermed kunne optimalisere estimeringsteknikken gitt av Kalmanfilteret må man utlede matrisene gitt av den grunnleggende første ordens differensialligningen til systemet:

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)u(t) \quad (3.7.35)$$

Som et utgangspunkt innføres det ett sett med foreløpige verdier. Disse verdiene kalles for *lineært perturberte variabler*. Målet er å estimere en liten korreksjon til de foreløpige verdiene som består av posisjon, hastighet, orientering og instrumentbias. Den fullstendige utledningen kan ses i [Kjørsvik, 2010] og [Farrell, 2008, kap 11.4].

$$\tilde{x}^e = x^e - \delta x^e \quad (3.7.36)$$

$$\tilde{\dot{x}} = \dot{x}^e - \delta \dot{x}^e \quad (3.7.37)$$

$$\tilde{f}^s = f^s + \delta f^s \quad (3.7.38)$$

$$\tilde{\omega}_{is}^s = \omega_{is}^s + \delta\omega_{is}^s \quad (3.7.39)$$

$$\tilde{C}_s^e = (I - \Psi^e)C_s^e \quad (3.7.40)$$

$$\tilde{g}^e = g^e - \delta g^e \quad (3.7.41)$$

Hvor b_f^s og b_ω^s er den sanne feilen til den spesifikke kraften og gyroskopmålingene. Dermed kan man sette inn de perturberte størrelsene inn i ligningene, til henholdsvis posisjon, hastighet og orientering. Dette resulterer i at den perturberte hastighetsligningen blir definert som:

$$\frac{d}{dt}\delta\dot{x}^e = -2\Omega_{ie}^e\delta\dot{x}^e + \Psi C_s^e f^s - C_s^e \delta f^s + \delta g^e \quad (3.7.42)$$

der δg^e er feil for tyngdekorreksjonen, og kan skrives som:

$$\delta g^e = \Gamma^e \delta x^e - \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e \delta x^e + \delta g_\epsilon^e \quad (3.7.43)$$

hvor $\Gamma^e \equiv \frac{\partial g_{att}^e}{\partial x^e}$ og δg_t^e representerer en liten gravitasjonsanomali.

Man trenger også et sett med tilsvarende perturbert ligningssett for orienteringen og for orienteringsfeilen. Tar dermed utgangspunkt i feilligningene for orientering og får følgende ligningssett:

$$\delta\dot{C}_s^e = \delta C_s^e \Omega_{es}^s + C_s^e \Omega_{es}^s \quad (3.7.44)$$

De endelige feilligningene for henholdsvis posisjon, hastighet og orientering er dermed definert som:

$$\frac{d}{dt}\delta x^e = \delta\dot{x}^e \quad (3.7.45)$$

$$\frac{d}{dt}\delta\dot{x}^e = -2\Omega_{ie}^e\delta\dot{x}^e + (\Gamma^e - \Omega_{ie}^e\Omega_{ie}^e)\delta x^e - (f^e \times)\psi^e - C_s^e \delta f^s + \delta g_\epsilon^e \quad (3.7.46)$$

$$\dot{\psi}^e = -\Omega_{ie}^e\psi^e - C_s^e\delta\omega_{is}^s \quad (3.7.47)$$

Disse feilligningene kan settes sammen på en generell matriseform. Denne matrisen knytter sammen alle tilstandene og gir den nødvendige informasjonen for å finne optimal estimering av feiltilstandene.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta x^e \\ \delta \dot{x}^e \\ \psi^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ (\Gamma^e - \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e) & -2\Omega_{ie}^e & -f^e \times \\ 0 & 0 & -\Omega_{ie}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x^e \\ \delta \dot{x}^e \\ \psi^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_s^e & I \\ -C_s^e & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \omega_{is}^s \\ \delta f^s \\ \delta g_\epsilon^e \end{bmatrix} \quad (3.7.48)$$

Kapittel 4

Laserskanning

4.1 Introduksjon

Laserskanning er en kartleggingsteknikk som bruker en laser til å måle avstanden til et objekt på en ønsket overflate. I motsetning til flere tradisjonelle kartleggingsmetoder kan en laserskanner samle inn store mengder data/punkter på kort tid, noe som gjør dette til en svært effektiv måleteknikk. Et sett med laserpunkter kalles for en *punktsky*. Egenskaper knyttet til punktene i punktskyen kan brukes til å trekke ut ønsket informasjon om området som er skannet. I tillegg kan man bruke laserdata i visualiseringsverktøy. I datafangstprosessen er det da vanlig at man har et eller flere videokameraer som er koblet sammen med skannerne og man kan dermed lage en 3D-modell med reelle farger.

En laserskanner gjør observasjoner i et lokalt referansesystem (s-frame) som er definert i forhold til skanneren, på lik linje med de fleste andre sensorer. Observasjonene må transformeres til den ønskede referanserammen som ofte vil være e-frame. Ved bruk av en terrestrisk laserskanner står skanneren i ro på bakken. Alle punktene i samme skann vil da være definert i samme referanseramme. Transformasjonene er derfor ikke så krevende. I de tilfellene hvor laserskanneren er festet på et kjøretøy (*mobile mapping*), vil skanneren være i kontinuerlig bevegelse. Denne bevegelsen fører til at det blir mer krevende å posisjonere/georeferere laserskanneren ved hvert tidspunkt. Dette kan løses ved hjelp av INS med støtte fra GNSS. Da har man muligheten til å rekonstruere kjøretøyets bane (*trajectory*). Ved bruk av denne informasjonen kan man estimere en posisjon for hvert punkt ved hver epoke, og rotasjonen mellom laserskanneren sin referanseramme (s-frame) og kjøretøyets referanseramme (b-frame). Denne rotasjonen kalles for *boresight*, og må bestemmes ved kalibrering. Det er ekstremt viktig at denne komponenten blir estimert og kalibrert korrekt da feil i denne vil forårsake systematiske feil i hele punktskyen.

Det brukes flere ulike skannemekanismer til å flytte laserpulsene over det ønskede området som skal skannes. Hvilken metoden laserskanneren bruker for å projisere laserstrålen er bestemt av hvilken type skanner man bruker og hvilket formål man har med skanningen. Noen av de vanligste metodene er *Oscillerende speil*, *Roterende speil*, *Palmer skanner* og *Glassfibre skanner*. Definisjonen av de ulike metodene kan ses i [Vosselman and Maas, 2010].

4.2 Prinsippet bak laserskanning

Det finnes to ulike metoder for å måle en 3D-overflate ved bruk av en laserskanner. Man kan regne ut tiden lasersignalet bruker på å returnere til sensoren, eller det kan gjøres ved en triangulering. Ved å registrere tiden signalet bruker fra laserskanneren til det blir reflektert, kan man enkelt beregne avstanden. Denne metoden for avstandsmåling kalles for *time-of-flight* eller *LIDAR* (Light Detection and Ranging) målinger.

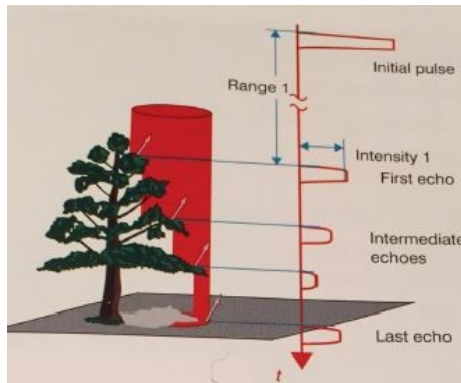
En annen metode er fasemålinger. Denne typen laserskannere sender ut en stråle med vekslende frekvenser. Skanneren registrerer da faseskiftene til strålen når de returnerer fra de ønskede objektene. Denne informasjonen brukes videre til å beregne avstanden [Vosselman and Maas, 2010].

4.2.1 Time-of-flight målinger

Metoden hvor man registrerer tiden signalet bruker på å returnere fra objektet kalles *time-of-flight* målinger. Avstanden (ρ) til objektet kan beregnes basert på tiden (t) det tar fra laserpulsene forlater skanneren til den kommer tilbake. Det er normalt å anta at laserpulsene beveger seg med lysets hastighet i vakuum (c). Dette må korrigeres for brytningsindeksen (n) som er avhengig av temperatur, lufttrykk og fuktighet. Denne avstanden kan beregnes av følgende ligning [Vosselman and Maas, 2010]:

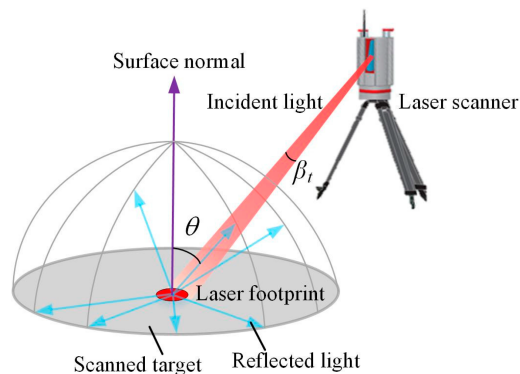
$$\rho = \frac{c t}{n 2} \tag{4.2.1}$$

En del av pulsen fra laserskanneren blir ikke fullstendig reflektert med en gang, noe som resulterer i at man får flere returer fra samme puls. Dette kan være ekstremt nyttig og gir mer informasjon om terrenget, som for eksempel når man skanner trær. Da kan første retur komme fra trekrona, den andre fra grener og den siste returen fra selve bakken se figur 4.2.1.



Figur 4.2.1: Flere returer fra en laserskanning [Vosselman and Maas, 2010].

Området som laseren dekker kalles for *footprint*. Størrelsen på footprintet er avhengig av avstanden fra skanneren til objektet, samt bølglengden og refleksjonen fra laseren. Nøyaktigheten på målingene er avhengig av størrelsen til dette footprintet, der nøyaktigheten blir dårligere med økende størrelse. Dette betyr at jo større avstanden mellom objektet/området og skanneren er, jo dårligere blir resultatet. Informasjonen er mest nøyaktig i sentrum av selve avtrykket, se figur 4.2.2.

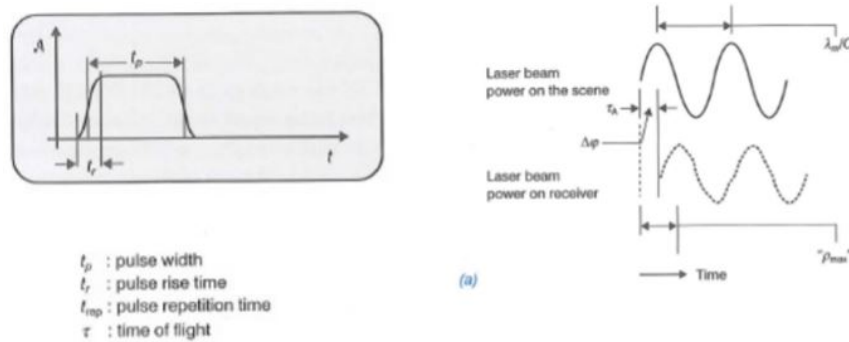


Figur 4.2.2: Footprint til en laserskanner

Begrepet punkttetthet forteller oss noe om hvor detaljert den aktuelle punktskyen er. Det er lettere å definere de ønskede objektene når man har en høy punkttetthet. Det er flere variabler som påvirker denne punkttettheten. Dette er antall laserpulser som sendes ut per sekund og avstanden fra skanneren til objektet er viktige faktorer. Dersom laserskanningen gjøres kinematisk ved mobile mapping eller

flybåren laserskanning, vil også hastigheten til kjøretøyet påvirke nøyaktigheten.

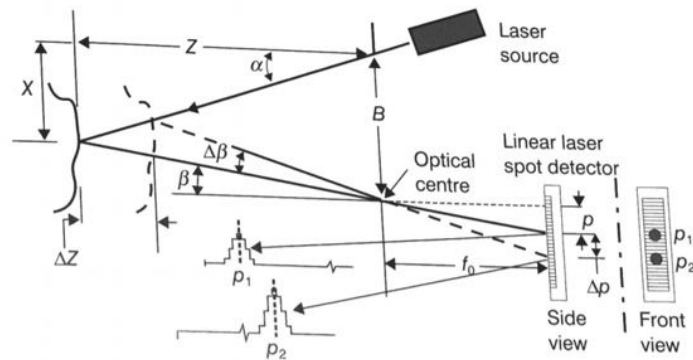
Multipath kan forårsake problemer også i laserskanning. Dette inntreffer når laserpulsene treffer mer enn en overflate før signalet blir returnert. En laserpuls reiser langs den rette linjen mellom skanner og objektet. I tilfeller med multipath bruker signalet lengre tid enn normalt. Dette medfører at punktene vil framstå å være lengre bort fra laserskanneren enn hva det faktisk er. For å klare å detektere alle returene må avstanden mellom pulsene være større enn halve bølgelengden [Vosselman and Maas, 2010], se figur 4.2.3.



Figur 4.2.3: Pulsavstand og returavstand

4.2.2 Trianguleringsbasert måling

Det grunnleggende geometriske prinsippet for en optisk triangulering for en enkel laserstråle kan ses i figur 4.2.4. En laserkilde projiserer en laserstråle på den ønskede overflaten. Lyset som returnerer fra overflaten blir registrert og samlet inn fra et utkikkspunkt i skanneren. Dette lyset fokuseres deretter på en posisjons sensitiv detektor. Man trenger kunnskap om både projeksjon- og innsamlingsvinkelen α og β relativ til baselinjen B . Ved bruk av en trekant kan man triangulere informasjonen og bestemme objektets posisjon på den aktuelle overflaten, [Vosselman and Maas, 2010].



Figur 4.2.4: Enkelt punkts triangulering med en enkel laserstråle, [Vosselman and Maas, 2010].

4.2.3 Stasjonær skanmatching

Det er vanlig at de ønskede områdene eller de viktigste områdene skannes flere ganger. Dette gir en overlapp mellom de forskjellige punkttskyene generert av laserskanneren. Dersom skanneren står i ro må man ha minst tre veldefinerte og gjenkjennbare punkter som kan identifiseres i begge skannene for å klare å matche disse punkttskyene. Målet er å finne koblinger mellom de forskjellige punkttskyene og deretter utnytte informasjonen som ligger i de to separate skannene til å gjøre en bedre og mer nøyaktig kartlegging. Denne prosessen kalles for *skanmatching*.

4.2.4 Kinematisk skanmatching

I tilfellet hvor skanneren er i kontinuerlig bevegelse som for eksempel i mobile mapping, må denne bevegelsen og banen (*trajectory*) estimeres. Laserskanneren er koblet sammen til kjøretøyets bane ved at observasjonene til både skanneren og INS med GNSS er tidsstemplet. Dermed kan ikke nøyaktigheten til punkttskyen være mer nøyaktig enn kjøretøyets bane. I områder med tilstrekkelig god GNSS-dekning kan punkttskyen sin posisjon bli veldig godt definert. Et av de største problemene med kinematisk skanmatching i forhold til stasjonær skanmatching er at orienteringsfeilen og offsets mellom stripene er relativt vanlig. Disse feilene kan skyldes en rekke årsaker som for eksempel feil i banedrift som følge av feil i orientering og posisjon, *boresight* feil som følge av dårlig estimering av avstanden mellom sensorens referanseramme og kjøretøyets referanseramme, eller feil som følge av selve laserskanningen. For å redusere denne feilen må man utføre en stripejustering for å øke nøyaktigheten til punkttskyen

Det finnes flere ulike algoritmer for å gjennomføre denne matchingen mellom over-

lappende striper for mobil mapping og flybåren kartlegging. Den generelle prosedyren er ofte:

1. Finne sammenhengen mellom skanningene og stripene som skal matches; Baren posisjons offset (dx, dy, dz) og orienterings feilene $(d_{roll}, d_{pitch}, d_{heading})$.
2. Justering av punktskyen etter de estimerte offsetene og feilene som ble funnet.

Kapittel 5

Utstyr og Metode

5.1 Introduksjon

Hovedformålet med denne oppgaven er som nevnt i problemstillingen å undersøke om det er mulig å utvikle en mer gunstig metode for kartlegging og posisjonering av jernbanespor, der målingene gjøres mens sensorene er i bevegelse. Dette skyldes at dagens metode ofte er svært tidskrevende og en kinematisk datafangst vil være mer lønnsomt med tanke på arbeidstimer.

I januar 2018 ble det tatt kontakt med fagansvarlig for geomatikk i Bane NOR Jon Haugland for å undersøke hvilke krav og spesifikasjoner som stilles for å gjennomføre arbeid på jernbanen. Det ble raskt konkludert med at Bane NOR synes dette prosjektet var spennende. Videre fikk jeg beskjed om at Bane NOR allerede har startet en diskusjon om hvorvidt det tekniske regelverket bør revurderes. Dette skyldes blant annet at det er en stor økonomisk belastning å opprette nye fastmerker for alle strekningene i Norge. Metodene som brukes i dag er også svært tidskrevende og man trenger flere personell som arbeider i sporet. En løsning der arbeidet går raskere og man trenger mindre personell i sporet, vil være en betydelig fordel for Bane NOR. Det er derfor et mål at denne oppgaven kan bidra i prosessen med å revurdere dagens regelverk med tanke på hvilke metoder som kan brukes.

5.2 Sensorer som ble brukt

Ettersom Bane NOR stiller ekstremt strenge krav til nøyaktighet og presisjon på posisjoneringen setter dette en del begrensinger på hvilke typer sensorer som kan og må brukes i dette prosjektet. De ulike typene sensorer som er brukt i denne oppgaven vil bli presentert i avsnittene under.

5.2.1 GNSS

Den absolutte posisjoneringen av plattformen (måletrallen) er et viktig element. GNSS-antennen er utgangspunktet for posisjoneringen. Denne informasjonen brukes deretter til å bestemme den absolutte posisjonen til IMU sitt sentrum, som videre brukes til å posisjonere laserdataen.

Valget av antennen falt på Septentrio PolaNt-x MF se figur 5.2.1. Septentrio er en liten og lett multifrekvent GNSS-antenne med en vekt på 450 gram. Denne antennen registrerer signaler fra alle typer GNSS, slik at man kan utnytte alle de fire store systemene GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou til å bestemme den absolutte posisjonen. Alle spesifikasjonene til Septentrio PolaNt-x kan ses i [Septentrio, 2010]. Et annet element vi ønsket å teste i denne oppgaven er om bruk av de nye satellittsystemene slik som Galileo og BeiDou ville påvirke nøyaktigheten. Ved å bruke denne antennen kan man undersøke denne effekten



Figur 5.2.1: Septentrio PolaNt-x

5.2.2 INS

I dette prosjektet ble det brukt et INS av typen *Applanix APX-15*, se figur 5.2.2. APX-15 består av en solid sate MEMS IMU med en mulig observasjonsrate opp til 200 Hz. I tillegg til dette har den en multifrekvent GNSS-mottaker. Dette betyr at APX-15 utnytter signalene fra alle GNSS-systemene. De fire store systemene utnyttes, samt at APX-15 har muligheten til å bruke signal fra støttesystemene QZSS og SBAS. APX-15 er opprinnelig designet for bruk i droner, noe som betyr at enheten er veldig liten og veier bare 60 gram. Ved etterprosessering kan man oppnå en RMS nøyaktighet for posisjonen på 0,02–0,05m. Nøyaktigheten i *roll* og *pitch* gitt i grader er 0,025°, mens for *heading* er nøyaktigheten 0,080. Fullstendig spesifikasjon for APX-15 kan ses på [Trimble, 2017].

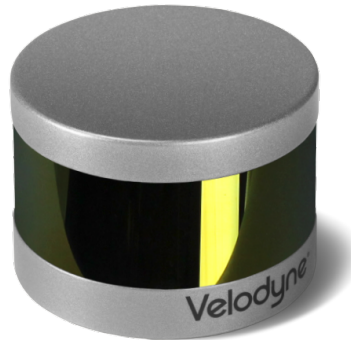


Figur 5.2.2: Applanix APX-15 [Trimble, 2017].

5.2.3 Laserskanner - VLP-16

I denne oppgaven er det brukt en puck (mini) laserskanner av typen, *VLP-16* levert av *Velodyne LiDAR*. Valget av denne typen skanner skyldes størrelsen og pris. *VLP-16* er formet som en liten puck og veier bare 830 gram, se figur 5.2.3. Grunnflaten har en diameter på 103 mm og en høyde på 72mm. De fullstendige dimensjonene kan ses i [Velodyne, 2015]. Selv om skanneren er liten kan den registrere opp mot 300 000 punkter per sekund. Det ble konkludert med at denne størrelsen var mest gunstig i dette prosjektet, ettersom målet er å teste om en liten og billig skanner kan gi tilfredsstillende informasjon om sporets geometri, og tilfredsstillende Bane NOR sine krav til nøyaktighet.

Skanneren inneholder 16 individuelle kanaler som brukes til å sende ut pulsstråler. Disse kanalene er separert med en avstand på 2° . Dette gir skanneren en vertikal *field of view (FOW)* på 30° . Alle disse 16 kanalene roterer kontinuerlig, noe som resulterer i at *VLP-16* sin horisontale *FOW* er på 360° . Rotasjonshastigheten er 5-20 rotasjoner per sekund. Denne hastigheten kalles for *skanraten*. Avstanden fra skanneren sitt referansepunkt til den reflekterte avstanden blir beregnet ved bruk av *time of flight*-metoden. Uten noen spesiell kalibrering har denne skanneren en nøyaktighet på $\pm 3\text{cm}$.



Figur 5.2.3: Velodyne LiDAR PUCK VLP-16 [Velodyne, 2015].

5.2.4 Målesekk

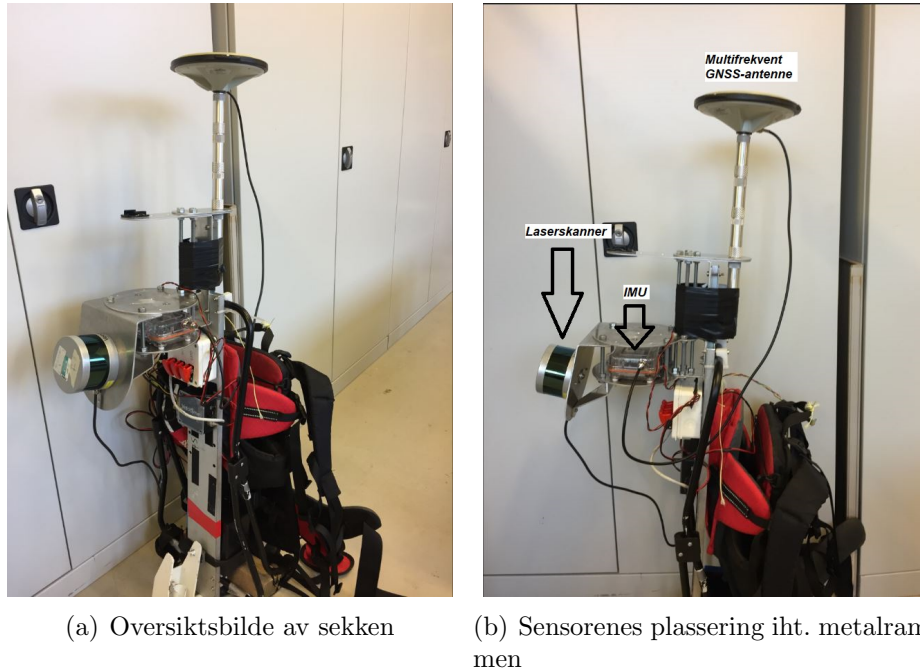
For å kunne bruke alle disse ulike sensorene integrert måtte de monteres sammen i en eller annen form. For å spare tid og penger ble det bestemt at vi skulle bruke en bæremeis utviklet av Ivar Oveland ved NMBU, se figur 5.2.4.

Målesekken er i utgangspunktet utviklet for kartlegging av trær. Ettersom denne oppgaven skal undersøke muligheten for å bruke et lite og fleksibelt system, samt utnytte at kartleggingen skjer mens man er i bevegelse, ble det konkludert med at denne målesekken var mest gunstig å bruke. Dette skyldes i hovedsak at den allerede var bygget og hadde mulighet til å bruke alle de nødvendige sensorene.

Målesekken består av en tradisjonell bæremeis fra Bergans. Det er fastmontert en spesiallaget metallramme til selve bæremeisen. Denne metallrammen er utviklet for å kunne ha flere ulike typer sensorer påmontert. Dette lar brukeren velge hvilke og hvor mange sensorer man ønsker å bruke. Fordelen med denne bæremeisen er at man kan teste flere sensorer samtidig. Dermed har man både et lite komprimert system, og man kan gjøre kinematiske målinger. Det er selvfølgelig fastmontert et batteri i metallrammen, slik at de aktuelle sensorene har en strømtilførsel. Dette resulterer i at når man har koblet til de aktuelle sensorene, er det bare å ta sekken på ryggen og gå ut å måle.

I denne oppgaven har det vært fastmontert en GNSS-antenne av typen Septentrio PolaNt-x MF som var festet i et mellomstykke på toppen av metallrammen. Det er viktig at avstanden mellom laserskanneren og GNSS-antennen er minimum 0,5 meter. Dette skyldes at dersom avstanden er kortere vil laserpulsene fra skannere påvirke signalet som antennen mottar. Fordi vi fikk beskjed om dette før vi startet ble dette aldri et reelt problem. I tillegg til antennen, er Applanix APX-15 montert

i en liten boks som også er godt beskyttet og fastmontert til metallrammen. Til slutt er det montert en Velodyne VLP-16 skanner på den vertikale flaten til rammen. Det ble valgt å bruke den vertikale flaten ettersom oppgaven var å undersøke jernbanesporets geometri.



Figur 5.2.4: Målesekken med de fastmonterte sensorene

5.3 Datainnsamling og feltarbeid

I denne oppgaven er det brukt to ulike datasett. Det ene er samlet inn av TerraTec sine mobile mapping kjøretøy. Det andre datasettet er samlet inn ved bruk av målesekken med fastmonterte sensorer.

5.3.1 Ekstra datasett fra Lynx Mobile Mapper

Det ble tidlig i prosessen konkludert med at det kunne bli problematisk å få samlet inn nok data med de aktuelle sensorene til bruk i denne oppgaven. Det ble derfor bestemt å bruke et eksisterende datasett i tillegg til datasettet samlet inn ved bruk av målesekken. Det eksterne datasettet er samlet inn med et av TerraTec sine mobile mapping kjøretøy med systemet Lynx Mobile Mapper, se figur 5.3.1. Dette datasettet ble valgt for å undersøke effekten av de nye satellittsystemene.

Datasettet som ble brukt er samlet inn mellom Kongsvinger og Hamar. Følgende argumentasjon ble brukt for valg av datasett fra Lynx Mobile Mapper. I et kinematisk datasett fra mobile mapping har man betydelig høyere hastigheter enn dersom man går til fots. Dette betyr at man kan teste effekten av observasjoner under høye hastigheter. Samtidig er geometri langs veien og jernbanen liknende, selv om systemet vil være enda mer låst med tanke på skinnen på jernbanen enn hva det er på en vei. I tillegg er vegetasjonen langs veien representerbar i forhold til vegetasjonen langs en jernbanestrekning.

Dette systemet består av flere instrumenter og sensorer som kan brukes til flere ulike formål. For eksempel kartlegging av vei, jernbane og byområder. Dette systemet har et navigasjonssystem av typen POSLV 610 levert av Applanix ¹. Dette systemet inneholder to separate multifrekvente GNSS-antennener og en IMU som brukes til å bestemme den absolutte posisjonen. Ved etterprosessering kan man oppnå en RMS-nøyaktighet for posisjonen på 0,02 – 0,05m. Nøyaktigheten i *roll* og *pitch* gitt i grader er 0,005°, mens for *heading* er nøyaktigheten 0,015. Spesifikasjonene kan ses i [Trimble, 2016].

I tillegg til dette har systemet en laserskanner av typen Optech Lynx Mobile Mapper SG1 ². Denne laserskanneren har to skråstilte skannere som til sammen kan registrere opp mot 1,2 millioner punkter per sekund. I tillegg til disse skannerne har systemet flere kameraer som brukes for å gi en bedre oversikt over det aktuelle området. Til slutt er det montert et odometer på venstre bakhjul. Dette brukes som en støttesensor og gir informasjon om tilbakelagt kilometerstand og hvorvidt bilen står i ro.

I denne oppgaven er det kun brukt GNSS- og INS-løsningen fra dette systemet. Dette skyldes at laserskannersystemet ikke faller innenfor kriteriene i denne oppgaven med tanke på pris og størrelse. Men det er fremdeles mulig å undersøke effekten av flere navigasjonssystemer i et tilnærmet likt miljø som man opplever på jernbanen.

¹https://www.applanix.com/pdf/specs/POSLV_Specifications_dec_2015.pdf

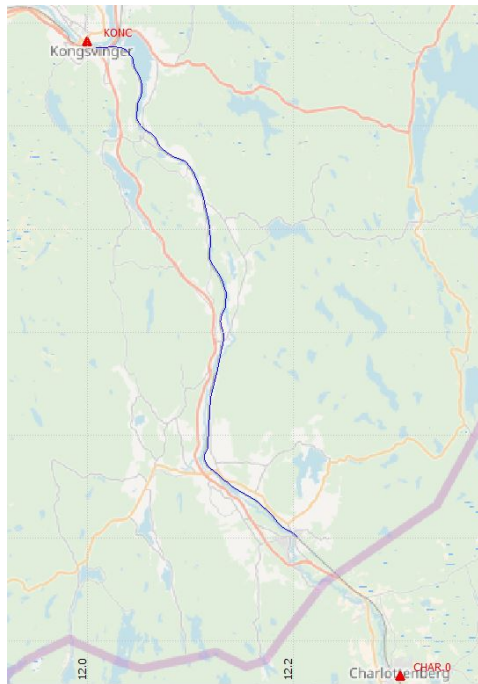
²http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/specification_lynx-sg1.pdf



Figur 5.3.1: Optech Lynx Mobile Mapper SG1

5.3.2 Feltarbeid

Datasettet som er samlet inn ved bruk av alle sensorene montert i målesekken ble samlet inn 27.mars 2018 på Kongsvingerbanen. Den aktuelle strekningen går østover mot Riksgrensa med start ved tømmerterminalen i Kongsvinger hvor Bane NOR har et vedlikeholdssenter. Det ble deretter kjørt en tur/retur på strekningen fra tømmerterminalen i Kongsvinger til Magnor Stasjon, se figur 5.3.2.



Figur 5.3.2: Oversikt over kartlagt strekning med målsekken. Kongsvinger - Mag-nor

Gjennomførelsen

Ett av de store problemene med kartlegging og posisjonering av jernbanespor er tilgangen til selve sporet. Ettersom det ikke er ønskelig å ha personell vandrende i sporet, ble det konkludert med at jeg måtte prøve å få tilgang til spor og være med på en kjøring med klassifisert personell. Etter hjelp fra Jon Haugland i Bane NOR fikk jeg tilgang til Kongsvingerbanen i begynnelsen av påsken 2018 i forbindelse med maskinell visitasjon. Dermed ble målsekken fastmontert til en lastetraktor av typen Rombel, se figur 5.3.3.



Figur 5.3.3: Rombel lastetraktor

Dagen før datafangsten ble det gjennomført en liten test av målesekken på NMBU. Der ble alle de ulike sensorene montert korrekt på. Videre ble det testet at alle sensorene logger korrekt data på korrekt frekvens. Dette gjøres ved hjelp av en initialisering der alle sensorene skrus på før man tar målesekken på ryggen og går et lite område. Da vil man etter hvert få beskjed om at GNSS-antennen har fått fix-løsningen og at IMU logger data, noe som betyr at sensorene er klare til bruk. Denne initialiseringen må gjøres hver gang utstyret skrus på.

På selve måledagen måtte denne initialiserings prosessen gjentas, før laserskanneren også ble skrudd på. VLP-16 skanneren gir flere valgmuligheter med tanke på rotasjonshastighet. Denne hastigheten ble satt til 1200 rotasjoner per minutt (rpm). Etter at målesekken var kontrollert og alle sensorene virket, ble målesekken festet til en fastmontert kasse på en tilhenger foran lastetraktoren. Her ble målesekken plassert slik at laserskanneren hadde god sikt til jernbanesporene. Når alt dette var gjort og målesekken var forsvarlig festet, startet første kjøring fra Kongsvinger ut mot Magnor.

Da vi ankom Magnor ble det et litt lengre stopp før vi skulle kjøre tilbake. Under dette stoppet ble målesekken kontrollert. Det viste seg da at en av stroppene hadde skrudd av strømmen til INS og GNSS-mottakeren. Dette resulterte i at det ikke ble

logget noen posisjonsdata på denne kjøringen, verken fra GNSS-antennen eller fra IMU observasjonene. Dermed måtte det foretas en ny initialisering. Denne gangen sto målesekken fastmontert mens lastetraktoren kjøre fram og tilbake 10 meter om gangen helt til utstyret logget korrekt data. Deretter ble rotasjonshastigheten til laserskanneren skrudd ned til 600 rpm. Dette ble gjort for å kunne teste en høy og en lav rotasjonshastighet opp mot hverandre. Etter at jeg hadde dobbeltsjekket at alle sensorene var på og logget riktig, ble det kjørt tilbake fra Magnor til Kongsvinger. På grunn av en streng timeplan for personellet som driver med vedlikehold ble målesekken tatt av tilhengeren og målingene avsluttet. Denne gangen gikk alt som det skulle, og det er dette datasettet som er brukt videre i oppgaven.

Kapittel 6

Resultater

6.1 Introduksjon

I dette kapitlet vil jeg ta for meg de ulike spørsmålene som problemstillingen reiser. Spørsmålene vil bli presentert og undersøkt ved bruk av innsamlet data. Til slutt vil jeg vurdere om resultatene er gode nok til å tilfredstille kravene som er satt.

Programvarer

For å beregne kjøretøyets og målesekkens sin tradjectory (bane) er det benyttet TerraPos. TerraPos er utviklet av Dr. Narve Kjørsvik og TerraTec AS. TerraPos er et toppmoderne prosesseringsverktøy for GNSS/INS løsninger, og brukes i hovedsak til å bestemme kjøretøyets bane.¹

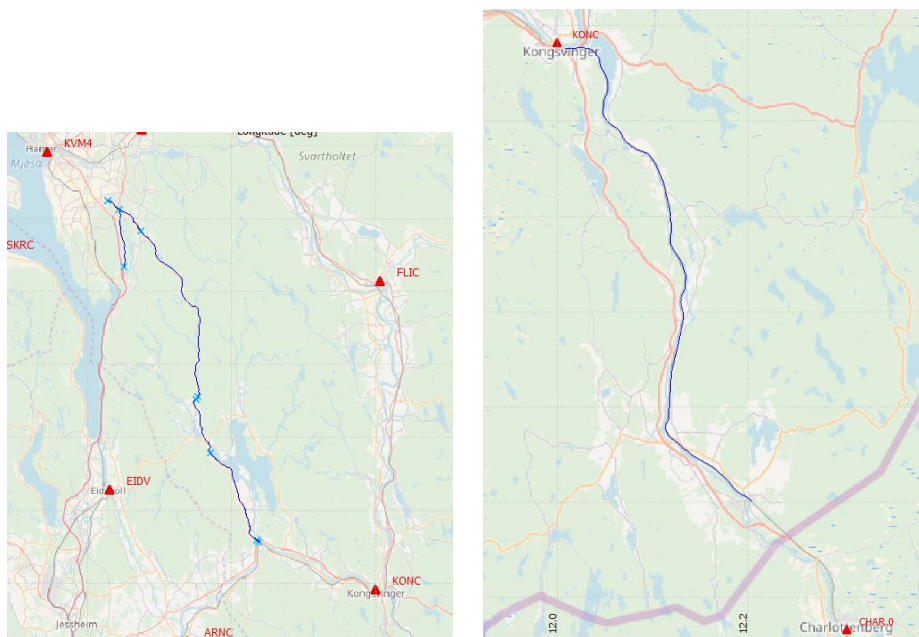
Laserdataen er georeferert ved bruk av TerraPos. Den georefererte punktskyen er videre prosessert i TerraMatch og TerraScan. TerraMatch og TerraScan er en del av Terrasolid programvaren og brukes til å jobbe med punktskyer og laserdata.

¹https://www.terratec.no/terra-pos/cms/125/72/hent_artikkel/46

6.2 Nye satellittsystem

I dette delkapittelet vil jeg presentere og drøfte effekten av å utnytte de nye satellittsystemene ved bruk av en multi-frekvent GNSS-mottaker. Det ønskede resultatet av denne undersøkelsen er at ved å ta i bruk de nye satellittsystemene, Galileo og BeiDou, vil man kunne få en bedre satellittgeometri og en forbedring i nøyaktigheten. Dette gjelder spesielt i områder hvor det å kun bruke GPS og GLONASS ikke er tilstrekkelig. I områder hvor det allerede er bra med GPS og GLONASS vil de nye systemene trolig ha liten innvirkning.

For å undersøke dette er det brukt to ulike datasett. Det første er fra TerraTec sitt Lynx Mobile Mapper system. Dette datasettet er samlet inn på vei den 12.oktober 2017 mellom Kongsvinger og Hamar, se figur 6.1(a). Spesifikasjonene for dette systemet kan ses i delkapittel 5.3.1. Det andre datasettet er samlet inn med målesekk på jernbane den 27.mars 2018 mellom Kongsvinger og Magnor ved Riksgrensa se figur 6.1(b). Spesifikasjonene for dette systemet kan ses i delkapittel 5.2.4.



(a) Lynx Mobile Mapper, Kongsvinger-Hamar

(b) Målesekk, Kongsvinger-Magnor

Figur 6.2.1: Oversikt over kartlagt strekning med de forskjellige sensorsystemene

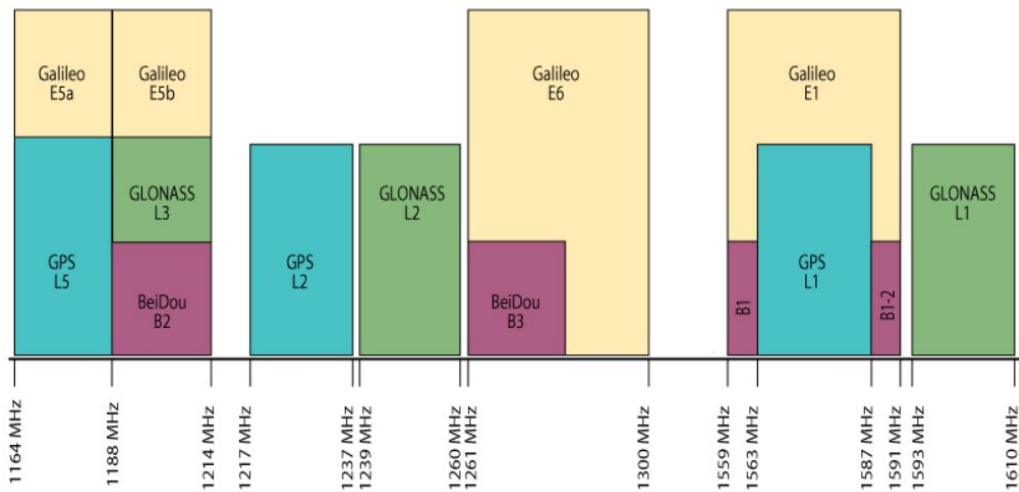
En av de store fordelene ved å bruke multi-frekvente mottakere som kan regist-

rere signaler fra alle GNSS er at man har tilgang til betydelig flere satellitter. Ved kun å bruke GPS og GLONASS har man potensielt 30 GPS-satellitter og 24 GLONASS-satellitter, noe som gir et maksimalt antall på 54 satellitter. Ettersom alle satellittene går i bane rundt jorda vil man aldri ha tilgang til alle på samme tidspunkt. Ved å ta i bruk Galileo sine 18 og BeiDou sine 26 satellitter øker det totale antallet satellitter til 98. Satellittbanen spiller også en viktig rolle med tanke på satellittgeometri. Flere av BeiDou sine satellitter er geostasjonære noe som medfører at disse står lavt på horisonten og man har dermed ikke sikt til disse i Norge. Selv en liten økning i antall satellitter kan føre til et forbedret resultat.

En annen stor fordel ved å ta i bruk de nye satellittsystemene er det overlappende frekvensdomenet. Dette gjelder spesielt for GPS og Galileo. Figur 6.2.2 viser en oversikt over hvilke frekvens de ulike GNSS sender sine respektive signaler på. Dette kan også medføre at fremtidige produsenter, spesielt for det europeiske markedet, velger å lage mottakere som ikke benytter GLONASS sitt signal. Dette som følger av at GPS og Galileo har overlappende frekvensdomene.

En tredje fordel ved å bruke multi-frekvente GNSS-mottakere er at dette er den mest effektive måten å eliminere de atmosfæriske forstyrrelsene på. De atmosfæriske feilene er avhengig av frekvensen til signalet, noe som betyr at GNSS-signalene på de ulike frekvensene vil påvirkes forskjellig. Ved å sammenligne forsinkelsen mellom to ulike signaler kan man korrigere for denne påvirkningen. Dersom man kombinerer signalet fra samme frekvensdomene kan man danne dobbel- og trippelfrekvente løsninger mellom de ulike satellittene. Dette forbedrer nøyaktigheten i både målinger og posisjonering. En annen fordel ved å bruke en multi-frekvent mottaker er at dersom et signal blir blokkert, for eksempel som følge av ”jamming” eller en teknisk feil, vil mottakeren mest sannsynlig kunne bruke signalet fra de andre frekvensdomenene.

Ved å kombinere signalet fra flere ulike systemer åpner det seg også en mulighet for å danne dobbelt- og trippelfrekvente løsninger. For at dette skal la seg realisere må man ha en satellitt-geometri hvor man har tilgang til minst 5 satellitter som sender ut på alle de tre frekvensområdene til det aktuelle systemet. Dersom dette er tilfellet kan man danne en trippelfrekvent som gjør det mulig å eliminere forstyrrelser fra ionosfæren, multipath og trackingfeil av satellittene. I tillegg til dette tilsvare de trippelfrekvente løsningene til den lineære kombinasjonen av flertydigheten. Disse kan dermed brukes for å beregne heltallet til faseobservasjonen.



Figur 6.2.2: Frekvensdomenet til GNSS

Påstanden om at observasjonene blir bedre ved bruk av de nye satellittsystemene blir illustrert ved hjelp av de prosesserte datasettene i denne oppgaven.

6.2.1 Lynx Mobile Mapper

Plottene under er fra det prosesserte datasettet som er samlet inn med Lynx Mobile Mapper. Det er gjort flere ulike prosesseringer, hvor jeg har testet ulike kombinasjoner av satellittsystemene for å undersøke problemstillingen. I det følgende delkapittelet vil jeg presentere et utvalg av disse resultatene.

Hele datasettet fra Lynx Mobile Mapper

I den første prosesseringen er alle GNSS systemene bruk. Dette vil si at man har brukt signalet fra GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou. Det overordnede resultatet kan ses i tabell 6.2.3. Der ser man at i 99 % av tilfellene vil man ha et standardavvik på den horisontale nøyaktigheten på 0.033 meter og 0.039 meter på den vertikale nøyaktigheten. Tabellen viser også at orienteringsfeilen til roll, pitch og heading er henholdsvis 0.004, 0.004 og 0.018 grader. Disse resultatene samsvarer godt med spesifikasjonene til systemet som er beskrevet i delkapittel 5.3.1.

NAVIGATION PERFORMANCE SUMMARY									
		Min.	1%	5%	50%	95%	99%	Max.	
Pos. hor.	std. dev.	0.012	0.012	0.013	0.019	0.030	0.033	0.049	[m]
Pos. vert.	std. dev.	0.015	0.015	0.016	0.024	0.035	0.039	0.050	[m]
Vel. hor.	std. dev.	0.004	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	[m/s]
Vel. vert.	std. dev.	0.003	0.003	0.003	0.005	0.006	0.006	0.008	[m/s]
Roll	std. dev.	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	[deg]
Pitch	std. dev.	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	[deg]
Heading	std. dev.	0.008	0.008	0.008	0.009	0.013	0.016	0.018	[deg]

Figur 6.2.3: Lynx navigasjonsløsning GNSS

I tillegg til nøyaktigheten på systemet er vi også interessert i hvor ofte man har god nok GNSS-dekning. Dette illustreres av figur 6.2.4. Denne figuren viser at i løpet av hele datasettet var det 13 477 epoker. Siden observasjonene er gjort ved bruk av differensiell GNSS (DGNSS) er det av interesse å undersøke, antallet baselinjer det er mellom en referansestasjon og mottakerne på bilen. Dette resultatet er gitt i % av hele datasettet. I dette datasettet var det 0,8 % av observasjonene som hadde null baselinjer. Det er flest epoker med fire baselinjer og i 5,6 % av tilfellene har man hele seks baselinjer.

I de 104 epokene der det ikke er noen fixedbaselinjer har ikke systemet fix. Problemet med kun å se på dette tallet er at det ikke gir informasjon om hvordan denne dårlige GNSS-dekningen er fordelt i løpet av kjørestrekningen. Alle de dårlige epokene kan komme fortløpende, eller de kan være jevnt fordelt utover hele datasettet. Dette kan kontrolleres ved å se på tabellen "Time to closest fix" i samme figur. Denne statistikken representerer et "worst casescenario. Det mest interessante er å se hvordan datasettet er i 99 % av tilfellene. Tallet i denne kolonnen forklarer hvor stor avstand en observasjon uten fix har til den nærmeste observasjonen med fix. I 99 % av tilfellene i dette datasettet vil nærmeste observasjon uten fix være 0 sekunder ifra nærmeste observasjon med fix-løsning. Det kan dermed konkluderes at dette er et ekstremt godt datasett når vi bruker alle de store satellittsystemene. Dette innebærer at man ikke vil være uten GNSS-dekning lenge nok til at det vil skape problemer for navigasjonsløsningen.

```

-----
OVERALL SOLUTION SUMMARY
-----

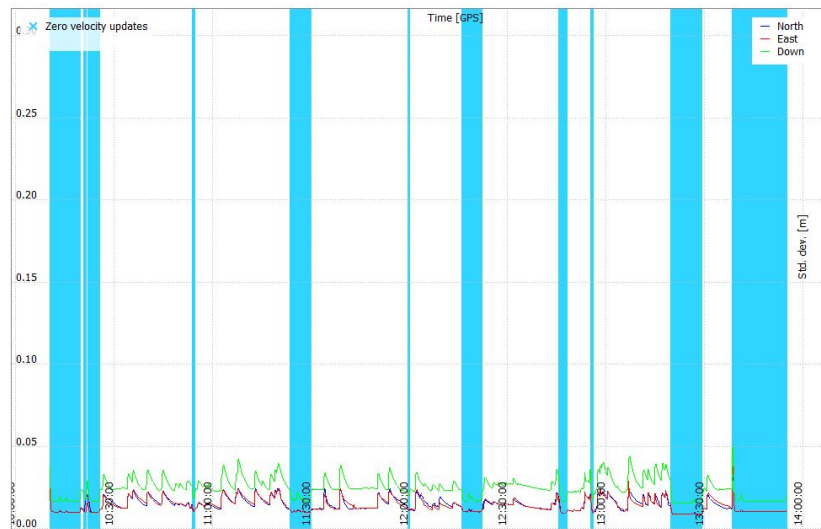
# Fixed baselines    # epochs    % of total
-----
0                    104         0.8
1                     87         0.6
2                    223         1.7
3                   2533        18.8
4                   8988        66.7
5                     791         5.9
6                     748         5.6

Time to closest fix
-----
Median      :    0 s
Upper 75 % :    0 s
Upper 95 % :    0 s
Upper 99 % :    0 s

```

Figur 6.2.4: DGNSS løsning for Lynx datasettet med bruk av GPS, GLONASS, Galileo & BeiDou

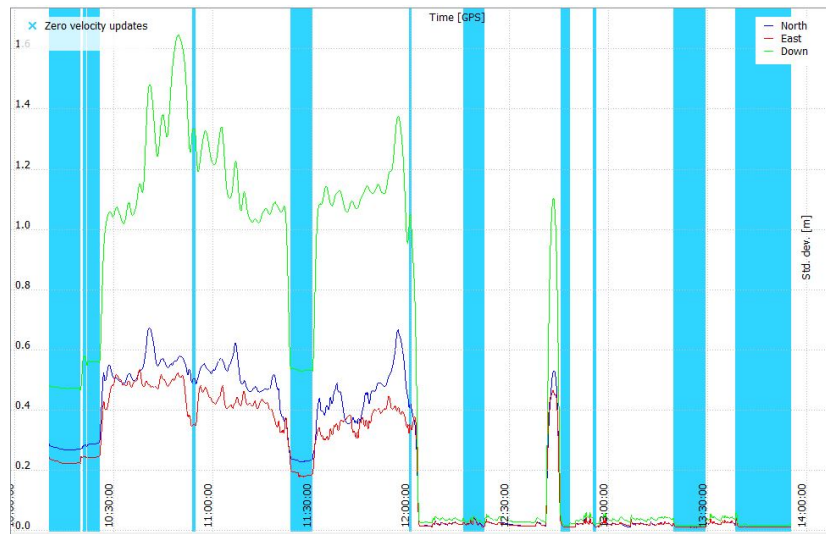
For å illustrere at de dårlige epokene er spred over hele datasettet brukes et plott for dette, se figur 6.2.5. De lyseblå feltene representerer områder uten fix. Standardavviket til posisjonen er representert ved tre ulike grafer. Den vertikale feilen er markert i grønt (down”), men den horisontale feilen er markert i mørke blå og rød (north” og east”). Dersom vi sammenligner variasjonen på standardavviket i denne figuren ser vi at de sammenfaller bra med resultatet som er vist i figur 6.2.3. Det underbygger konklusjonen med at dette er et ekstremt bra datasett dersom vi bruker alle satellittsystemene.



Figur 6.2.5: Lynx posisjons nøyaktighet GNSS

For å undersøke effekten av de nye satellittsystemene ble det benyttet samme datasett. I de nye etterprosesseringsene av datasettet ble det satt begrensninger på hvilke satellittsystemer som var med i prosesseringen for å undersøke påvirkningen.

I det følgende avsnittet vil jeg gjøre rede for hvordan navigasjonsløsningen blir ved kun å bruke signal fra GLONASS. Fokuset er fremdeles på hvordan datasettet er i 99 % av tilfellene. Standardavviket på posisjonen i horisontal retning ble dermed 0.782 meter og i vertikal retning ble det 1.606 meter. Mens et standardavvik på orienteringen var 0.003 grader for roll og pitch og 0.024 grader for headingen. Den differensielle løsningen forteller at i hele 57.3 % av tilfellene var det ikke fix-løsning og dermed ingen baselinjer. I 99 % av tilfellene er det hele 6577 sekund mellom to observasjoner med fix-løsning. Figur 6.2.6 viser at selv om fasebruddene er under de samme tidsepokene som ved bruk av alle satellittsystemene blir standardavviket til posisjonen betydelig dårligere. Dette skyldes satellitt-geometrien.



Figur 6.2.6: Lynx posisjons nøyaktighet GLONASS

Ved å bruke signalene fra Galileo i tillegg til GLONASS ble det en betydelig økning i posisjons- nøyaktigheten. Dette ga et standardavvik på den horisontale posisjonen i 99 % av tilfellene på 0.035 meter, noe som er en forbedring på 74.7 cm. Den vertikale posisjonen ble i dette tilfellet 0.042 meter. Orienteringen er også blitt bedret der roll og pitch har et standardavvik på 0.003 grader mens heading har 0.022 grader.

Signalet fra GPS ble også prosessert alene. Dette ga et bedre resultat enn ved bruk av bare GLONASS, men ikke like bra som kombinasjonen mellom GLONASS og Galileo. Ved å kun bruke GPS ble det i 99 % av tilfellene et standardavvik på 0.049 meter i posisjonens horisontale retning og 0.051 meter i vertikal retning. Roll og pitch ga et standardavvik på 0.004 gradens, mens heading ga et standardavvik på 0.021 grader. I DNGSS løsningen var det ikke fix i 6.7 % av tilfellene. Dette tilsvarer 5 sekunder mellom observasjoner med fix-løsning i 99 % av tilfellene.

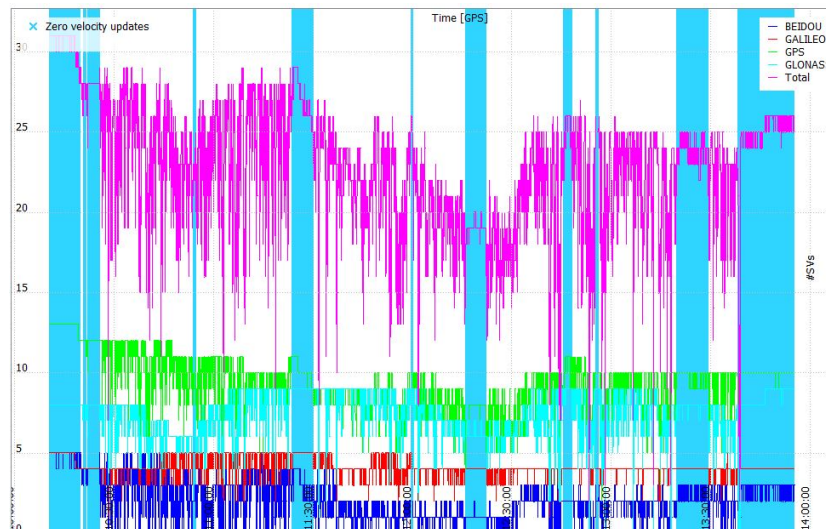
Ved å kombinere GPS og Galileo ble også dette resultatet bedre. Da ble standardavviket til posisjonen 0.033 meter i horisontalretning og 0.041 meter i vertikalretning. Tilsvarende roll og pitch har et standardavvik på 0.004 gradens og heading har 0.021 grader.

Til slutt ble kombinasjonen av GPS og GLONASS testet. Dette er den vanligste kombinasjonen som brukes i dag. I 99 % av tilfellene ga denne løsningen et standardavvik på den horisontale posisjonen på 0.032 meter og 0.041 meter i ver-

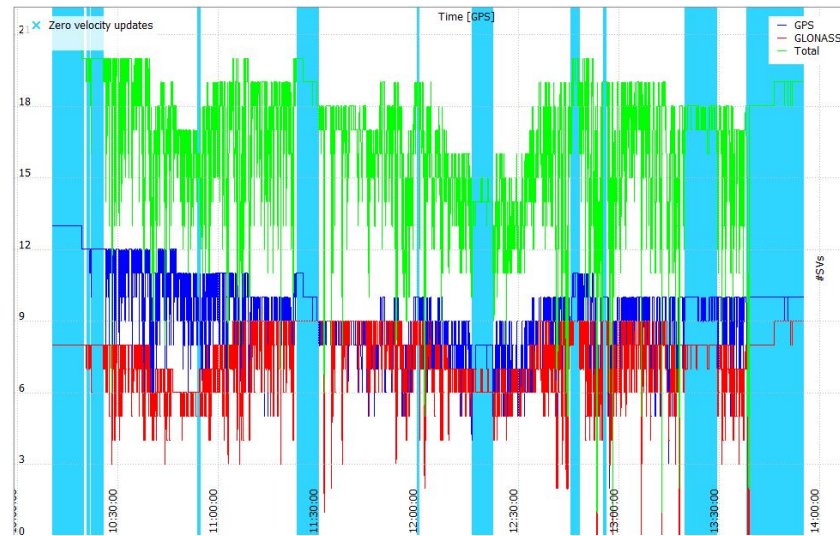
tikalretning. Standardavviket til orienteringen var henholdsvis 0.004 grader for roll og pitch og 0.016 grader for headingen. Resultatet fra DGNSS løsningen viser at det var 114 epoker uten fix, noe som tilsvarer til 0.8 %. Dette resulterer at i 99 % av tilfellene er det mindre enn 0 sekunder til nærmeste observasjon med fix-løsning.

Selv om differansen mellom å bruke alle systemene og ved kun å bruke GPS og GLONASS er minimal, er effekten av å bruke Galileo i kombinasjon med GPS eller GLONASS enorm. Dette underbygger også hypotesen om at i de områdene hvor det er bra nok med GPS og GLONASS vil effekten av flere systemer ikke ha noen stor effekt på nøyaktigheten. Det har vist seg at dette datasettet fra Lynx Mobile Mapper er et ekstremt bra datasett. Påvirkningen av Galileo ville trolig vært større i områder hvor man hadde problemer med kun å bruke GPS og GLONASS. Dette kan illustreres ved å se på hvor mange satellitter som er tilgjengelig i de to ulike kombinasjonene.

Det er verd å merke seg at eventuelle satellitter man har sikt til men som er for dårlige til å brukes automatisk utelates av TerraPos. I figur 6.2.7 er det totale antallet satellitter representert med den lilla grafen. I figur 6.2.8 er det totale antallet satellitter representert ved den grønne grafen. Det kommer tydelig fram at det er flere tilgjengelige satellitter ved å utnytte alle systemene, enn kun å bruke GPS og GLONASS.



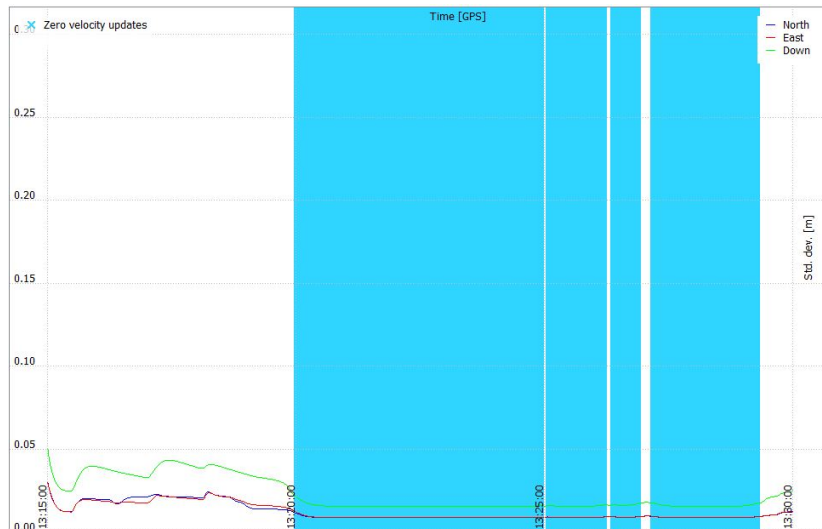
Figur 6.2.7: Antall satellitter GNSS



Figur 6.2.8: Antall satellitter GPS + GLONASS

Utvalgt del fra Lynx Mobile Mapper

I tillegg til å bruke hele datasettet fra Lynx Mobile Mapper har jeg også valgt ut en dårligere del av datasettet for å undersøke om bruken av de nye systemene vil bedre resultatet. Tidsrommet for dette datasettet er mellom 13:15 og 13:30. Dette innebærer at store deler av datasettet ikke har fix-løsning, se figur 6.2.9. Dette datasettet er prosessert på samme måte som det forrige datasettet hvor man utnyttet hele tidsperioden. Det er også brukt de samme satellitt kombinasjonene.



Figur 6.2.9: Utvalgt dårlig del Lynx 13:15-13:30

I den første kombinasjonen av satellittsystemer brukes alle tilgjengelige GNSS. Navigasjons- nøyaktigheten i 99 % av tilfellene ved bruk av alle de fire store systemene gir følgende resultat, se figur 6.2.10. Standardavviket til den horisontale posisjonen er 0.033 meter og 0.043 meter i vertikalretning. Roll og pitch har et standardavvik på 0.004 grader mens headingen opererer på 0.019 grader. Dersom man sammenligner dette med resultatet fra hele datasettet ser man at nøyaktighet en litt dårligere, men ikke nok til å skape problemer. Bruker derfor denne løsningen som en fasit for det korte tidsintervallet.

NAVIGATION PERFORMANCE SUMMARY									
		Min.	1%	5%	50%	95%	99%	Max.	
Pos. hor.	std. dev.	0.012	0.012	0.012	0.012	0.030	0.033	0.042	[m]
Pos. vert.	std. dev.	0.015	0.015	0.015	0.016	0.040	0.043	0.050	[m]
Vel. hor.	std. dev.	0.004	0.004	0.004	0.004	0.006	0.007	0.008	[m/s]
Vel. vert.	std. dev.	0.003	0.003	0.003	0.003	0.006	0.006	0.008	[m/s]
Roll	std. dev.	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	[deg]
Pitch	std. dev.	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	[deg]
Heading	std. dev.	0.012	0.012	0.012	0.014	0.018	0.019	0.019	[deg]

Figur 6.2.10: Lynx navigasjonsløsning 13:15-13:30

Videre ser jeg på den differensielle GNSS løsningen for det minst gunstige tidsrommet, se figur 6.2.11. I denne rapporten ser man at det er 8 epoker hvor man ikke har noen baselinjer. Dette svarer til ingen fix-løsning i 0.8 % av datasettet. For å se hvordan disse 0.8 % fordeler seg i datasettet brukes tabellen "time to closest fix". I dette datasettet vil det i 99 % av tilfellene være mindre enn 0 sekunder til nærmeste observasjon med fix-løsning.

```

-----
O V E R A L L   S O L U T I O N   S U M M A R Y
-----

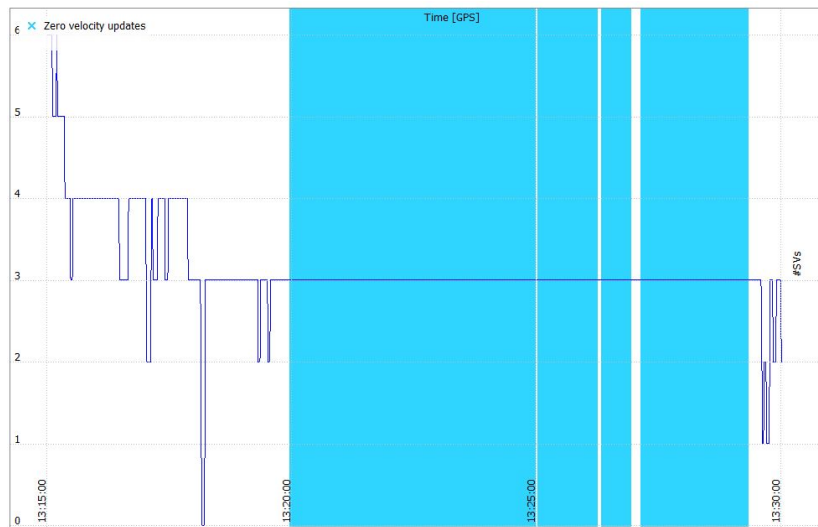
# Fixed baselines      # epochs  % of total
-----
          0              8          0.9
          1              5          0.6
          2             28          3.1
          3             42          4.7
          4            818         90.8

Time to closest fix
-----
Median      :    0 s
Upper 75 % :    0 s
Upper 95 % :    0 s
Upper 99 % :    0 s

```

Figur 6.2.11: Lynx DNGSS 13:15-13:30

Ved kun å ta i bruk signalet fra GLONASS får vi følgende navigasjonsløsning. I 99 % av tilfellene vil standardavviket til den horisontale posisjonen være hele 13.267 meter og 7.829 meter i vertikal retning. Roll har et standardavvik på 0.006 grader, pitch sitt standardavvik blir 0.007 grader og heading på 0.035 grader. Den differensielle løsningen forteller at det ikke er fix i 900 epoker, noe som tilsvarer hele datasettet. Dette kan illustreres ved å se på antall satellitter som er tilgjengelig. Disse resultatene skyldes at det kun er tre tilgjengelige satellitter i nesten hele datasettet se figur 6.2.12. Ettersom det er kjent at man trenger minst 5 satellitter for å bestemme posisjonen, er det logisk å konkludere med at dette datasettet med kun tre satellitter tilgjengelig er alt for dårlig.



Figur 6.2.12: Antall satellitter GLONASS, Lynx 13:15-13:30

Ved å ta i bruk Galileo i kombinasjon med GLONASS på dette datasettet får man en betydelig forbedring. Effekten av Galileo fører til at standardavviket til henholdsvis horisontal og vertikal posisjon synker til 0.034 meter og 0.042 meter. I tillegg blir standardavviket til orienteringen bedre. Roll og pitch har et standardavvik på 0.004 grader mens heading har et på 0.024 meter. Den differensielle løsningen blir også betydelig bedre. Det går fra å ikke ha fix i 100 % av tilfellene til i 0.9 % av tilfellene. Dette betyr at man vil være 0 sekunder fra en observasjon med fix i 99 % av tilfellene. Denne forbedringen skyldes at det totale antall satellitter er 12 i store deler av datasettet. Dermed styrker dette hypotesen om at det å ta i bruk de nye satellittsystemene vil gi en forbedring i posisjonsbestemmelsen i områder hvor de eksisterende systemene har dårlig dekning og satellittgeometri.

Ved å bruke GPS alene klarer man å bestemme posisjonen bedre enn ved å bruke GLONASS alene. Dette skyldes at det er opp mot 10 tilgjengelige satellitter i store deler av datasettet. Videre gir disse satellittene et standardavvik på 1.003 meter og 0.809 meter i henholdsvis horisontal og vertikal posisjon. Orienteringen har et standardavvik på 0.004 grader i roll og pitch, mens headingen har et standardavvik på 0.026 grader. Videre kan man se at man ikke har fix i 36.5 % av tiden, dette tilsvarer 65 sekunder ifra nærmeste observasjon med fix-løsning i 99 % av tilfellene.

Dersom man kombinerer GPS signalet med Galileo vil man få en positiv forbedring og et standardavvik på 0.137 meter og 0.134 til posisjonen i horisontal og vertikal retning. Mens roll og pitch har et standardavvik på 0.004 grader og heading har

et på 0.021 grader. I DNGSS løsningen kommer det fram at det kun er i 5.1 % av tilfellene man ikke har fix-løsning. Dette resulterer i 99 % av tilfellene er det 14 sekunder til nærmeste observasjon med fix. I tillegg er det en øking fra 10 til 14 satellitter i store deler av datasettet.

Til slutt ble den tradisjonelle kombinasjonen med GPS og GLONASS testet. Med et antall på 18 satellitter i store deler av datasettet førte dette til at man har fix i 99 % av tilfellene og vil dermed være 0 sekunder i fra nærmeste observasjon med fix-løsning. I tillegg til dette ble posisjonen sitt horisontale og vertikale standardavvik forbedret til 0.033 meter og 0.039 meter, samt at orienteringens standardavvik holder seg på 0.004 for roll og pitch, mens headingen synker til 0.019 grader.

Dette gir et tilnærmet likt resultat som ved å bruke hele datasettet. Det å ta i bruk de nye systemene gir en betydelig forbedring i de tilfellene hvor man kun har et annet satellittsystem. Differansen mellom den tradisjonelle metoden med GPS og GLONASS og det å bruke alle satellittene er ikke nevneverdig stor. Det er likevel verd å merke seg at i områder med dårlig GNSS-dekning vil noen ekstra satellitter fra Galileo og BeiDou være til stor hjelp.

6.2.2 Målesekken

Datasettet samlet inn ved bruk av målesekken ble også prosessert for å undersøke påvirkningen av de nye systemene. Det ble på lik linje med datasettet fra Lynx Mobile Mapper gjort flere forskjellige prosesseringer med ulike kombinasjoner av satellittsystemer.

Det beste datasettet er naturligvis der alle satellittsystemene utnyttes. Dette blir dermed sammenlignet med sensorene sine produktspesifikasjoner, disse kan ses i delkapittel 5.2.2. Navigasjonsløsningen ved bruk av GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou kan ses i figur 6.2.13.

NAVIGATION PERFORMANCE SUMMARY								
		Min.	1%	5%	50%	95%	99%	Max.
Pos. hor.	std. dev.	0.018	0.018	0.020	0.030	0.038	0.039	0.078 [m]
Pos. vert.	std. dev.	0.029	0.029	0.030	0.041	0.047	0.048	0.057 [m]
Vel. hor.	std. dev.	0.013	0.013	0.013	0.016	0.018	0.019	0.033 [m/s]
Vel. vert.	std. dev.	0.009	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.015 [m/s]
Roll	std. dev.	0.096	0.096	0.096	0.110	0.131	0.137	0.196 [deg]
Pitch	std. dev.	0.095	0.095	0.096	0.113	0.137	0.152	0.270 [deg]
Heading	std. dev.	0.787	1.075	1.625	1.944	2.123	2.142	2.283 [deg]

Figur 6.2.13: Malesekken sin navigasjonsløsning GNSS

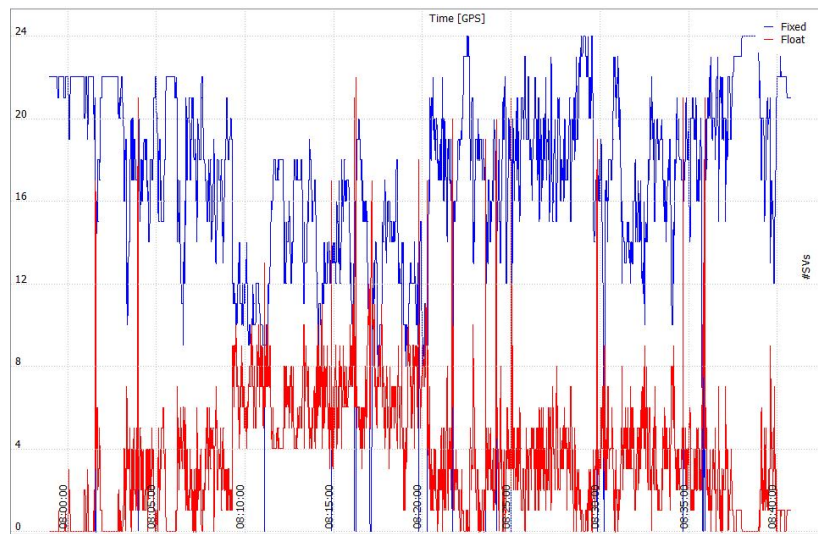
Tabellen viser at i 99 % av tilfellene vil standardavviket på den horisontale og vertikale posisjonen være på henholdsvis 0.039 meter og 0.048 meter. Dette stemmer overens med spesifikasjonen til APX-15 som sier at posisjonen har en RMS nøyaktighet på 0.02 til 0.05 meter. Videre ser vi at standardavviket på nøyaktigheten til roll er 0.137 grader, pitch er 0.0152 grader mens heading har 2.141 grader. I forhold til standarden ser vi at RMS nøyaktigheten til roll og pitch er innenfor de oppgitte spesifikasjonene, men headingen er nesten 2 grader dårligere. Dette skyldes blant annet at det kun er brukt en GNSS-mottaker samt at det er lite variasjoner i plattformen sin orientering under kjøringen. I tillegg til dette er det interessant å undersøke hvor stor del av datasettet som har fix-løsning. Dette kan ses i figur 6.2.14

OVERALL SOLUTION SUMMARY		
# Fixed baselines	# epochs	% of total
0	31	1.2
1	124	4.9
2	2353	93.8

Time to closest fix	
Median	: 0 s
Upper 75 %	: 0 s
Upper 95 %	: 0 s
Upper 99 %	: 1 s

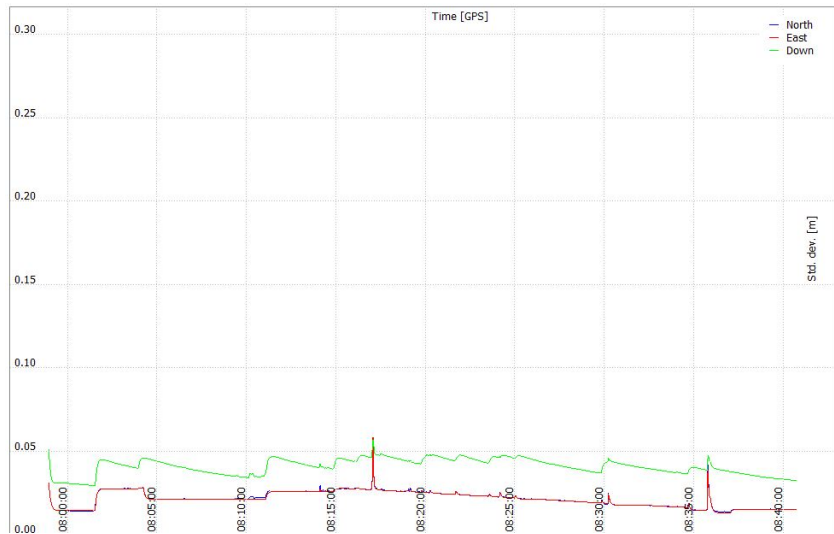
Figur 6.2.14: DGNSS målesekk

Den differensielle løsningen forteller at dette datasettet er det totalt 2508 epoker. Av disse er det kun 31 epoker som ikke har noen fixedbaselinjer. Noe som tilsvarer at 1.2 % av observasjonene ikke har fix-løsning. I et ”worst casescenario er 99 % av observasjonene 1 sekund ifra en observasjon med fix-løsning. Dette kan man også se i figur 6.2.15. Plottet illustrere hvor mange satellitter som har fix-løsning (blå graf) og hvor mange som har float løsning (rødt). Det kommer tydelig frem at det er flere satellitter med fix-løsning enn satellitter uten. Dette resulterer i at det i 99 % av datasettet er det bare 1 sekund i fra en observasjon uten fix til nærmeste observasjon med fix-løsning.

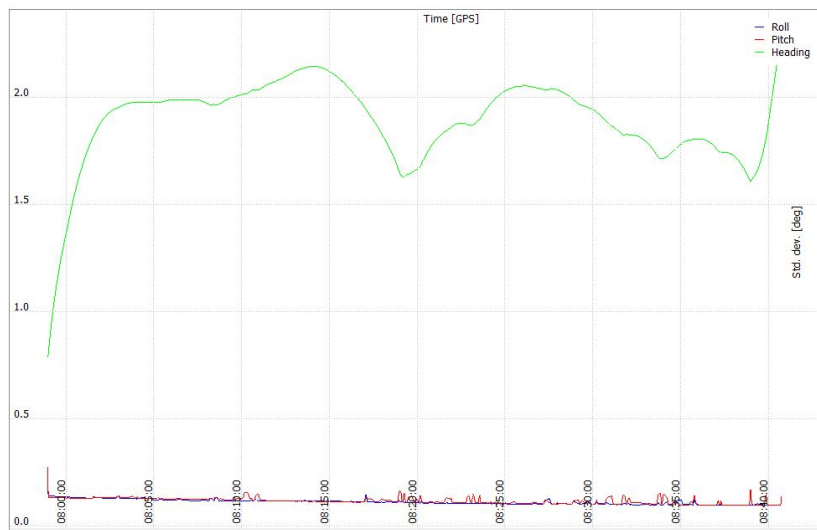


Figur 6.2.15: Fix & Float ved bruk av GNSS og målesekk

Resultatene kan videre illustreres i figurene under 6.2.16 og 6.2.17. I motsetning til datasettet fra Lynx Mobile Mapper er det ikke noen større tidsepoker med fasebrudd, ettersom disse ville vært markert i lyseblått slik som i figur 6.2.5. Det kommer også tydelig frem i dette plottet at standardavviket til nøyaktigheten for posisjonen i vertikalretning (down”) er betydelig dårligere enn nøyaktigheten i horisontalretning (north” & east”). Det samme kan vi se på standardavviket til orienteringen, hvor headingen er betydelig dårligere enn standardavviket til roll og pitch.



Figur 6.2.16: Målesekk posisjonsnøyaktighet GNSS

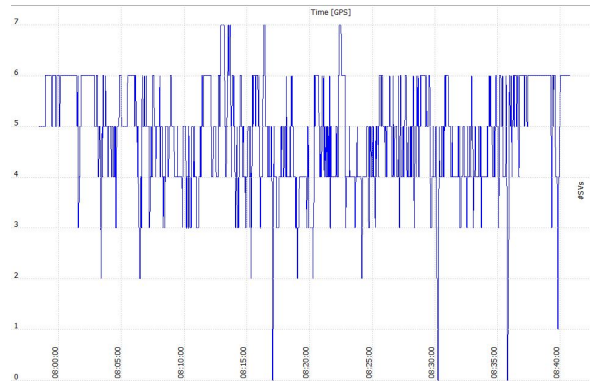


Figur 6.2.17: Målesekk posisjonsnøyaktighet GNSS

Det ble også gjort flere prosesseringer med ulike kombinasjoner av satellittsystemer for å undersøke påvirkningen av de ulike satellittsystemene.

Ved kun å bruke GLONASS ble det oppnådd følgende resultat. Den overordnede navigasjonsløsningen sier at i 99 % av tilfellene foreligger et standardavvik på posisjonsnøyaktigheten tilsvarende 0.891 meter og 0.734 meter i henholdsvis hori-

sontal og vertikal posisjon. Standardavviket for orienteringsnøyaktigheten er 0.168 grader, 0.173 grader og 3.775 grader for henholdsvis roll, pitch og heading. Videre undersøkes det i hvor stor andel av datasettet som har fix-løsning. I DGNSS rapporten kommer det fram at alle epokene har null baselinjer, noe som betyr at systemet ikke klarer å bestemme en posisjonen ettersom 100 % av datasettet er uten fix-løsning. Dette kan illustreres ved å se på antall tilgjengelige satellitter, se figur 6.2.18.



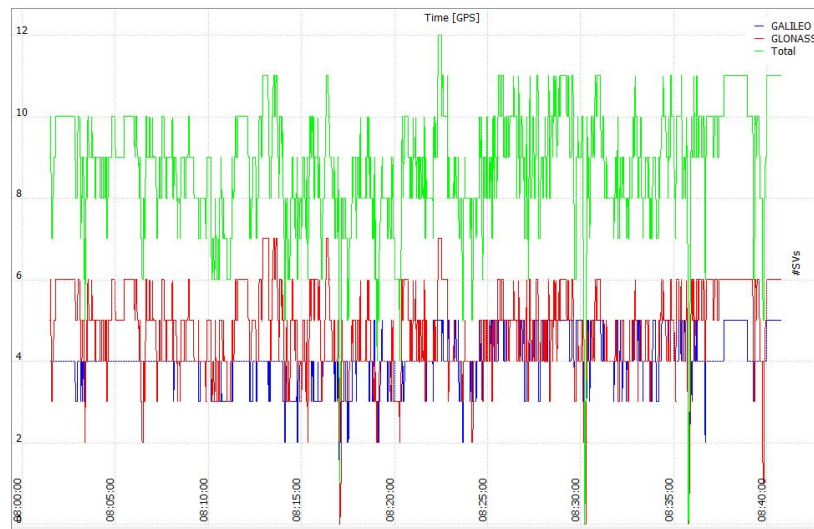
Figur 6.2.18: Antall GLONASS satellitter ved bruk av målesekk

Det kommer også fram at det totale antallet tilgjengelige satellitter ved kun å bruke GLONASS varierer mellom to og seks med et gjennomsnitt på fire satellitter. Dette er dermed ikke en god nok satellittgeometri til å kunne bestemme posisjonen. Den samme effekten kan også illustreres ved å se på figur 6.2.19. Denne figuren kan sammenlignes med figur 6.2.15. Ved bruk av alle satellittsystemene hadde 99 % av datasettet fix-løsning. I figur 6.2.19 kommer det tydelig fram at ved kun å bruke GLONASS vil alle satellittene ha float løsning og vil dermed ikke kunne gi en nøyaktig posisjonsbestemmelser.



Figur 6.2.19: Fix & Float ved bruk av GLONASS og målesekk

Ved å kombinere signalet fra både GLONASS og Galileo oppnås det en betydelig forbedring. Da synker standardavviket på posisjonsnøyaktigheten til 0.144 meter og 0.157 meter for henholdsvis horisontal og vertikal retning. I motsetning til 0.891 meter og 0.734 meter ved kun å bruke GLONASS. Standardavviket på orienteringen synker også til 0.157, 0.168 og 3.396 grader for roll, pitch og heading. Den differensielle løsningen etter å ha tatt i bruk signalet fra Galileo sammenlignes med resultatet gitt av GLONASS alene. Ved å ta i bruk Galileo går hele datasettet fra å være uten fix, ved kun å bruke GLONASS, til å ha en løsning hvor vi har fix i 91,3 % av tilfellene. Dette innebærer at 8.7 % av observasjonene er for dårlige ettersom man ikke har noen baselinjer. I tillegg til dette vil en observasjon uten fix være 9 sekunder i fra nærmeste observasjon med fix i 99 % av tilfellene. Denne forbedringen skyldes økningen i antall satellitter. Hvor man ved GLONASS har kun 4 satellitter i gjennomsnitt får man ved å ta i bruk Galileo et gjennomsnitt på 8 satellitter (grønn graf) gjennom datasettet. Dette kan ses i figur 6.2.20.



Figur 6.2.20: Antall GLONASS & Galileo satellitter ved bruk av målesekk

Videre undersøkes effekten av kun å bruke signalet fra GPS. Dette resulterer i et standardavvik på posisjonen i horisontal og vertikal retning på 1.212 meter og 0.949 meter. Orienteringen har et standardavvik på 0.149 grader, 0.177 grader og 3.804 grader for henholdsvis roll, pitch og heading. Den differensielle løsningen forteller at i 54.8 % av tilfellene i datasettet er det ikke noen fixedbaselinjer. Dette resulterer i at 54.8 % av datasettet er uten fix-løsning. Dette innebærer at i 99% av tilfellene er en observasjon uten fix-løsning 344 sekunder fra nærmeste observasjon med fix-løsning. Dette tilsvarer en periode på nesten 6 minutter uten fix, noe som er alt for mye. Årsaken ligger i at det gjennomsnittlige antallet satellitter fra GPS er 4.

For å en god nok fix-løsning kombineres GPS signalet med Galileo. Dette fører til en reduksjon av standardavviket til posisjonen og orienteringen. Den horisontale posisjonen vil dermed ha et standardavvik i 99% av tilfellene på 0.059 meter, mens den vertikale posisjonen er på 0.058 meter. For roll, pitch og heading foreligger et standardavvik på 0.140 grader, 0.158 grader og 3.537 grader. Den differensielle løsningen forteller at antall observasjoner uten fix-løsning er redusert til 4.3 %. Noe som fører til at man i 99 % av tilfellene vil være 3 sekunder ifra en observasjon med fix-løsning. Dette skyldes en økning i det gjennomsnittlige antallet satellitter fra 4 til 9.

Til slutt ser jeg på den tradisjonelle kombinasjonen med kun å bruke GPS og GLONASS. I dette tilfellet er det gjennomsnittlige antallet satellitter 10, noe som ikke

er en betydelig økning i forhold til GPS og Galileo. Denne økningen fører til at man ikke har fix i kun 3.1 % av tilfellene, og dermed vil man være kun 2 sekunder ifra nærmeste observasjon med fix-løsning i 99 %. Standardavviket til nøyaktigheten er også forbedret. Den horisontale og vertikale posisjonens nøyaktighet i 99% av tilfellene er da 0.045 meter og 0.054 meter. Orienteringen sitt standardavvik er henholdsvis 0.139, 0.157 og 3.619 for roll, pitch og heading.

6.2.3 Vurdering av resultatet

Det har blitt gjennomført en etterprosessering av tre forskjellige datasett hvor jeg har undersøkt effekten av å ta i bruk de nye satellittsystemene Galileo og BeiDou. Basert på resultatene fra de prosesserte datasettene er påvirkningen desidert størst dersom vi kun benytter Galileo i kombinasjon ved GPS eller GLONASS. Selv om den prosesserte løsningen av GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou er bedre enn ved å bare bruke GPS og GLONASS er ikke denne forbedringen like stor som i tilfellene med bare GPS eller GLONASS. Det er fremdeles verd å merke seg at selv om nøyaktigheten ikke blir mye bedre, øker antall satellitter betydelig. Dette viste seg å være helt avgjørende i de tilfellene hvor jeg kombinerte GPS eller GLONASS med Galileo. Et luksusproblem med disse datasettene er at de er ekstremt gode i seg selv, dermed vil ikke påvirkningen av flere systemer bli merkbar mye bedre. Betydningen av å benytte Galileo vil trolig bli større i områder med få satellitter. Dersom det mangler en GPS satellitt for å bestemme posisjonen kan det, på grunn av det overlappende frekvensdomenet til GPS sitt L1 og L5 signal, kombineres med Galileo sine E1 og E5a signaler. Dette lar oss danne en differanse mellom satellittene. Den ekstra Galileo-satellitten kan da brukes som en GPS-satellitt og dermed være med å bestemme posisjonen.

Fordelene som det overlappende frekvensdomenet til GPS og Galileo har er muligheten å danne trippeldifferanser og økningen det gir av antall satellitter er så stor at det fremdeles vil lønne seg å bruke multi-frekvente GNSS-mottakere. I tillegg til dette har Galileo-satellittene en mye mer gunstig satellittbane enn de andre satellittsystemene. Dette skyldes blant annet at Norge har satt krav om bedre satellittdekning i de nordligste områdene av landet. Dette er også et viktig argument for å ta i bruk mottakere som kan utnytte signalet fra Galileo. Alle de permanente basestasjonene til Kartverket registrere også signalene fra Galileo. Dette betyr at signalene bare ligger og venter på at brukeren skal ta det i bruk. Ved kinematiske eller statisk posisjonering vil de ekstra satellittene og signalene bidra til en bedre bestemmelse av de aktuelle baselinjene.

Det finnes dermed ingen gode argumenter for ikke å utnytte multi-frekvente mottakere som kan utnytte signalene fra alle GNSS.

6.3 Tids- og økonomiske påvirkninger

I dette delkapittelet vil jeg vurdere om det finnes en tids- og økonomisk fordel ved å bruke den nye og fleksible måletrallen. Dette er sammenlignet med dagens metoder for kartlegging og posisjonering. Disse vurderingene bygger på samtaler med Kine Sjøberg i TerraTec AS og Jon Haugland i Bane NOR.

6.3.1 Tidspåvirkning

Dagens metode gjøres ved en form for stop and go” målinger. En detaljert beskrivelse av disse metodene kan ses i kapittel 2.2. Disse metodene gjøres ved bruk av en sporbukk. Det skal måles et punkt hver 10 meter før man går videre til neste punkt, gjør en ny måling osv. Når man kommer til disse punktene må sporbukken horisonteres. Dette er en tidkrevende prosess, spesielt når det må gjentas hver 10 meter. Neste steg er å gjennomføre selve målingene. Disse kan gjøres ved bruk av en totalstasjon, noe som er i samsvar med Bane NOR’s tekniske regelverk. Selv om selve målingen går fort, krever denne metoden en del forarbeid ettersom det er nødvendig å foreta en ny frioppstilling hver 200 meter. Dette resulterer for det første i at arbeidstiden øker, spesielt i områder med dårlig satellitt-geometri. For det andre medfører dette at det, som følge av dårlig fix-løsning, er tidkrevende å etablere sikringspunktene som brukes til frioppstillingen.

En annen metode er å bruke CPOS med støtte fra GNSS. Dette er en del av Bane NOR sitt testprosjekt. Sporbukken skal, på samme måte som ved bruk av totalstasjon, horisonteres i et punkt hver 10 meter hvor man gjør målingen, og deretter går videre til neste punkt. Fordelen med denne metoden er at man slipper å bruke tid på å gjøre frioppstillinger for totalstasjon. Ved å bruke CPOS metoden må man forholde seg til Kartverkets standard og til kravene om repetisjon satt av Bane NOR. Dette resulterer i at hvert punkt skal logge i intervaller på 20-30 sekunder, med flere uavhengige registreringer. Denne prosessen skal gjentas tre ganger i det samme punktet, hvor man bryter fix mellom hver registrering. I tillegg er det bestemt at man skal innom det samme punktet 4 ganger med minimum 15 minutters mellomrom for at satellittenes posisjon skal endre seg. I tilfeller med dårlig GNSS-dekning kan det også være nødvendig å etablere eksterne basestasjoner. Selv om det vil ta tid å etablere noen eksterne basestasjoner kan dette resultere i at det går raskere å få fix-løsning under selve målingen. Gevinsten av å bruke eksterne basestasjoner vil trolig være større enn tiden brukt på å etablere disse. Ved bruk av CPOS metoden kreves det også at det skal gjøres statiske observasjoner for å forbedre posisjonen. Det kan dermed spares tid ved å gjøre de statiske observasjonene samtidig som selve målingen med CPOS. I tillegg kan man bruke de eksterne basestasjonene for å forsterke geometrien i det statiske nettverket. Det vil derfor

trolig lønne seg å bruke eksterne basestasjoner selv om det tar litt tid å etablere disse.

Den store fordelen med den ønskede måletrallen er at den kan brukes å gjøre kinematiske observasjoner. Dermed slipper man å stoppe hver 10 meter slik man må ved bruk av dagens metode. En ulempe med denne metoden er at det kan være store avstanden til basestasjonene. Dette vil påvirke nøyaktigheten til observasjonene. Tidsbruken på å etablere eksterne basestasjoner vil trolig være liten i forhold til gevinsten ved å få bedre GNSS-dekning. En annen fordel ved å kunne gjøre målingene kinematiske er at arbeidet kan utføres med en mye høyere hastighet. Dette resulterer i at det kan kjøres/trilles gjennom en strekning flere ganger med samme tidsforbruk som det ville tatt å måle strekningen en gang ved bruk av tradisjonell landmåling.

Tilgang til spor og intensiteten på togtrafikken på strekningen spiller også en stor rolle for tidsbruken. Dersom det er en høytrafikkert strekning må arbeidet avbrytes jevnlig for å la togene passere. Det er derfor normalt at vedlikeholdsarbeid og kartlegging gjennomføres på natten for å slippe å avbryte arbeidet på grunn av togtrafikk.

Vurdering av tidsbruk

Det er tydelig at å utvikle en ny form for måletralle vil redusere tidsbruken betydelig. Planen er at den fremtidige prototypen har en løsning for å kunne feste plattformene med sensorene fast på flere ulike kjøretøy. Dette vil resultere i at man kan ha plattformen i en målesekk og gå strekningen, eller plattformen kan festes på en lasertalle og trilles gjennom den aktuelle strekningen. Dette kommer trolig til å være standarden for denne måletrallen. Det vil også være mulig å feste plattformen på eventuelle vedlikeholdskjøretøy. Dermed vil det være mulig å kartlegge sporet samtidig som det gjøres annet arbeid på strekningen. Det kan også være en mulighet å feste plattformen som består av alle de ulike sensorene på et vanlig tog som kjører en gitt strekning. Når toget ankommer endestasjonen vil det være mulig å ta av plattformen og montere plattformen på et nytt tog som kjøres tilbake. Denne måletrallen kan dermed betegnes som et lite og fleksibelt mobile mapping system

Ved å bruke en slik måletralle kan det samles inn store mengder data på en relativt kort tid. Dette støttes opp av gjennomførelsen av feltarbeidet. Der ble det kjørt 36 km tur/retur på rundt 2 timer. Under denne kjøringen holdt toget en hastighet på ca 50 km/t. Dersom denne strekningen skulle vært kartlagt ved bruk av tradisjonell landmåling ville man trolig klart alt fra to til ti kilometer på en arbeidsdag.

Det betyr at ved bruk av den nye målemetoden kan hele strekningen kartlegges 4 ganger på den tiden det normalt ville tatt å kartlegge omtrent en tredjedel.

Det kan dermed konkluderes med at det oppnås en betydelig tidsbesparelse ved å bruke et nytt og fleksibelt målesystem som har muligheten til å gjøre kinematiske observasjoner.

6.3.2 Økonomiske påvirkninger

Det er flere variabler som avgjør kostnadene for et kartleggingsprosjekt på jernbanen. Noen vanlige elementer som påvirker de økonomiske kostnadene knyttet til et prosjekt er strekningen som skal kartlegges og hvorvidt arbeidet gjennomføres på dagtid eller som nattarbeid. Andre elementer er hvor mange landmålere eller ingeniører det trengs for å gjennomføre arbeidet, og hvor mye ekstra personell som må være med i form av sikkerhetsvakter fra Bane NOR. Dersom hele strekningen må stenges av, har også all transport som blir satt på vent en negativ økonomisk effekt.

Det er normalt at man er minst to landmålere som gjennomfører denne type arbeid. I tillegg til dette må man ha sikkerhetspersonell under målearbeidet. En normal takst på å ha en landmåler ute i felt er 1000 kr timen, og det kan antas at utgiftene for å ha sikkerhetspersonell i sporet er tilsvarende. Det vil si at det koster minst 3000 kr i timen og ha å tre personer ute i sporet. Denne timeprisen kan trolig dobles dersom arbeidet utføres på natten. Dersom man kan gjøre denne jobben med hjelp av måletrallen vil man kunne redusere antall landmålere i feltet, som igjen medfører at det er mindre personell som må lønnes. Dersom sensoren monteres fast på, for eksempel på et vedlikeholds kjøretøy, er det heller ikke nødvendig med sikkerhetsvakt i tillegg. Det å ta i bruk en eventuell måletralle vil dermed føre til at man kan kartlegge de aktuelle strekningen på kortere tid. Dette i seg selv taler positivt for å ta i bruk en måletralle, og det medfører en økonomisk gevinst.

Dersom denne plattformen som inneholder de ulike sensorene er enkel å montere kan det til og med hende at lokomotivføreren kan montere denne på toget selv. Dermed elimineres behovet for landmåler ute i felt i forbindelse med disse målingene. Disse måldataene må selvfølgelig prosesseres og bearbeides av en ingeniør i ettertid, men denne prosessen er ikke spesielt tidskrevende.

Ulempen med den nye metoden er at det må bygges en prototype som vil være en betydelig utgift. Den økonomiske fordelene med dette systemet vil trolig fortsette dette regnestykket til det positive.

Vurdering av de økonomiske kostnadene

Basert på den foregående argumentasjonen om de økonomiske virkningene kan det konkluderes med at det vil være mer lønnsomt å bruke et nytt og fleksibelt målesystem enn dagens metoder. Dette skyldes i hovedsak at man får kartlagt betydelig større avstander på kortere tid. Bruken av en måletralle vil også redusere behovet for flere landmålere ute i felt.

6.4 Rollen til måletrallen

I dette delkapittelet vil jeg drøfte rollen til et lite og fleksibelt system i forhold til metodene som brukes i dag.

Kartlegging og posisjonering gjøres hovedsakelig ved bruk av sporbukk. I tillegg til dette brukes Roger 1000 for å kontrollere skinnenes relative plassering i forhold til hverandre og skinnenes kvalitet, se delkapittel 2.2.

6.4.1 Sporbukk

En av de største fordelene med en sporbukk er at selv om det tar tid å gjøre målinger blir resultatene ekstremt bra. I tillegg er sporbukken liten noe som gjør at den er lett å bruke av vanlig personell på sporet. Dette betyr også at det er lett å avbryte arbeidet og bevege seg bort fra sporet når det kommer passerende tog, for så å komme seg raskt tilbake på sporet og fortsette arbeidet. Ulempen er at denne prosessen vil ta lang tid dersom man skal kartlegge store områder.

6.4.2 Roger 1000

Den store fordelen med Roger 1000 er at det kan kartlegges store strekninger på kort tid, i motsetning til hva som er mulig med en sporbukk. Til gjengjeld er resultatene fra Roger 1000 betydelig dårligere enn hva man oppnår ved bruk av en sporbukk. Dette skyldes blant annet at Roger 1000 ikke er laget for å bestemme den absolutte posisjonen slik det gjøres med en sporbukk. En annen fordel er at Roger 1000 er et stort fysisk måletog, noe som gjør at det kan kjøre som normalt på strekningene mellom den planlagte trafikken. Ulempene ved Roger 1000 er det samme som fordelene, nemlig at det er et stort måletog. Dersom det kun er et lite område for eksempel et stasjonsområde som skal kartlegges, er det ikke optimalt å bruke Roger 1000. Det samme problemet oppstår dersom det er vedlikeholdsarbeid på ett mindre avstengt område. Da må Roger 1000 plasseres korrekt i henhold til anleggsmaskinen, og i forhold til hvilken rekkefølge disse skal brukes i. Dersom man plasserer disse maskinene i feil rekkefølge må man ofte kjøre alle ut, for å så omorganisere kjøretøyene, for deretter å kjøre de tilbake i riktig rekkefølge. Dette er et problem som oppstår ved jevne mellomrom, og det kreves ofte et helt arbeidsskift for å rette opp i denne feilen.

6.4.3 Måletrallen

Den planlagte prototypen for måletrallen er en kombinasjon av disse to systemene. Den vil bruke en GNSS- og INS-løsning til å bestemme trallen sin absolutte po-

sisjon, som videre brukes til å georeferere laserdataene. Laserskanneren brukes til å kartlegge sporets geometri. Det er også mulig å montere på en ekstra laserskanner. Dette vil resultere i at man kan kartlegge geometrien rundt sporene, slik som vegetasjon, kontaktledninger og kabelsøylene. Fordelene med denne måletrallen er at den er liten og fleksibel og den kan dermed tas raskt av og på sporet. Dette vil også være en fordel dersom det skal gjøres vedlikeholdsarbeid på mindre eller lukkede strekninger. Da er det mulig å komme inn mellom anleggsmaskinene uten at det skaper noen ekstra logistikkproblemer. Ulempen med denne måletrallen er at den forflyttes for håndkraft, og man vil ikke klare å kartlegge like store områder i samme hastighet som ved å bruke Roger 1000.

6.4.4 Vurdering

Et lite og fleksibelt system vil dermed kombinere teknikker fra de to eksisterende målemetodene. Den store gevinsten til det planlagte systemet vil være muligheten til å kunne flytte plattformene med sensorene mellom ulike kjøretøy. Dette gjør at brukeren kan gjøre kartleggingen ved å ha sensorene montert til en tralle, de kan festes på et vedlikeholdskjøretøy eller den kan monteres på en målesekk slik at brukeren kan spasere langs sporet. I tillegg til dette vil systemet fastmontert i en måletralle være så lite at det ikke er et problem å ta det bort fra sporet på trafikkerte strekninger for å slippe forbi togene. Måletrallen lar brukeren kartlegge større områder raskere enn ved bruk av tradisjonell sporbukk og landmåling. I tillegg er dette systemet også utstyrt med en eller to laserskannere, noen som lar måletrallen kartlegge noen av de samme parameterne som Roger 1000 gjør. Den lille størrelsen til måletrallen gjør også at det er lett å bruke den på anleggsområder ettersom det ikke vil skape noen større logistikkproblemer fordi man slipper å flytte på kjøretøy. Fordi systemet er så lite er det heller ingen problem å løfte det vekk fra sporet når det kommer en anleggsmaskin, for å så fortsette arbeidet når denne har kjørt videre. Sist men ikke minst vil bruken av det nye systemet redusere behovet for flere landmålere ute i felt, ettersom måletrallen vil være lett å operere alene.

Det kan dermed konkluderes med at et lite og fleksibelt system vil kunne brukes på arbeidsområder hvor dagens metoder er mindre egnet.

6.5 Systemets nøyaktighet

I dette delkapittelet vil jeg drøfte om den ønskede måletrallen kan innhente data som tilfredsstillende nøyaktighetskravene til Bane NOR.

Ettersom det ikke er bygget noen fysisk måletralle under dette prosjektarbeidet er de ulike sensorene og påstandene blitt testet ved å bruke en målesekk. Denne målesekken er beskrevet i delkapittel 5.2.4. Det er flere ulike parametere som påvirker hvilken nøyaktighet det er mulig å oppnå ved bruk av disse sensorene.

6.5.1 Absolutt posisjonering

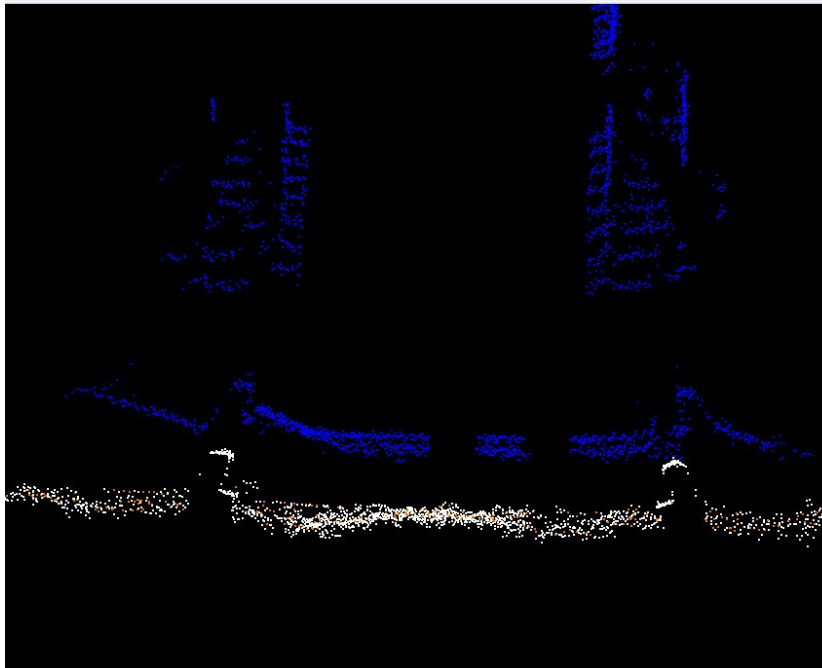
Den absolutte posisjonen til plattformen, som i dette tilfellet er målesekken, vil bli bestemt ved bruk av den innsamlede dataen fra GNSS og INS-løsningen. Til dette formålet brukes den best tilgjengelige løsningen. Dette innebærer at man utnytter alle de store satellittnavigasjonssystemene. En detaljert beskrivelse av sensorene som er brukt i målesekken kan ses i kapittel 5.2. Spesifikasjonene til sensorene viser tydelig at det er mulig å oppnå en RMS nøyaktighet for posisjonen på 0.02 meter til 0.05 meter, samt 0.025 grader i roll og pitch, og 0.080 grader for heading.

Den etterprosesserte GNSS- og INS-løsningen innsamlet på jernbanen ga følgende resultater: RMS nøyaktigheten på posisjonen i henholdsvis horisontal- og vertikalretning er 0.039 meter og 0.048 meter. RMS nøyaktigheten til orienteringen er 0.137 grader i roll, 0.152 grader i pitch og headingen sin RMS nøyaktighet er på 2.142 grader.

Det er flere grunner til at orienteringen til det prosesserte datasettet er så mye dårligere enn hva spesifikasjonen tilsier. Den første grunnen skyldes en veldig ugunstig dynamikk på lastetraktoren hvor målesekken er plassert. Denne sensoren ville gjort det betydelig bedre i et system med mer bevegelse i orienteringen. En bedre dynamikk ville gjort det lettere å utlede eventuelle skalafeil og biaser på sensoren, for eksempel i et fly hvor det er store variasjoner i roll, pitch og heading. Siden plattformen er fastmontert til en lastetraktor som går på skinner er det en utrolig liten variasjon i roll, pitch og heading. Dette viser at montering på en slik plattform ikke er optimalt.

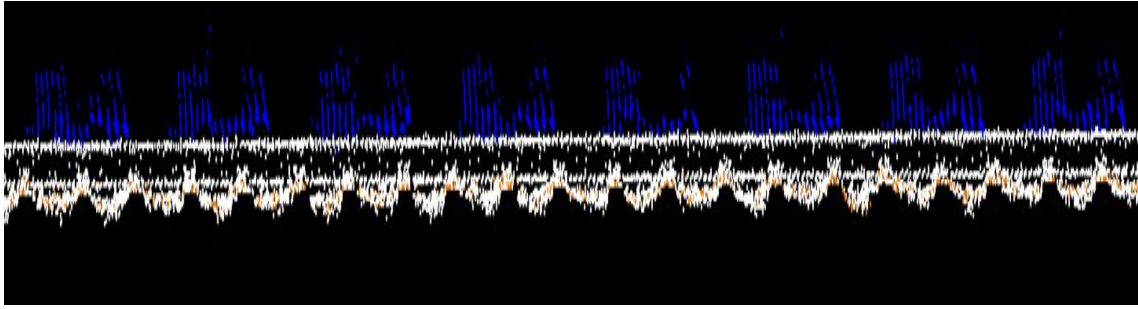
GNSS- og INS løsningen brukes i tillegg til å beregne å georefere laserdataen, og dermed absolutt posisjonere punktskyen som kobler sammen det fysiske sporet med målingene. Selve overføringen gjøres nesten helt feilfritt. Unøyaktigheten ligger i laserskanneren sin målenøyaktighet, noe som vil påvirke laserdataen sin absolutte posisjon.

Den georefererte punktskyen fra VLP-16 blir sammenlignet med et eksisterende datasett samlet inn med Lynx Mobile Mapper på den samme strekningen. Der som vi ser på differansen mellom disse to datasettene kommer det tydelig fram at det er en høydifferanse mellom punktskyene, se figur 6.5.1. VLP-16 punktskyen er vist i blått mens Lynx punktskyen er vist i hvitt. Denne høydefeilen skyldes at levelarmen mellom GNSS-mottakeren og INS sitt sentrum er dårlig estimert i målesekk. En feil i denne levelarmen vil være direkte overførbart til laserdataen.

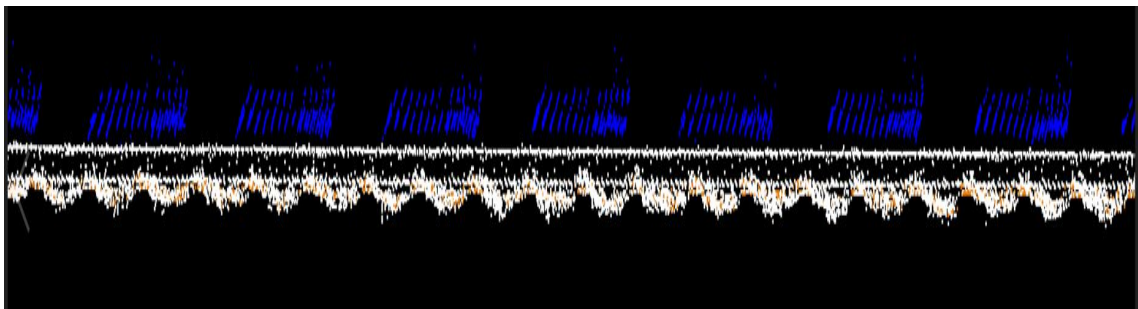


Figur 6.5.1: Laserdata fra VLP-16 og Lynx Mobile Mapper

Denne feilen i levelarmen ble også veldig tydelig når jeg sammenlignet hvordan skinneprofilene sto i forhold til hverandre. Toppen av begge punktskyene representerer toppen av skinnen. Det er også verd å merke seg at punkt tettheten på Lynx datasettet er mye bedre. Dette resulterer i at man ser en heltrukket skinneprofil i Lynx punktskyen i motsetning til VLP-16 punktskyen. I denne kommer det derimot tydelig frem det mangler laserdata i noen områder. Dette skyldes den valgte rotasjonshastigheten på 600 RPM i kombinasjon med kjørehastigheten. I tillegg til at lasterampene blokkerte en del av sikten for laserskanneren. Dette gjorde at VLP-16 skanner ikke klarte å detektere hele sporet.



Figur 6.5.2: Langsgående høyre skinnestreng



Figur 6.5.3: Langsgående venstre skinnestreng

Forbedring av systemets absolutte posisjon

Det kan gjøres flere ulike tiltak for å forbedre den absolutte nøyaktigheten til dette systemet.

Det er mulig å forbedre denne absolutte nøyaktigheten ved å kjøre gjennom den samme strekningen flere ganger. Dette gjøres fordi man ønsker flere uavhengige observasjoner av det samme området. Disse uavhengige observasjonene brukes videre til å finne en midlet løsning, noe som dermed vil redusere feilen. Den midlede nøyaktigheten er avhengig av antall uavhengige målinger på samme måte som tradisjonell måling med RTK ². Dette betyr at dersom man har fire uavhengige målinger vil feilen halveres som følge av formen $\sqrt{(n)}$, hvor n er antall uavhengige målinger. Ved å se på meridianen, som i dette tilfellet har en nøyaktighet på 30 cm, vil man ved å gjøre fire uavhengige målinger få en nøyaktighet på $\frac{0.030}{\sqrt{4}} = 0.015$ meter. Dette er innenfor Bane NOR sine krav. I et reelt tilfelle må man trolig kjøre gjennom denne strekningen flere ganger for å prøve og redusere feilen enda mer. Ved å gjøre flere slike uavhengige målinger, vil man trolig tilfredsstille Bane NOR

²<https://kartverket.no/systemsider/ordbok/r/rtk/>

sine krav til den absolutte nøyaktigheten. Det er verdt å merke seg at selv om denne metoden krever repetisjon, og flere uavhengige målinger vil innsamlingen gå betydelig raskere enn ved bruk av dagens metode med tradisjonell landmåling.

I den endelige prototypen vil det også være et krav om å bruke to multifrekvente GNSS-mottakere fordi at dette resulterer i bedre kontroll på orienteringen. Dette vil ha størst innvirkning headingen og vil også medføre en bedre kontroll. Ved å ta i bruk en ekstra mottaker vil man også klare å forbedre nøyaktighet og oppnå verdier som er nærmere spesifikasjonene til APX-15. Til slutt vil det å ta i bruk to mottakere føre til en bedre kontroll på multipath og de atmosfæriske forstyrrelsene.

De ulike levelarmene mellom de ulike sensorene er dårlig estimert i dette tilfellet. Dette har resultert i at laserdataen har feil høyde i forhold til virkeligheten. I den endelige prototypen vil disse levelarmene bli betydelig bedre kalibrert. Dette fører igjen til en mer nøyaktig estimering av disse. Dette spiller en sentral rolle for nøyaktighet i dette datasettet, men det er ikke et aktuelt problem ved senere bruk av prototypen. Kalibreringen kommer da til å bli gjort grundig av fagpersonell når prototypen bygges. Feilkildene kan derfor trolig reduseres eller elimineres helt ved å ta i bruk prototypen.

Punkttettheten til VLP-16 skanneren kan forbedres ved noen enkle grep. Å justere rotasjonshastigheten til VLP-16 skanneren opp fra 600 RMP til max hastighet på 1200 RMP vil medføre at samplingsraten blir høyere. Dette fører deretter til flere rotasjoner per sekund som videre fører til en høyere punkttetthet. Hastigheten til kjøretøyet spiller naturligvis også en sentral rolle. Ved å kjøre saktere vil man få en mer detaljert skanning av skinnene. Det krever fortsatt mer testing for å fastslå hva den optimale hastigheten må være for at resultatet fra VLP-16 blir best mulig. I tillegg vil plasseringen til skanneren i prototypen være mer gunstig i forhold til sporet, ettersom den vil være festet nærmere jernbanesporet. Samt at man da vil slippe å ha elementer slik som lasterampene som blokkerer sikten.

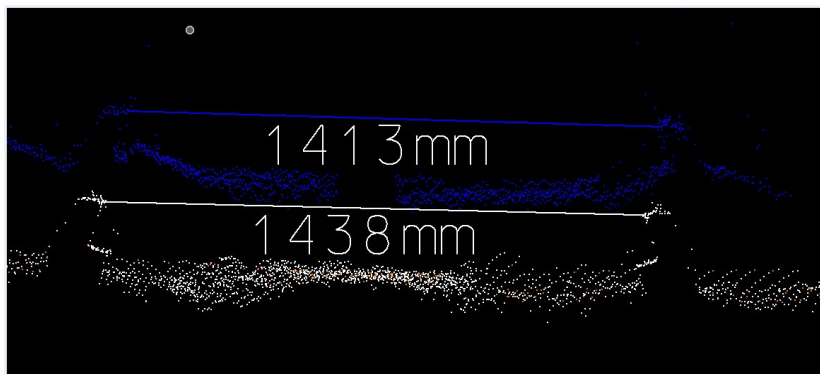
6.5.2 Relativ posisjonering

I tillegg til å bestemme jernbaneskinne sin absolutte posisjon er man interessert i den relative avstanden mellom skinnen. Ved bruk av den tradisjonelle metoden med totaltstasjon og sporbukk, får man den relative avstanden direkte ut fra sporbukkens målinger. I denne oppgaven er det undersøkt om det er mulig å gjøre dette ved bruk av en laserskanner. Bruk av en laserskanner vil medføre at det er unødvendig å bygge en krevende mekanisk løsning som må horisonters og holdes fast til referanseskinne i alle punktene som måles. I stedet vil laserskanneren vil kartlegge skinnenes relative posisjon direkte. Ved å ta i bruk et INS i tillegg til

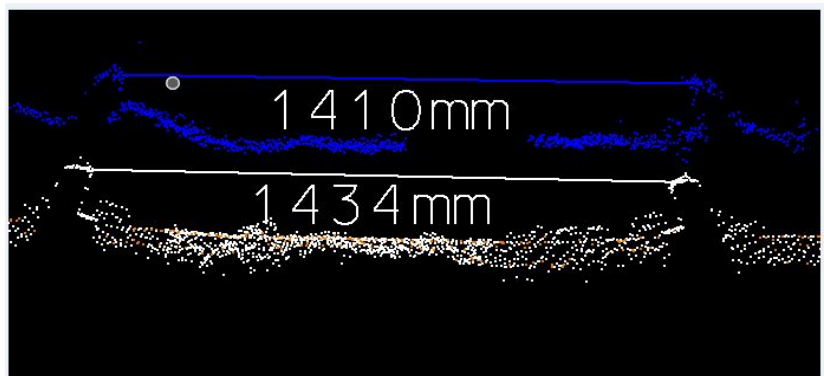
laserskanner, vil man også ha kontroll på orienteringen.

Det er som nevnt tidligere brukt en VLP-16 laserskanner for å bestemme skinnenes relative posisjon i forhold til hverandre. I henhold til spesifikasjonen har denne skanneren en nøyaktighet på $\pm 3\text{cm}$, uten noen form for kalibrering. Det georefererte datasettet blir brukt for å sammenligne punktskyene til VLP-16 og Lynx Mobile Mapper. VLP-16 punktskyen er vist i blått og Lynx Mobile mapper er markert i hvitt.

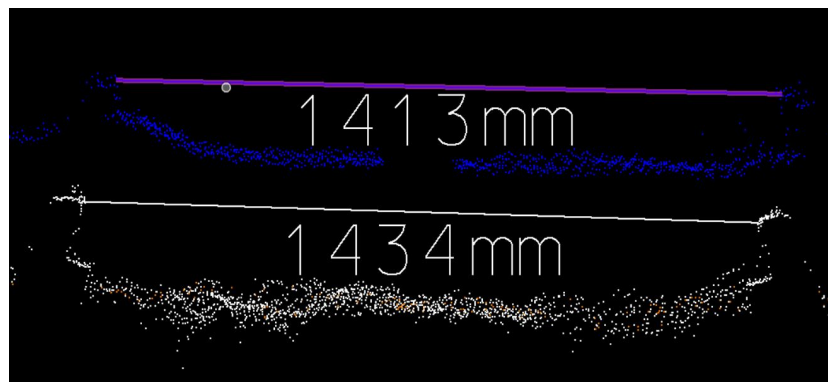
I denne sammenhengen er det kun den relative posisjonering som er relevant. Det ses derfor bort i fra høydeforskjellen mellom datasettene. Begrunnelse for denne høydeforskjellen er forklart i delkapittel 6.5.1. For å undersøke sporvidden er det brukt tre utvalgte tverrprofiler fra TerraMatch. Den første av disse tverrprofilene er plukket ut i nærheten av et landmålt kontrollpunkt, som er målt for å hjelpe til med georeferering til Lynx datasetten, se figur 6.5.4. Den andre punktskyen er hentet ca 70 meter øst for dette kontrollpunktet. Det er plukket ut over en jernbanesville slik at nøyaktigheten på punktskyen kommer tydelig frem, se figur 6.5.5. Den siste tverrprofilen er plukket ut ca 70 meter vest for det målte kontrollpunktet, se figur 6.5.6. Denne tverrprofilen ble valgt for å undersøke om det var store variasjoner i den målte sporvidden mellom hver av de utvalgte tverrprofilene.



Figur 6.5.4: Sporvidden målt ved et landmålt kontrollpunkt



Figur 6.5.5: Sporvidden målt over en jernbanesville



Figur 6.5.6: Sporvidden målt 70m vest for kontrollpunkt

Det første som legges merke til er at VLP-16 punkttskyen sin geometri samsvarer med punkttskyen fra Lynx Mobile Mapper. Selve skinnen kommer tydelig fram i begge punkttskyene. Selv om skinnene er tydelige i de ulike datasettene, er det ingen tvil om at VLP-16 datasettet er preget av mer støy. Det er to hovedårsaker til dette. Den første er at VLP-16 skanneren er en så kalt low costskanner, mens Lynx Mobile Mapper er et toppmoderne lasersystem. Den andre store grunnen er at VLP-16 datasettet ble innsamlet i påsken 2018, mens det enda var snø i og rundt sporet. Lynx datasettet derimot er samlet inn på sommeren. Refleksjonen fra snøen vil medføre at det blir mer problematisk å detektere selve skinneprofilen, i tillegg til at snøen forårsaker mer refleksjon.

I henhold til Bane NOR sin standard skal jernbanesporet justeres dersom skinnenes relative avstand avviker mer enn 15 mm i henhold til normalsporets bredde på 1435 mm. Ut ifra Lynx datasettet, som antas å være korrekt, ser vi at avviket

fra den målte avstanden er noen millimeter, med et max avvik på 3 mm. VLP-16 har registrert en sporvidde på 1410mm til 1413. Dette gir et minimalt avvik på 22 millimeter, noe som er alt for stort i forhold til hva standarden godtar. Det kan dermed konkluderes med at VLP-16 skanneren ikke klarer å detektere i dette datasettet nøyaktig nok.

Forbedring av systemets relative posisjon

Det er flere ting som kan gjøres for å forbedre nøyaktigheten til VLP-16 skanneren. Den første er å foreta en kalibrering av laserskanneren ut i fra forholdene når man måler. Dette gjøres ved at man kalibrerer skannerne etter blant annet lufttrykk og temperatur, noe som vil føre til forbedret nøyaktighet. Graden av forbedring er avhengig av hvilke ytre forhold det kalibreres for. Det er viktig å merke seg at denne kalibreringen kun er gyldig ved bruk av dette datasettet. Kalibreringen må dermed gjentas for hvert datasett.

En bedre montering av laserskanneren vil også forbedre nøyaktigheten. I dette datasettet er laserskanneren monter fast i målesekkken, som videre ble stropet fast til lastetraktoren. Dette medførte at avstanden fra laserskanneren ned til sporet var omtrent 1,5 meter. I tillegg til dette var skanneren fastmontert i en kasse mellom to lasteramper som sto oppreist under hele kjøringen. Disse lasterampene medførte at skanneren mistet deler av sikten ned til sporet. I den endelige prototypen vil avstanden fra laserskanneren ned til sporet være betydelig kortere. I tillegg vil det ikke være noen gjenstander som blokkerer sikten. Det kan dermed forventes en forbedret nøyaktighet.

Snøen i sporet er antagelig den største påvirkningen. Denne fører som nevnt til at laseren reflekteres, i tillegg til at deler av svillene var dekket av snø. Disse påvirkningene vil føre til at støynivået øker betydelig. Dette er heldigvis enkelt å unngå ved å gjøre framtidig kartlegging under bedre forhold uten snø i sporet. Det bør bemerkes at mye nedbør også kan påvirke laserskanneren. Framtidig kartlegging bør dermed utføres under gode værmessige forhold.

6.5.3 Feilbudsjett

Det er flere feilkilder som påvirker resultatet fra denne typen kartlegging. I det følgende vurderes påvirkningene til den absolutte- og relative nøyaktigheten hver for seg. Den den absolutte nøyaktigheten brukes til å posisjonere sporet, mens den relative nøyaktigheten brukes til å bestemme sporets geometri. Den totale nøyaktigheten er avhengig av resultatet fra både den absolutte,- og relative løsningen.

Feilkilder nyttet til absolutt nøyaktighet

Den absolutte nøyaktigheten vil først og fremst være dominert av GNSS- og INS løsningen. Denne løsningen er avhengig av satellitt-geometrien, som avgjør om man har fix-løsning eller ikke. I tillegg vil usikkerheten til målingene påvirke denne absolutte løsningen.

Som nevnt tidligere vil nøyaktigheten til dette datasettet være 39 mm og 48 mm i henholdsvis horisontal og vertikal retning. Nøyaktigheten til orienteringen vil være 0.137 grader i roll, 0.152 grader i pitch og 2.142 grader i heading. Dermed er selve usikkerheten i målingene relativt liten. Dette fører til at usikkerheten til navigasjonsløsningen har liten betydning for den absolutte posisjonen.

Dette kan illustreres ved å se på den differensielle løsningen. Som nevnt tidligere i delkapittel 3.3.1 har DGNSS en potensiell nøyaktighet på $5\text{mm} + 1\text{ppm}$. Dette gjelder for etterprosesserte data hvor observasjonene er gjort statisk. I tillegg til dette sier standarden at man kan oppnå en nøyaktighet på $10 - 20\text{mm} + 2\text{ppm}$ i en kinematisk sanntidsløsning. Ettersom målesekkene eller den framtidige måletrallen gjør kinematiske observasjoner der disse dataene blir etterprosessert, skaper dette et problem. Det skyldes at det ikke finnes noen standard for etterprosessert kinematisk data. I henhold til standarden er det logisk å anta at en etterprosessert kinematisk løsning vil ha en forventet nøyaktighet i området fra $5 - 20\text{mm} + 1 - 2\text{ppm}$, som er en kombinasjon fra statisk og kinematisk løsning. Ved å ta i bruk et INS, slik det er gjort i dette testprosjektet, vil man samtidig ha bedre kontroll på den kinematiske mottakeren, og kan dermed eliminere en del støy. Dette resulterer i at nøyaktigheten øker.

Dette kan illustreres ved å se på den gjennomsnittlige nøyaktigheten (meridianen) til det aktuelle datasettet fra målesekkene. Den meridianen er på 0.030 meter. Den typiske lengden på baselinjene i dette datasettet er 25 km. Noe som resulterer i en forventet nøyaktighet på for en σ blir $5\text{mm} + 1\text{ppm}$. Ettersom kartverket sin standard er beregnet på to σ fører dette til at en forventet nøyaktighet på $10\text{mm} + 1\text{ppm}$. Dette samsvarer med antakelsen om at kinematisk etterprosessering vil ende opp i dette området. Nøyaktigheten vil dermed være avhengig av lengden på baselinjene.

Laserskanneren sin oppgave er å overføre den absolutte posisjonen gitt fra GNSS- og INS-løsningen til sporet. Ettersom man klarer å overføre posisjonen og orienteringen ned til laserskanneren nesten feilfritt vil den absolutte nøyaktigheten være avhengig av selve målenøyaktigheten til laserskanneren. Denne kan forbedres ved å midle observasjonene over større avstander. Ettersom den tradisjonelle metoden

kun gjør en måling hver 10 meter, kan det tenkes at det er mulig å midle laserobservasjonen over en avstand på 10 metersintervaller.

Orienteringen bestemt fra INS-løsningen vil ikke bidra noe særlig til denne nøyaktighetsfeilen. Det kan illustreres ved å se på feilen i henholdsvis roll, pitch og heading. Dersom INS-løsningen klarer å oppnå sine spesifikasjoner med 0.025 grader for roll og pitch, og 0.080 grader for heading vil dette ha en påvirkningseffekt i roll og pitch på $0.025 \text{deg} * \frac{\pi}{180} * 1.5 \text{meter} = 0.645 \text{mm}$, mens en usikkerheten i heading vil være på 0.209mm. I dette aktuelle datasettet er denne feilen på 3.5mm, 3.9mm og 56mm. Dette betyr at dersom man klarer å oppnå spesifikasjonene kan feilen neglisjeres. I dette datasettet har disse feilene en liten påvirkning på noen få millimeter. Ved å bruke to GNSS-antenner vil denne feilen trolig bli så liten at den også kan neglisjeres.

Feilkilder knyttet til relativ nøyaktighet

Den relative nøyaktigheten bestemmes i hovedsak fra laserskanneren med støtte fra INS-løsningen. INS-løsningen kan neglisjeres også i dette tilfellet. Som følge av de samme argumentene som for den absolutte nøyaktigheten. Dette resulterer i at den relative nøyaktigheten så å si er avhengig av laserskanneren sin målenøyaktighet.

Ved å ta noen antakelser kan man undersøke om denne nøyaktigheten kan forbedres. VLP-16 sender ut 300 000 punkter per sekund, noe som tilsvarer 18 750 punkter per kanal. Rotasjonshastigheten til skanneren er på 20 Hz. En enkelt rotasjon vil dermed detektere omtrent 1000 punkter. Av disse 1000 punktene er vi bare interessert i 200 punkt, fordi skinnene kun er en liten del av sirkelen. Skinnenes andel vil da tilsvarer til ca 400 punkter per sekund. Ettersom man gjør observasjonene kinematisk er man avhengig av hastigheten. En hastighet på 50 km/t vil gi ca 25 punkt per meter per kanal. Støynivået til disse punktene finnes ved $\sqrt{25} = 5$. Nøyaktigheten for en kanal kan dermed beregnes ved $\frac{0.030m}{5} = 0.060m = 6mm$. Ved å ta i bruk alle de 16 kanalene får man dermed en nøyaktighet på 1,5 mm. Denne nøyaktigheten kan reduseres ved å midle over større avstander. Gitt en avstand på 10 meter så vil nøyaktigheten bli 1,9 meter som følge av $\frac{0.03m}{\sqrt{25}} / \sqrt{10m}$. Det burde dermed være mulig å forbedre nøyaktigheten ved å midle antall observasjoner over en større strekning. Ettersom den tradisjonelle målemetoden kun måler hver 10 meter. Er det en logisk antagelse at man kan milde laserdataen over samme avstand.

6.5.4 Vurdering av systemets nøyaktighet

Resultatene fra måletrallen viser at man oppnår en nøyaktighet på centimeters nivå for posisjonen og et millimetersnivå for orienteringen. Laserskanneren har også en nøyaktighet i centimeters området. Disse resultatene er veldig gode til mange formål. Likevel klarer ikke målesekken, slik den er i dag, å tilfredsstille Bane NOR sine nøyaktighetskrav. Det er som nevnt flere ting som kunne gjort dette at dette resultatet ble bedre. Gunstigere montering, bruk av flere GNSS-mottakere, kortere avstand mellom skanner og sporene, og snøforholdene som førte til mye støy i laserobservasjonene

Kapittel 7

Konklusjon

7.1 Konklusjon

Basert på resultatene fra innsamlede data og de vurderinger som fremgår av oppgaven, kan det konkluderes med at en enkelt måletralle med fastmontert laser-skanner, GNSS-antennene og INS-sensorer mest sannsynlig kan innhente data som tilfredsstillende nøyaktighetskravene til jernbanesporene slik Bane NOR krever. Det tas likevel forbehold ettersom det er behov for videre testing med en fremtidig prototype. I oppgavens konkrete tilfelle, med bruk av målesekk, er det ikke mulig å tilfredsstillende de tekniske kravene som Bane NOR stiller.

Denne hovedproblemstillingen har også reist flere underproblemstillinger.

Den første underproblemstillingen var: Hva er rollen til et lite og fleksibelt system i forhold til dagens metoder.

Tidligere redegjørelse viser at et lite fleksibelt system vil føre til en mer effektiv datainnsamling enn dagens metoder. I tillegg vil et lite mobile mapping system ikke ha problemer med å komme til på avstengte anleggsområder, og kan dermed utføre arbeid som Roger 1000 ikke klarer. Det nye fleksible systemet er også planlagt med en løsning som lar brukeren flytte hele plattformen fra et kjøretøy til et annet. Dette systemet bruker kinematiske observasjoner noe som gjør datafangsttiden betydelig kortere enn ved bruk av sporbukk. Systemet kan dermed anvendes på flere områder enn dagens utstyr og metoder.

Den andre underproblemstillingen var: I lys av den teknologiske utviklingen, kan de nye satellittsystemene Galileo og BeiDou bidra til en bedre nøyaktighet og dermed til en revurdering av det tekniske regelverket til Bane NOR.

Basert på resultatene fra de innsamlede datasettene er det tydelig at ved å ta i bruk Galileo og BeiDou vil man forbedre nøyaktigheten i områder med dårlig satellittgeometri. Det at GPS og Galileo bruker de samme frekvensdomene medfører at ved mangel på GPS satellitter kan Galileo-signalet brukes til å "lage" en GPS-løsning. Galileo gir også, i forhold til andre eksisterende satellittsystemer, en bedre dekning i de nordligste delene av Norge.

Det tekniske regelverk til Bane NOR ble skrevet på en tid hvor satellittbasert posisjonsbestemmelse var svært nytt. Fagfeltet har siden da gjennomgått en omfattende teknologisk utvikling. Det kan derfor anses som nødvendig å implementere nyere utstyr og metoder som utnytter de nye satellittsystemene i det tekniske regelverket.

Den siste underproblemstillingen var: Vurdere om det finnes en tids- og økonomisk besparelse ved å bruke et nytt og mindre system sammenlignet med dagens målemetoder. Undersøkelsene er i hovedsak basert på samtaler med fagpersonell i TerraTec og Bane NOR. Tidligere drøftelse viser at den nye metoden kan kartlegge tilsvarende og større områder på kortere tid. Det vurderes som sannsynlig at en samtidig får bruk for mindre personell. Metoden blir dermed både mer tidseffektivt og økonomisk besparende.

7.2 Veidere arbeid

Som vist til i konklusjonen tilfredsstillers ikke bruken av målesekkene Bane NOR sine nøyaktighetskrav per i dag. På bakgrunn av tidligere drøftelse kan det likevel antas at en fremtidig prototype av måletrallen vil tilfredsstillere disse kravene. Planleggingen av denne prototypen er allerede iverksatt av TerraTec. Gjennom samtaler med Jon Haugland har Bane NOR gitt uttrykk for stor interesse for videre testing og samarbeid knyttet til prototypen. Bane NOR kommer til å legge forholdene til rette for fremtidig testing.

Bibliografi

- BaneNor (2017a). Målevogner i bane nor roger 1000. Tilgjengelig fra <https://jernbaneskolen.no/neted/services/file/?hash=3866e60654d989515cc6b16945822ff6> (lest 02.03.2018).
- BaneNor (2017b). Roger gjør togreisen tryggere. Tilgjengelig fra <https://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2017/roger-jakter-pa-vindskjevespor/> (lest 02.03.2018).
- BaneNor (2017c). Teknisk regelverk jd 530 kap 13.: Overbygning/prosjektering/utfesting og fastmerkenett. Tilgjengelig fra https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Utfesting_og_fastmerkenettg (lest 20.03.2018).
- BaneNor (2017d). Teknisk regelverk jd 532 kap 13.: Overbygning/vedlikehold/sporjustering og stabilisering. Tilgjengelig fra https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Vedlikehold/Sporjustering_og_stabilisering (lest 02.03.2018).
- BaneNOR (2018). Banekart - kilometrering. Tilgjengelig fra <http://banekart.banenor.no/kart/> (lest 27.04.2018).
- Brown, R. G. and Hwang, P. Y. C. (1997). *Introduction to random signals and applied Kalman filtering : with MATLAB exercises and solutions*. Wiley, New York, 3rd ed. edition.
- Farrell, J. (2008). *Aided navigation: GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill education.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Jekeli, C. (2001). *Inertial navigation systems with geodetic applications*. Walter de Gruyter.

- Kartverket (2017a). Cpos. Tilgjengelig fra <https://www.kartverket.no/posisjonstjenester/cpos/> (lest 03.04.2018).
- Kartverket (2017b). Jordas rutenett. Tilgjengelig fra <https://www.kartverket.no/kunnskap/kart-og-kartlegging/Jordas-rutenett/> (lest 27.04.2018).
- Kjørsvik, N. S. (2010). Introduction to inertial navigation. Technical report, Norwegian University of Life Sciences (NMBU).
- Kristiansen, O. (2015). Posisjonering med gps, teori og anvendelser. Norwegian University of Life Sciences (NMBU), IMT.
- Kumar, M. (2014). Multipath. Tilgjengelig fra <http://geoawesomeness.com/gnss-reflectometry-making-use-multipath-altimeter-measurements/> (lest 27.04.2018).
- Septentrio (2010). Septentrio polant-x. Tilgjengelig fra http://www.terrisgps.com/product_files/septentrio-polant-x-mf-datasheet_390.pdf (lest 30.04.2018).
- Statens Kartverk Geodesidivisjonen, . (2009). Standard for satellittbasert posisjonsbestemmelse. Tilgjengelig fra <https://www.kartverket.no/globalassets/standard/bransjestandarder-utover-sosi/satbasssystemer.pdf> (lest 03.04.2018).
- Tegedor, J. (2015). *Multi-constellation satellite navigation: Precise orbit determination and point positioning*. PhD thesis, Norwegian University of Life Sciences, [Faculty of Environmental Science and Technology], Department of Mathematical Sciences and Technology, Ås.
- Titterton, D. and Weston, J. L. (2004). *Strapdown inertial navigation technology*. Institution of Engineering and Technology.
- Trimble (2016). Trimble ap60,. Tilgjengelig fra https://www.applanix.com/downloads/products/specs/AP60_DS_NEW_0406_YW.pdf (lest 10.04.2018).
- Trimble (2017). Trimble apx-15,. Tilgjengelig fra https://www.applanix.com/downloads/products/specs/APX15_DS_NEW_0408_YW.pdf (lest 10.04.2018).
- Velodyne (2015). Velodyne lidar puck vlp 16. Tilgjengelig fra <https://www.autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2016/08/VLP-16-Puck.pdf> (lest 01.04.2018).
- Vosselman, G. and Maas, H.-G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC Press.

Woodman, O. J. (2007). An introduction to inertial navigation. Technical report, University of Cambridge, Computer Laboratory.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway