



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Ola Øvstedal

En kvalitetsundersøkelse av geometrisk nøyaktighet i håndholdte GNSS-enheter

A quality assessment of geometric accuracy in
handheld GNSS-units

Niklas Fosli Gjersø

Geomatikk

Fakultet for realfag og teknologi

Sammendrag

Pålitelig og nøyaktig posisjonering ved bruk av globale satellittnavigasjonssystemer finner stadig nye anvendelser i ulike sammenhenger, og i løpet av de siste årene har denne teknologien blitt mer og mer tilgjengelig på markedet i form av håndholdte GNSS-enheter. Denne oppgaven har gjennomført en kvalitetsundersøkelse av ytelsen i form av den horisontale, geometriske posisjonsnøyaktigheten til to håndholdte GNSS-enheter fra produsenten Garmin. Forerunner 310XT er en modell fra 2009 som kun benytter den amerikanske GPS-konstellasjonen, imens Fenix 5X er en nyere modell fra 2017 med mulighet for å benytte både GPS og russiske GLONASS-satellitter.

Oppgaven tok sikte på å sammenlikne posisjonsnøyaktigheten mellom de to modellene, undersøke bidraget fra GLONASS-konstellasjonen i Fenix 5X, undersøke effekten av sampling-rate på posisjonsnøyaktigheten, og til slutt beregne estimater på den statiske og kinematiske horisontale posisjonsnøyaktigheten for de ulike modellene med forskjellige innstillinger. Til dette formålet ble det lagt ned mye arbeid i beregningen av en fasit av vesentlig høyere nøyaktighet enn den oppgitte nøyaktigheten i de aktuelle GNSS-enhetene. For å få et helhetlig og representativt datagrunnlag ble det samlet inn data under ulike landskapssettinger og over lengre tid.

Oppgaven klarte ikke å finne noen signifikant forskjell i den horisontale posisjonsnøyaktigheten mellom modellene Fenix 5X og Forerunner 310XT, eller mellom å bruke sampling-rate på ett sekund eller «smart recording» i Fenix 5X. Resultatene viser antydninger til forbedringer i den horisontale posisjonsnøyaktigheten ved bruk av GPS+GLONASS i forhold til kun GPS i modellen Fenix 5X. Dersom man legger til grunn standardavvik eller enkeltavvik i grunnriss, ser det videre ut til at resultatene fra denne oppgaven stort sett holder seg innenfor de oppgitte nøyaktighetsspesifikasjonene til produsenten Garmin.

Abstract

Accurate and reliable positioning using global navigation satellite systems is gradually finding new applications. In recent years, this technology has become more and more available to consumers in the shape of handheld GNSS-units. The objective of this thesis has been to implement a quality assessment of the horizontal geometric accuracy of two handheld GNSS-units from Garmin. Forerunner 310XT was introduced in 2009 and uses the american GPS-constellation, while Fenix 5X is a newer model introduced in 2017 with GPS and russian GLONASS- compatibility.

The aim of the study was comparing the two models Fenix 5X and Forerunner 310XT, examining the contribution from the GLONASS-constellation in Fenix 5X, and examining the effect of data recording, all in terms of horizontal positional accuracy, whilst also calculating the expected static and kinematic accuracy for the two different models with different settings. A major part of the work consisted of data collection and calculating reference values of significantly higher accuracy than the stated accuracy in the tested handheld GNSS-units. In order to get representative estimates for the accuracy, data was collected from multiple sessions on separate days, and in different landscape settings.

The study did not find significant differences between Fenix 5X and Forerunner 310XT, or between data recording every second and smart recording in Fenix 5X, in terms of horizontal geometric accuracy. The results indicate slight improvements in horizontal geometric accuracy in Fenix 5X when using GPS+GLONASS compared to GPS only. Furthermore, the results seem to fall within the stated accuracy from Garmin, assuming the stated accuracy meaning horizontal error or horizontal standard deviation.

Forord

Jeg vil med denne oppgaven avslutte mitt femårige studium i geomatikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

Jeg vil i første omgang benytte anledningen til å takke min hovedveileder Ola Øvstedal og min tilleggsveileder Håvard Tveite for hjelp og gode råd i forbindelse med oppgaven. Jeg vil også takke professor Jon Glenn Omholt Gjevestad for hans bidrag med utstyr og beregninger i forbindelse med treghetsnavigasjon, Dr. Narve Schipper Kjørsvik og TerraTec AS for lisens til programvaren TerraPos, og Ivar Maalen-Johansen for råd og innspill.

For øvrig vil jeg takke venner og familie som har støttet meg gjennom denne perioden.

Innhold

Sammendrag	1
Abstract	2
Forord.....	3
1 Innledning.....	7
1.1 Bakgrunn.....	7
1.2 Formål med oppgaven.....	9
1.3 Tidligere studier	10
2 Teori.....	12
2.1 Nøyaktighet, presisjon og forplanting av varianser.....	12
2.2 Minste kvadraters metode og grovfeilsøk.....	16
2.3 Referansesystemer og referanserammer.....	19
2.4 GNSS	20
2.5 Treghetsnavigasjon.....	22
2.6 Fotogrammetri.....	23
2.7 Romlige data og romlig analyse.....	24
3 Forsøksdesign	26
4 Datainnsamling og beregninger	28
4.1 DEL 1: STATISK	28
4.1.1 Innledning	28
4.1.2 Metode	28
4.1.3 Verktøy.....	35
4.1.4 Datagrunnlag	36
4.1.4.1 Valg av testområder.....	36
4.1.4.2 Referansepunkt.....	37
4.1.4.2.1 GNSS-vektorer.....	37
4.1.4.2.2 Totalstasjon og prisme	39
4.1.4.2.3 Grovfeilsøk og kontroll.....	40
4.1.4.2.3.1 Leica Geo Office	40
4.1.4.2.3.2 GISLINE	44
4.1.4.2.4 Utjevning og endelige referansepunkt	49
4.1.4.3 Testobjekter	56
4.1.4.3.1 Rutiner for datainnsamling	56

4.1.4.3.2	Prosessering av data fra testobjekter	58
4.2	DEL 2: KINEMATISK	59
4.2.1	Innledning	59
4.2.2	Metode	59
4.2.3	Verktøy.....	64
4.2.4	Datagrunnlag	65
4.2.4.1	Valg av testområde	65
4.2.4.2	Referanse	66
4.2.4.2.1	Tur- og friluftsruter	66
4.2.4.2.2	Ortofoto	67
4.2.4.2.3	IMU/GNSS	69
4.2.4.2.4	Kontroll og grovfeilsøk	75
4.2.4.2.5	Utjevning og endelig referanse	82
4.2.4.3	Testobjekter	85
4.2.4.3.1	Rutiner for datainnsamling	85
4.2.4.3.2	Prosessering av data fra testobjekter	87
5	Resultater	88
5.1	Sammenlikning av modeller	88
5.1.1	Statisk posisjonsnøyaktighet	88
5.1.2	Paret T-test	89
5.1.3	Pitman's T	90
5.1.3.1	Nord-komponent	90
5.1.3.2	Øst-komponent.....	91
5.2	Bidrag fra GLONASS i Fenix 5X.....	92
5.2.1	Statisk posisjonsnøyaktighet	92
5.2.2	Paret T-test	93
5.2.3	Pitman's T	94
5.2.3.1	Nord-komponent	94
5.2.3.2	Øst- komponent.....	95
5.3	Sammenlikning av sampling-rate	96
5.3.1	Kinematisk posisjonsnøyaktighet	96
5.3.2	Paret T-test	97
5.4	Forventet statistisk posisjonsnøyaktighet.....	98

5.4.1 Fenix 5X kun GPS	98
5.4.2 Fenix 5X GPS+GLONASS	101
5.4.3 Forerunner 310XT	104
5.5 Forventet kinematisk posisjonsnøyaktighet	107
5.5.1 Fenix 5X kun GPS - 1 sekund rate	107
5.5.2 Fenix 5X kun GPS - smart recording.....	108
5.5.3 Fenix 5X GPS+GLONASS – 1 sekund rate	109
5.5.4 Forerunner 310XT – 1 sekund rate	110
6 Diskusjon og konklusjon	111
6.1 Diskusjon.....	111
6.2 Konklusjon	113
6.2.1 Hovedkonklusjon	116
6.3 Videre arbeid	117
7 Bibliografi.....	118
Appendiks A.....	122
Appendiks B.....	126
Appendiks C.....	128

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Den permanente avviklingen av Selective Availability i det amerikanske globale satellittnavigasjonssystemet GPS rundt årtusenskiftet (Seeber, 2003) har gjort presis, satellittbasert posisjonsbestemmelse tilgjengelig for mange brukere. På grunn av sin globale dekning, allmenne tilgjengelighet og høye pålitelighet blir GPS brukt til både profesjonelle og ikke-profesjonelle formål (Ghilani, 2010). I løpet av de siste årene har også flere satellittnavigasjonssystemer blitt utviklet, eller fått betydelige oppgraderinger av mange ulike land og organisasjoner (Kaartinen, et al., 2015) (Ghilani, 2010). En samlebetegnelse for slike globale satellittnavigasjonssystemer er GNSS – «Global Navigation Satellite System» (Seeber, 2003). GNSS-mottakere har gradvis blitt mer tilgjengelig for forbrukere, blant annet i mobiltelefoner og i andre håndholdte enheter (Schaefer & Woodyer, 2015) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005).

Ved nåværende tidspunkt er det allerede utviklet teknikker og metoder som kan oppnå centimeter nøyaktighet på posisjoner på jorda ved bruk av GNSS-teknologi (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Schaefer & Woodyer, 2015). Å oppnå en nøyaktighet innenfor 1 centimeter krever dog ofte dyrere instrumenter, spesiell programvare for prosessering og påføring av differensielle korreksjoner, samt profesjonell kompetanse (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). Til mange formål vil ikke høye krav til nøyaktighet være like nødvendig, og GNSS-mottakere vil derfor ofte kategoriseres ut i fra pris og hvilket formål de skal benyttes til. I litteraturen refereres det ofte til GNSS-mottakere i kategoriene «consumer-grade» eller «recreational-grade», «survey-grade» og «mapping-grade» (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). De to førstnevnte kategoriene består av billigere, håndholdte GNSS-mottakere med en oppgitt posisjonsnøyaktighet på mellom 2 og 20 meter (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, 2008) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Schaefer & Woodyer, 2015), imens de to sistnevnte kategoriene består av dyrere og bedre mottakere med en oppgitt posisjonsnøyaktighet på mellom 5 meter og 1 centimeter (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). Selv om GNSS-mottakere av «consumer-grade» eller «recreational-grade» oppnår en vesentlig dårligere posisjonsnøyaktighet enn det som i dag er mulig, innehar disse GNSS-mottakerne andre egenskaper som i mange sammenhenger kan være fordelaktige. I tillegg til å være betydelig billigere, er de også mer tilgjengelige og mobile (Schaefer & Woodyer, 2015).

I denne oppgaven skal det gjennomføres en kvalitetsundersøkelse av den horisontale geometriske posisjonsnøyaktigheten til GNSS-mottakerne i løpeklokkene Fenix 5X og Forerunner 310XT fra produsenten Garmin. Løpeklokkene inneholder bred funksjonalitet for bruk i ulike rekreasjonsaktiviteter, og kan blant annet beregne og visualisere brukerens

posisjoner i kart, i tillegg til å kunne beregne estimerer på hastighet og tilbakelagt avstand (Garmin A., 2017). Mye av denne funksjonaliteten baseres på GNSS-mottakere som er integrert inne i de ulike løpeklokkene, og som all annen teknologi innehar disse løpeklokkene begrensninger. For optimal funksjon er teknologien blant annet avhengig av et tilstrekkelig antall tilgjengelige satellitter å måle til og at signalet fra satellittene ikke blokkeres eller forstyrres av nærliggende obstruksjoner. I tillegg kan ytelsen variere som følge av faktorer som atmosfæriske forhold og den geometriske konfigurasjonen til satellittene (Garmin A., 2017) (Garmin A., 2018). Ved ordinær bruk av løpeklokkene kan det ikke nødvendigvis alltid garanteres optimale forhold for bruk av GNSS-teknologi, noe som er et viktig element å ta i betraktning for å vurdere den helhetlige ytelsen i form av posisjonsnøyaktighet.

Forerunner 310XT er en eldre modell lansert i 2009 og benytter kun den amerikanske GPS-konstellasjonen, imens Fenix 5X er en nyere modell fra 2017 med mulighet for å benytte både GPS og russiske GLONASS-satellitter. I begge modellene av løpeklokker kan brukeren også velge å registrere punktobservasjoner hvert sekund, eller benytte seg av funksjonen «smart recording» som registrerer færre punktobservasjoner under bruk av løpeklokkene, og som har til hensikt å spare plass i enhetene (Garmin, 2013) (Garmin C., 2018). Oppgaven vil i første omgang sammenlikne ytelsen til GNSS-mottakerne for de ulike modellene med ulike innstillinger, og deretter undersøke den forventede posisjonsnøyaktigheten til GNSS-mottakerne i de aktuelle løpeklokkene under ulike forhold. På et overordnet nivå vil oppgaven ta sikte på å avdekke eventuelle forbedringer i nyere teknologi sammenliknet med eldre teknologi i GNSS-mottakere i løpeklokker fra Garmin, og derfor gi et frampek i hva en kan forvente seg av forbedringer i fremtiden i den horisontale geometriske posisjonsnøyaktigheten i håndholdte, billigere GNSS-mottakere.

1.2 Formål med oppgaven

Formålet med denne oppgaven er å undersøke og analysere ytelsen til GNSS-mottakerne i løpeklokkene Forerunner 310XT og Fenix 5X fra Garmin i form av horisontal posisjonsnøyaktighet.

Problemstillingene oppgaven baserer seg på er gitt som følger

- Hvilken av modellene Forerunner 310XT og Fenix 5X gir best posisjonsnøyaktighet?
- Bidrar GLONASS-konstellasjonen til posisjonsnøyaktigheten i modellen Fenix 5X?
- Forverres posisjonsnøyaktigheten ved bruk av «smart recording» i Fenix 5X?
- Hvilken statistisk og kinematisk posisjonsnøyaktighet kan forventes under ulike måleforhold for de ulike modellene med ulike innstillinger?

Oppgaven vil bli delt i to deler: I første del av oppgaven skal posisjonsnøyaktigheten til løpeklokkene undersøkes når de er i ro, og i den andre delen skal posisjonsnøyaktigheten undersøkes når løpeklokkene er i bevegelse. Det påpekes igjen her at det er den horisontale posisjonsnøyaktigheten som skal undersøkes.

1.3 Tidligere studier

På sine nettsider oppgir produsenten Garmin en posisjonsnøyaktighet innenfor 5-10 meter generelt for alle sine mottakere under normale forhold, og at mottakerne har en nøyaktighet innenfor 15 meter 95% av tiden (Garmin A., 2018) (Garmin A., 2017). Samtidig informeres det om at alle Garmin-mottakere mottar C/A-koden på L1-frekvensen (Garmin B., 2018). Basert på denne informasjonen er det derfor plausibelt å anta at GNSS-mottakerne i de aktuelle løpeklokkene i denne oppgaven én-frekvente og havner innenfor kategoriene «consumer-grade» eller «recreational-grade» som nevnt i avsnitt 1.1. Det er viktig å poengtere her at Garmin definerer nøyaktighet som posisjonsestimatenes nærhet til den sanne verdien (Garmin B., 2017), men oppgir ikke et konkret kvalitetsmål i forbindelse med de oppgitte tallene.

På grunn av egenskaper som høy tilgjengelighet, høy mobilitet og et generelt lavt prisnivå har GNSS-mottakere i kategoriene «recreational-grade» eller «consumer-grade» vært attraktive for bruk til feltarbeid av ulik art, som for eksempel i forbindelse med skogbruk eller i diverse studentprosjekter (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Schaefer & Woodyer, 2015) (Wing, 2008) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). I feltarbeid i forbindelse med skogbruk kan det ofte ikke garanteres optimale måleforhold til enhver tid på grunn av vegetasjon eller kupert terreng som forhindrer mottak av signaler fra satellitter (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005), og den oppnåelige posisjonsnøyaktigheten for GNSS-mottakere under ulike landskapssettinger med varierende måleforhold er derfor av stor interesse for denne bransjen.

I tidligere studier fra 2009, 2008 og 2005 ble den horisontale posisjonsnøyaktigheten til et sett med GNSS- mottakere av «consumer-grade» undersøkt ved målinger under ulike vegetasjonsforhold, og blant disse var flere av de undersøkte mottakerne fra produsenten Garmin. I undersøkelsen Wing et al., (2005) ble posisjonsnøyaktigheten oppgitt både som den gjennomsnittlige, horisontale avstanden mellom punktobservasjonene og fasiten med tilhørende standardavvik, og som forventet posisjonsnøyaktighet i form av et 95% konfidensintervall basert på RMSE – «Root Mean Squared Error». Resultatene viste at posisjonsnøyaktigheten i form den gjennomsnittlige horisontale avstanden varierte fra 0.8 meter til 26.0 meter, og posisjonsnøyaktigheten i form av et 95% konfidensintervall basert på RMSE varierte fra 2.0 meter til 34.6 meter. Hvert av disse estimatene er basert på 150 målinger med de aktuelle mottakerne (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). Wing, (2008) viste at posisjonsnøyaktigheten i form av gjennomsnittlig horisontal avstand mellom fasiten og punktobservasjonene til de aktuelle mottakerne varierte fra 0.9 meter til 13.0 meter, avhengig av vegetasjonsforhold, typen av mottaker og antall målinger estimatene var basert på (Wing, 2008). Videre viste begge de sistnevnte undersøkelsene at posisjonsnøyaktigheten i GNSS-mottakerne tilsynelatende forringes under dårlige måleforhold, som for eksempel ved måling under lukket kronetak i skogen i forhold til målinger under åpen himmel (Wing,

Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008). I Andersen et al., (2009) ble posisjonsnøyaktigheten i form av RMSE til en GNSS-mottaker i kategorien «recreational-grade» beregnet til 3-7 meter basert på målinger i flere ulike skogsområder. Det kommer videre ikke klart frem om beregnet RMSE i denne undersøkelsen kun gjelder i grunnriss.

Det er viktig å merke seg at de testede mottakerne i Andersen et al., (2009), Wing, (2008) og Wing et al., (2005) har stått i ro under datainnsamlingen. Dette er en vesentlig forskjell fra vanlig bruk av løpeklokker, som av naturlige årsaker også kan brukes i bevegelse. I Kaartinen et al., (2015) ble den kinematiske posisjonsnøyaktigheten i grunnriss til GNSS-mottakere av ulik kvalitet, blant annet en Garmin-mottaker av «recreational-grade», undersøkt under ulike vegetasjonsforhold. Undersøkelsen beregnet den kinematiske posisjonsnøyaktigheten i grunnriss i form av RMSE til én-frekvente GNSS-mottakerne under ulike kronetak i skogen til 4.2 - 9.3 meter (Kaartinen, et al., 2015).

I undersøkelsene fra Andersen et al., (2009), Wing, (2008) og Wing et al., (2005) ble kun GPS-konstellasjonen i «recreational-grade»-mottakerne benyttet i beregningen av posisjonene, imens alle de testede GNSS-mottakerne i Kaartinen et al., (2015) har brukt både GPS og GLONASS-satellitter. Den russiske GLONASS-konstellasjonen har gjennomgått flere oppgraderinger de siste årene og skal nå være operasjonell (Kaartinen, et al., 2015) (Torge & Müller, 2012). Bruk av flere GNSS-konstellasjoner har blitt vanligere for billigere GNSS-mottakere i mobiltelefoner og for GNSS-mottakere i kategorien «recreational-grade» i løpet av de siste årene, mye på grunn av høyere krav til ytelse og pålitelighet (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Schaefer & Woodyer, 2015) (Kaartinen, et al., 2015). I diverse litteratur påpekes det også ofte at inkludering av flere GNSS-konstellasjoner, for eksempel GLONASS, vil øke antallet tilgjengelige satellitter å måle til, forbedre dekningen og dermed potensielt gi bedre posisjonering (Kristiansen, 2017) (Torge & Müller, 2012) (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Kaartinen, et al., 2015). Schaefer & Woodyer, (2015) fant dog ut at det ikke var noen signifikant forskjell i den absolutte posisjonsnøyaktigheten med og uten bruk av GLONASS-satellitter i Sony-mobiltelefoner, og at den relative posisjonsnøyaktigheten blir dårligere ved bruk av GLONASS (Schaefer & Woodyer, 2015). Andersen et al., (2009) fant derimot ut at bruk av GLONASS-satellitter bidro til en svak forbedring i posisjonsnøyaktigheten i form av RMSE ved beregning av GNSS-vektorer med GNSS-mottakere i kategorien «survey-grade». Selv oppgir produsenten Garmin at bruk av flere satellitter kan gi en mer pålitelig løsning (Garmin A., 2017).

Ved nåværende tidspunkt har det ikke vært mulig å finne undersøkelser som tar for seg posisjonsnøyaktigheten i de aktuelle løpeklokke-modellene Fenix 5X og Forerunner 310XT fra Garmin, eller innvirkning av ulike innstillinger i løpeklokkene på posisjonsnøyaktigheten. Videre kommer det heller ikke klart frem på Garmin sine nettsider om hvilket kvalitetsmål som benyttes for å beskrive den oppgitte posisjonsnøyaktigheten, noe denne oppgaven vil ta sikte på å beregne.

2 Teori

I dette kapitlet skal det gjøres rede for de teoretiske begrepene som ligger til grunn for resten av oppgaven.

2.1 Nøyaktighet, presisjon og forplantning av varianser

For definisjon av nøyaktighetsbegrepet er det i denne oppgaven valgt å ta utgangspunkt i Kartverkets standard «*Standarder Geografisk Informasjon Geodatakvalitet, versjon 1.0 – 2015*». Formålet med denne standarden er å fastsette prinsippene for beskrivelsen av kvaliteten på geodata (Statens kartverk, 2015). I denne standarden defineres følgende sentrale begreper

- Avvik: «*forskjell fra sann verdi, fra det man antar er den sanne verdi, eller forskjellen mellom to målte verdier for samme størrelse*» (Statens kartverk, 2015, s. 10).
- Nøyaktighet: «*mål for en verdis nærhet til sin sanne verdi eller til det man antar er den sanne verdi*» (Statens kartverk, 2015, s. 12).
- Absolutt nøyaktighet: «*nøyaktighet i forhold til en definert geodetisk referanseramme. Nøyaktighet kan være gitt ved standardavvik, sant avvik e. l. og vanligvis i forhold til det koordinatsystem som den aktuelle måling eller beregning er utført i*» (Statens kartverk, 2015, s. 10).
- Standardavvik: «*statistisk størrelse som angir spredningen for en gruppe måle- eller beregningsverdier i forhold til deres sanne eller estimerte verdi. Internasjonalt benyttes også begrepet RMSE. Ved høy overbestemmelse(mange målinger) vil RMSE og standardavvik være sammenfallende*» (Statens kartverk, 2015, s. 13).

For best mulig konsistens fastsettes det at posisjonsnøyaktighet i denne oppgaven er ekvivalent med definisjonen av absolutt nøyaktighet i grunnriss. Alle beregninger av posisjonsnøyaktighet gjøres i referanserammen EUREF89, og som kvalitetsmål på posisjonsnøyaktighet skal det benyttes standardavvik.

Under en antagelse om at datamaterialet er fritt for systematiske avvik, kan posisjonsnøyaktigheten i form av standardavvik s regnes ut ved (Statens kartverk, 2015)

$$s = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n} - s_f^2} \quad (1.1)$$

der ε angir de sanne enkeltavvikene, altså observert verdi minus verdi fra fasiten, n angir antall enkeltavvik og s_f angir fasitens standardavvik.

Dersom ε beregnes på grunnlag av sanne avvik, vil formelen for RMS gi samme verdi for RMS som standardavviket, slik at (Statens kartverk, 2015)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n}} = s \quad (1.2)$$

Punktstandardavviket i grunnriss regnes ut ved (Statens kartverk, 2015)

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (1.3)$$

der s_x angir standardavviket i nord-komponenten og s_y angir standardavviket i øst-komponenten.

Et annet og viktig kvalitetsmål er systematiske avvik, som kan beregnes med (Statens kartverk, 2015)

$$a = \frac{\sum \varepsilon}{n} \quad (1.4)$$

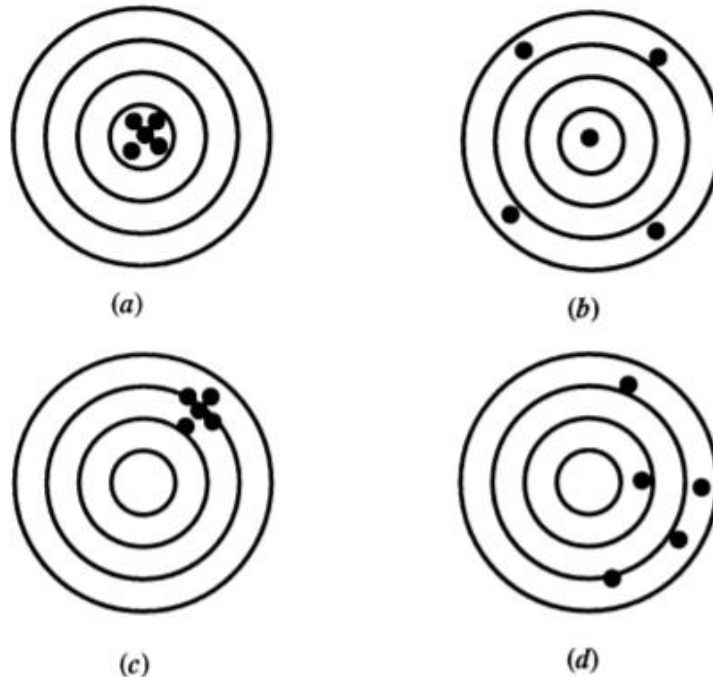
der ε angir enkeltavvikene og n angir antall enkeltavvik.

Systematisk punktavvik i grunnriss kan deretter regnes ut ved (Statens kartverk, 2015)

$$a_p = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (1.5)$$

der a_x er systematisk koordinatavvik i nord og a_y er systematisk koordinatavvik i øst.

Nøyaktighet er et mål for hvor nært en observert verdi ligger i forhold til en sann verdi, imens presisjon beskriver graden av konsistens i et sett med observasjoner. Presisjon gir dermed et mål på spredningen av de observerte verdiene (Ghilani, 2010).



Figur 1: Presisjon og nøyaktighet. Situasjon a viser høy presisjon og nøyaktighet, b viser lav presisjon og høy nøyaktighet, c viser høy presisjon og lav nøyaktighet, og d viser lav presisjon og lav nøyaktighet. Hentet fra Ghilani, (2010).

Figur 1 illustrerer situasjoner med ulik grad av presisjon og nøyaktighet. Her er det verdt å merke seg at situasjon c og d ofte kan skyldes tilstedeværelse av systematiske feil i de observerte verdiene (Ghilani, 2010).

I mange sammenhenger, for eksempel innen landmåling, vil ukjente verdier bestemmes indirekte ved bruk av en funksjonssammenheng mellom de ukjente verdiene og størrelser som kan observeres eller måles. Hver av disse observasjonene eller målingene kan inneholde feil som til slutt kan bidra til feil i den beregnede, ukjente verdien (Ghilani, 2010). Den spesielle loven for forplantning av varianser slår fast at (Ghilani, 2010)

$$\sigma_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (1.6)$$

der σ_Z angir standardavviket på det beregnede estimatet Z, x angir observasjoner av størrelser som er relatert til Z med tilhørende standardavvik σ_x , og $\frac{\partial Z}{\partial x}$ angir den partiell deriverte av Z med hensyn på x. Det antas her at hver av størrelsene x_1, x_2, \dots, x_n er uavhengige av hverandre (Ghilani, 2010). Formel (1.6) forteller altså hvordan usikkerheten i

de individuelle observasjonene vil forplante seg til usikkerheten i den estimerte verdien (Ghilani, 2010).

2.2 Minste kvadraters metode og grovfeilsøk

Ingen måling eller observasjon av en søkt størrelse er feilfri. Dersom den søkte størrelsen z har blitt observert n uavhengige ganger, kan det under en antagelse om normalfordeling av observasjonsfeilene vises at den mest sannsynlige verdien M for den søkte størrelsen z finnes ved å minimalisere feilkvadratsummen slik at (Ghilani, 2010)

$$\sum v^2 = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2 = \text{minimum} \quad (2.1)$$

der $v_1 = M - z_1, v_2 = M - z_2, v_3 = M - z_3, \dots, v_n = M - z_n$ og der z_n angir observasjon nummer n .

I en observasjonslikning relateres de observerte størrelsene til observasjonsresidualer og de søkte, ukjente parameterne. Dersom antall likninger er større enn antall ukjente vil systemet være overbestemt, og de ukjente parameterne kan bestemmes med minste kvadraters metode (Ghilani, 2010). På matriseform kan dette skrives som (Ghilani, 2010)

$$AX = L + V \quad (2.2)$$

der A angir designmatrisen som relaterer de ukjente parameterne X til observasjonene L og observasjonsresidualer V . Løsningen av formel (2.2) kan skrives som (Ghilani, 2010)

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L = N^{-1} A^T L \quad (2.3)$$

der N kalles normalmatrisen. Med vektete observasjoner blir løsningen (Ghilani, 2010)

$$X = N^{-1} A^T W L \quad (2.4)$$

der W er en vektsmatrise.

For ikke-lineære systemer må observasjonslikningene lineariseres med en førsteordens Taylor-rekke, og systemet må løses iterativt der korreksjoner legges til et sett med foreløpige verdier fram til korreksjonene er tilstrekkelig små (Ghilani, 2010).

Standardavvik på de søkte, ukjente parameterne med vektete observasjoner kan regnes ut ved (Ghilani, 2010)

$$S_i = S_0 \sqrt{q_{x_i x_i}} \quad (2.5)$$

der S_0 angir standardavviket på vektsenheten og $q_{x_i x_i}$ angir diagonalelementet i i kofaktormatrisen Q_{xx} . Disse kan finnes ved (Ghilani, 2010)

$$S_0 = \sqrt{\frac{v^T W v}{n - e}} \quad (2.6)$$

der $v^T W v$ er den vektete feilkvadratsummen, n er antall observasjoner og e er antall ukjente.

$$Q_{xx} = (A^T W A)^{-1} \quad (2.7)$$

der A er designmatrisen og W er vektsmatrisen.

Fordelene ved å bruke minste kvadraters metode til beregning av søkte parametere er blant annet at alle typer observasjoner kan inkluderes i beregningene, observasjonene kan tilegnes relative vekt basert på deres usikkerhet, i tillegg til at metoden gir kvalitetsmål på beregnede parametere (Ghilani, 2010). Metoden forutsetter dog at observasjonsfeilene er normalfordelt. Å gjennomføre en minste kvadraters metode på et sett med observasjoner refereres ofte i denne oppgaven til som å gjøre en utjevning. I en tvungen utjevning antas alle gittpunkt som kjent, imens i en fri utjevning antas et minimum antall gittpunkt kjent for å plassere og orientere dataene (Ghilani, 2010).

Tilstedeværelsen av store feil blant observasjonene som ikke kan regnes som tilfeldige, må detekteres og lukes ut før en utjevning kan gjennomføres (Gjevestad, 2018). Dette kalles også for grovfeilsøk. En metode for grovfeilsøk er å benytte en multipl t-test. Teststørrelsen t for en estimert grovfeil i en multipl t-test kan finnes ved (Gjevestad, 2018)

$$t = \frac{\widehat{V}_i}{\widehat{\sigma}_{V_i}} \quad (2.8)$$

der \widehat{V}_i er en estimert grovfeil i som finnes ved å estimere en tilleggsukjent i utjevningen, og $\widehat{\sigma}_{V_i}$ er tilhørende standardavvik. Dersom $|t| > t_{(n-e-1, 1-\alpha/2)}$, der $t_{(n-e-1, 1-\alpha/2)}$ er tabellverdi fra en t-fordeling med $n-e-1$ frihetsgrader ved α signifikansnivå, og n angir antall observasjoner og e angir antall ukjente, kan en grovfeil være tilstede i observasjon i (Gjevestad, 2018). Ved multipl testing må signifikansnivået skjerpes for å kompensere for den økte sannsynligheten for å begå Type-1 feil, altså sannsynligheten for å forkaste nullhypotesen når den egentlig er sann (Gjevestad, 2018). Sannsynligheten p_i for en hendelse kan skrives som (Gjevestad, 2018)

$$p_i = 1 - \alpha_i \quad (2.9)$$

Dersom det testes n uavhengige observasjoner vil den totale sannsynligheten for hendelsen være gitt ved (Gjevestad, 2018)

$$p_{tot} = p^n \quad (2.10)$$

Den totale sannsynligheten for ikke å gjøre en Type-1 feil kan skrives som (Gjevestad, 2018)

$$p_{tot} = 1 - \alpha_{tot} \quad (2.11)$$

Sannsynligheten til hver test kan dermed gis som (Gjevestad, 2018)

$$p_i = (1 - \alpha_{tot})^{\frac{1}{n}} \quad (2.12)$$

der α_{tot} er den totale sannsynligheten for å gjøre en Type-1 feil og n er antall observasjoner som testes. Det nye, skjerpede signifikansnivået kan dermed regnes med (Gjevestad, 2018)

$$\alpha_i = 1 - p_i \quad (2.13)$$

Dersom det er mange observasjoner som testes, settes en nedre grense for signifikansnivået (Gjevestad, 2018).

For å avdekke eventuelle feil i grunnlaget, kan feilkvadratsummene fra en fri utjevning sammenliknes med feilkvadratsummen fra en tvungen utjevning. Teststørrelsen f er gitt ved (Gjevestad, 2018)

$$f = \frac{(v^T W v)_2 - (v^T W v)_1 / (v_2 - v_1)}{(v^T W v)_1 / v_1} \quad (2.14)$$

der $(v^T W v)_2$ er feilkvadratsummen fra en tvangsutjevning, $(v^T W v)_1$ er feilkvadratsummen fra en friutjevning, v_1 er antall frihetsgrader i friutjevningen og v_2 er antall frihetsgrader i tvangsutjevningen. Hvis $f < F_{(v_2 - v_1, v, \alpha)}$, der $F_{(v_2 - v_1, v, \alpha)}$ er en tabellverdi fra en F-fordeling, kan ikke feilkvadratsummene sies å være forskjellige ved signifikansnivå α (Gjevestad, 2018).

Dersom en grov feil ikke detekteres av grovfeilsøket, kan den ytre påliteligheten fortelle hvor stor påvirkning denne grovfeilen vil ha på de søkte parameterne, som for eksempel de beregnede koordinatene (Ghilani, 2010). Den ytre påliteligheten ∇_x til koordinat x kan beregnes ved (Gjevestad, 2018)

$$\nabla_{max} = (A^T W A)^{-1} A^T W \nabla_{maxi} \quad (2.15)$$

der ∇_{maxi} er den største grovfeilen i observasjon i som ikke detekteres av grovfeilsøket. ∇_{maxi} beregnes som øvre grense for konfidensintervallet rundt den estimerte grovfeilen \widehat{v}_i .

2.3 Referansesystemer og referanserammer

Et referansesystem er en konseptuell definisjon av et koordinatsystem og består av konvensjoner og fysiske parametere som ligger til grunn for å kunne beskrive en entydig posisjon på jordkloden eller i verdensrommet. Disse konvensjonene består blant annet av definisjonen til origo og aksenes orientering i rommet (Seeber, 2003).

ITRS – «International Terrestrial Reference System» er et kartesisk koordinatsystem med jordas massemiddelpunkt som origo, lengdeenhet lik SI-meteren, og der aksene er orientert i henhold til BIH-orienteringen ved epoken 1984.0 (Seeber, 2003). En referanseramme er en realisering av det aktuelle referansesystemet og består av sett med stasjonskoordinater og deres hastigheter (Torge & Müller, 2012), målt inn ved hjelp av flere uavhengige geodetiske måleteknikker (Kristiansen, 2017). ITRF – «International Terrestrial Reference Frame» er dermed en realisering av ITRS (Kristiansen, 2017). På grunn av tektoniske platebevegelser, tide-effekter og andre deformasjoner av jordskorpen, er jordoverflaten i kontinuerlig endring, og for å ivareta dette trenger referanserammene å oppdateres med nye realiseringer med jevne mellomrom (Seeber, 2003). ETRF89 er en regional referanseramme for den eurasiske tektoniske jordplaten, og den norske realiseringen av denne referanserammen kalles EUREF89 (Kristiansen, 2017). Koordinater fra GNSS blir ofte gitt i de globale referanserammene WGS84 eller ITRF der de tektoniske platebevegelsene blir ivaretatt (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006). Ofte vil det være behov for transformasjon mellom de globale referanserammene WGS84 eller ITRF og den lokale referanserammen EUREF89, og da må forskjellene i referanserammene som er nevnt her tas i betraktning. ITRF og WGS84 kan regnes som identiske på centimeter-nivå (Seeber, 2003) (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006).

I et kartesisk koordinatsystem med aksene X, Y og Z kan en posisjon beskrives med en vektor med vektorkomponentene Δx , Δy og Δz , fra en valgt origo til punktet. I mange sammenhenger kan det være hensiktsmessig å transformere de kartesiske vektorkomponentene gitt i et globalt koordinatsystem, til komponenter i grunnriss og høyde gitt i et lokalt toposentrisk koordinatsystem. Dette kan gjøres med formelen (Kristiansen, 2017)

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta e \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

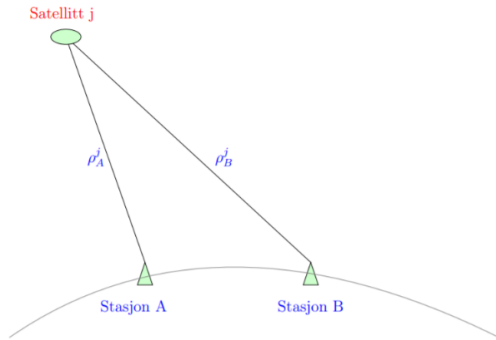
der φ og λ er de sfæriske koordinatene breddegrad og lengdegrad til punktet i origo, Δx , Δy og Δz er de kartesiske vektorkomponentene til den aktuelle vektoren, Δn , Δe og Δu er komponentene gitt i henholdsvis nord, øst og høyde i et lokalt koordinatsystem.

2.4 GNSS

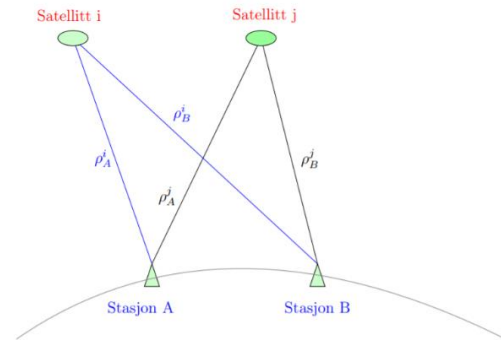
GNSS er navigasjonssystemer bestående av flere satellitter og kontrollstasjoner som skal kunne levere pålitelige og nøyaktige posisjoneringstjenester på et globalt nivå. Flere land og organisasjoner har utviklet, eller er i gang med utvikling av egne GNSS-konstellasjoner, blant annet amerikanske GPS, europeiske Galileo, russiske GLONASS og kinesiske Beidou (Kristiansen, 2017). Hvert system består av 20-30 satellitter. Ved bruk av GPS-konstellasjonen skal 4-8 satellitter være synlig til enhver tid, og ved en kombinasjon av GPS og GLONASS-satellitter skal mellom 12 og 16 satellitter være tilgjengelig til enhver tid hvor som helst på jordkloden (Torge & Müller, 2012). Ved inkludering av flere GNSS-konstellasjoner skal bedre satellittdekning oppnås, noe som potensielt vil kunne gi bedre posisjoneringstjenester (Kristiansen, 2017).

Prinsippet som ligger til grunn for bruk av GNSS er avstandsmålinger fra mottakerne med en ukjent posisjon, til satellitter med kjente koordinater i bane rundt jordkloden (Torge & Müller, 2012). For å kunne bestemme en nøyaktig og entydig posisjon for mottakeren må det måles til minst 4 satellitter (Kristiansen, 2017). Avstandene beregnes ved måling av en tidsforskjell mellom da signalet sendes ut av satellitten, til signalet mottas av en mottaker. Signalet propagerer med lysets hastighet og ved multiplikasjon av observert tidsforskjell, kan avstand regnes ut. Det genererte signalet i mottakeren og mottatte signalet vil være forskjøvet i forhold til hverandre, og ved korrelasjon beregnes dermed tidsforskjellen (Seeber, 2003). Ved bruk av kodemålinger utnytter man en kjent kodesekvens på signalet til å beregne tidsforskjellen. C/A-koden har en chiplengde på 293 meter, og man kan dermed oppnå en avstandsprecisjon på omtrent 2.9 meter (Kristiansen, 2017). Ved å måle på fasen til den innkommende bærebølgen kan en avstandsprecisjon på millimeternivå oppnås, men dette forutsetter bruk av mottakere som kan måle på fasen til bølgen (Kristiansen, 2017). Dette introduserer en tilleggsukjent på antall hele bølgelengder fra mottaker til satellitt, også kalt faseflertydighet (Kristiansen, 2017).

De største feilkildene ved bruk av GNSS innebærer klokkefeil i mottaker, refraksjon i troposfæren og ionosfæren, flerveis interferens, bane- og klokkefeil i satellitt, og antenne fasesenter-variasjoner (Torge & Müller, 2012). Refraksjon i ionosfæren kan kompenseres for ved å måle på flere frekvenser, men dette forutsetter bruk av flerfrekvente mottakere (Torge & Müller, 2012).



Figur 3: Enkeltdifferensiering. Hentet fra Kristiansen, (2017).



Figur 2: Dobbeldifferensiering. Hentet fra Kristiansen, (2017).

Ved å gjennomføre en såkalt differensiering kan det kompenseres for klokkefeil. Figur 3 illustrerer prinsippet for enkeltdifferensiering, der det måles til samme satellitt fra to mottakere for å eliminere klokkefeil i satellitt. Figur 2 illustrerer prinsippet for dobbeldifferensiering, der to mottakere måler til to av de samme satellitter for å eliminere klokkefeil i både mottaker og satellitt. En annen fordel med å benytte dobbeldifferensiering er at fasens flertydighet kan identifiseres som et heltall (Kristiansen, 2017).

Effekten av satellittenes geometriske konfigurasjon på nøyaktigheten til et punkt som skal beregnes kan beskrives med en verdi kalt «Dilution of Precision» - DOP. «Positional Dilution of Precision» - PDOP kan tolkes som den inverse til volumet av tetraederet som dannes mellom satellittene, der et lavt volum indikerer høy DOP og høyt volum indikerer lav DOP. For optimal nøyaktighet vil man etterstrebe en minimalisering av DOP-verdiene (Seeber, 2003).

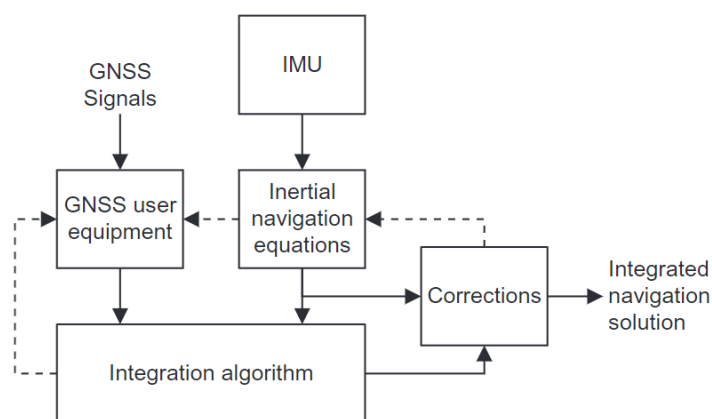
2.5 Treghetsnavigasjon

I forbindelse med treghetsnavigasjon er «IMU» en engelsk forkortelse for «Inertial Measurement Unit». En IMU består av ulike sensorer, blant annet akselerometre og gyroskoper, som henholdsvis måler akselerasjoner og vinkelhastigheter i tre ortogonale retninger (Groves, 2013).

INS står for «Inertial Navigation System», og omfatter både en IMU og en prosessor som beregner søkte estimater for posisjon, hastighet og retning. Akselerasjonene og vinkelhastighetene fra en IMU integreres over et gitt tidsintervall for å kunne beregne et estimat på posisjon, hastighet og retning etter en viss tid fra et vilkårlig startpunkt. Typiske datarater for en IMU ligger mellom 100 Hz og 1000 Hz (Groves, 2013).

Sensorene i en IMU er utsatt for ulike feilkilder, både i form av systematiske feil og i form av hvit støy. Magnituden av disse feilene er ofte avhengig av pris og kvalitet på sensorer, da billigere sensorer kan gi dårligere målinger enn dyrere sensorer. På grunn av integrasjonen av målingene fra sensorene over flere tidsintervall, vil feilene akkumuleres over tid. Disse feilene vil forplante seg til de søkte estimatene og vokse over tid, et fenomen kalt drift (Groves, 2013).

Til mange formål er det hensiktsmessig å kombinere INS med GNSS. INS har høy datarate, høy relativ nøyaktighet og er uavhengig av eksterne kilder, men vil over tid være sterkt utsatt for drift. GNSS har høy absolutt nøyaktighet, men har relativt lav datarate og er avhengig av eksterne kilder. GNSS og INS har dermed komplementære egenskaper som utfyller hverandre. Ved en kombinasjon av de to systemene sørger INS for å gi søkte estimater i perioder med bortfall av satellitter, imens GNSS kompenserer for drift i INS (Groves, 2013).

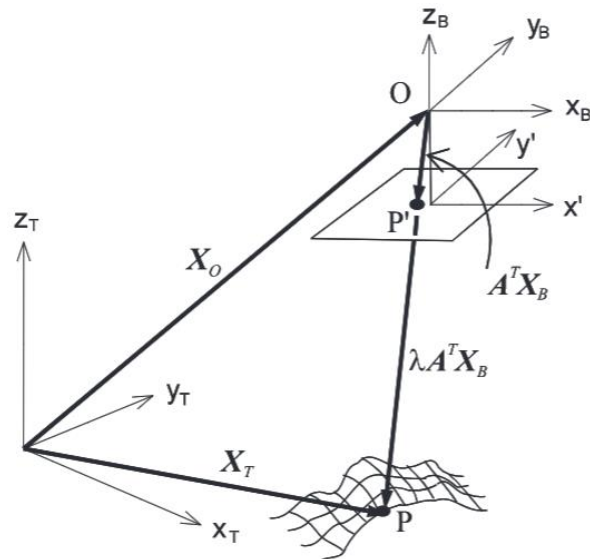


Figur 4: Generisk arkitektur for INS/GNSS integrasjon. Hentet fra Groves, (2013).

Figur 4 gir en generisk oversikt over arkitekturen for integrasjon av INS og GNSS.

2.6 Fotogrammetri

Fotogrammetri kan defineres som vitenskapen og den indirekte måleteknikken som benyttes når ulike geometriske egenskaper om objektet eller terrenget som er avbildet, skal bestemmes (Andersen Ø. , 2003). Ved avbildning av terreng eller objekt forutsettes det at bildet er dannet ved en sentralprojeksjon. Dette innebærer at punkt i terrenget, projeksjonssenter og bildepunkt ligger på en rett linje.



Figur 5: Størrelsene og geometrien i sentralprojeksjonen. Hentet fra Andersen, (2003).

Figur 5 illustrerer størrelsene som inngår i formel (6.1).

$$X_T = X_O + \lambda A^T X_B \quad (6.1)$$

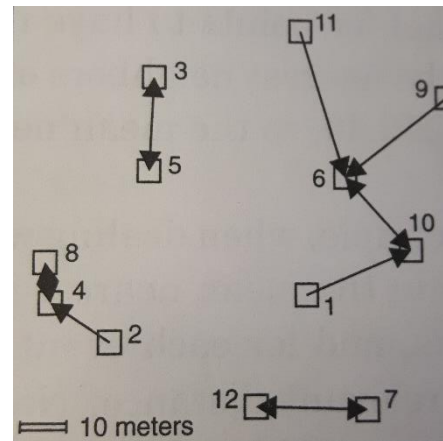
Med formel (6.1) kan koordinatene for punktet P i terrenget beregnes (Andersen Ø. , 2003). I likningen inngår rotasjonsmatrisen A, koordinater for projeksjonssenter X_O og målestokksfaktor λ , som sammen utgjør de ytre orienteringselementene. For å bestemme X_T må de ytre orienteringselementene og bildemålinger X_B være kjent (Andersen Ø. , 2003).

Et ortofoto er et bilde som har de samme geometriske egenskaper som et kart, og målinger kan dermed gjøres direkte i bildet. Fremstilling av ortofoto innebærer en prosess der de ytre orienteringselementene bestemmes ved hjelp av kjentpunkt i terrenget og INS/GNSS målinger, og der målestokksfaktoren bestemmes ved bruk av en digital terrengmodell – «DTM». Etter en slik prosess er hvert bildeelement stedfestet og avvik fra loddrett fotoakse er kompensert for. Nøyaktigheten i et ortofoto er i størst grad avhengig av høydeinformasjonen som benyttes i fremstillingsprosessen, nærmere bestemt nøyaktigheten og fullstendigheten til den digitale terrengmodellen (Andersen Ø. , 2003).

2.7 Romlige data og romlig analyse

Romlige data er data som kan knyttes til en spesifikk plassering eller posisjon i et angitt koordinatsystem. I hovedsak kan de romlige dataene representeres som vektordata eller som rasterdata (O'Sullivan & Unwin, 2010). I en vektorrepresentasjon kan de romlige dataene modelleres som geometriske objekter og representeres som punkt, linjer og polygon (O'Sullivan & Unwin, 2010). I en rasterrepresentasjon deles et område inn i rektangulære celler, også kalt piksler, der hver piksel tildeles en verdi for å beskrive geografisk variasjon (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010).

Avstand er et sentralt konsept som ofte brukes for å kunne beskrive romlige forhold. Den nærmeste naboavstanden for et punkt i et punktmønster kan defineres som avstanden fra det aktuelle punktet til det nærmeste punktet i det samme punktmønsteret (O'Sullivan & Unwin, 2010). Figur 6 illustrerer prinsippet med nærmeste naboavstand.



Figur 6: Avstander til de nærmeste nabopunktene i et punktmønster. Pilene mellom punktene angir nærmeste nabo. Hentet fra O'Sullivan & Unwin, (2010).

Med avstand menes vanligvis den euklidske, rettlinjede avstanden mellom to punkt, som kan regnes med Pythagoras-teoremet (O'Sullivan & Unwin, 2010)

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7.1)$$

der (x_i, y_i) er koordinatene til punktet i og (x_j, y_j) er koordinatene til punktet j .

Romlig sampling innebærer en prosess hvor det gjøres et utvalg av punkt fra et todimensjonalt område eller et kontinuerlig felt. Avgrensningen av området hvor den romlige samplingen skal foregå refereres til som sampling-rammen. Hvilket kriterium som ligger til grunn for utvelgelsen av disse punktene refereres ofte til som sampling-design. Eksempler på slike sampling-design kan være tilfeldig sampling, stratifisert sampling eller transekt-sampling (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010).

Romlig interpolasjon innebærer teknikker som tar sikte på å gjøre prediksjoner av verdier til attributter på steder hvor det ikke er gjort målinger, basert på målinger i nærliggende kontrollpunkt. Eksempler på slike romlige interpolasjoner kan være å bruke verdien fra nærmeste nabo, bruke det lokale gjennomsnittet av kontrollpunkt eller bruke en vektning basert på avstanden til kontrollpunktene (O'Sullivan & Unwin, 2010).

Romlig analyse er et bredt begrep som omfatter operasjoner innen manipulasjon, statistisk analyse og modellering av de romlige dataene. Geografiske informasjonssystemer – GIS, er

programvare som kan gjennomføre en eller flere av de nevnte operasjonene, og inkluderer vanligvis manipulasjon av romlige data (O'Sullivan & Unwin, 2010). Eksempler på slike manipulasjoner kan være operasjoner som «Buffer» eller «Overlay». En buffer-operasjon regnes som en av de viktigste operasjonene i en GIS-programvare, og kan gjennomføres på alle mulige objekttyper. Operasjonen tar sikte på å finne alle områder innenfor en spesifisert avstand fra et objekt, noe som resulterer i dannelsen av en ny polygon (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010). En overlay-operasjon innebærer å kombinere informasjon fra to eller flere kartlag. For eksempel vil det i en polygon-overlay kombineres to eller flere objekter av typen polygon for å finne hvilke deler av polygonene som overlapper (O'Sullivan & Unwin, 2010). Ved kobling av tabeller, også kalt «Join», kombineres innholdet fra to tabeller basert på en felles nøkkel. I GIS-programvare kan slike tabeller kobles basert på et romlig forhold basert på geografisk plassering (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010).

3 Forsøksdesign

Med testobjekter menes det de aktuelle GNSS-mottakerne som skal undersøkes, nærmere bestemt GNSS-mottakerne i modellene Forerunner 310XT og Fenix 5X. Basert på opplysninger fra tidligere studier og fra Garmin sin hjemmeside, tas det utgangspunkt i en apriori posisjonsnøyaktighet på 5-10 meter i testobjektene før undersøkelsene starter (Garmin A., 2018) (Kaartinen, et al., 2015) (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008). Igjen er det viktig å poengtere her at Garmin definerer nøyaktigheten som nærheten til sann verdi (Garmin B., 2017), men oppgir ikke et konkret kvalitetsmål.

Oppgaven skal deles inn i en statisk og en kinematisk del. I den statiske delen samles det inn data når testobjektene står i ro, og i den kinematiske delen samles det inn data når testobjektene er i bevegelse. Her er det viktig å merke seg at i den statiske delen kan observasjonene fra testobjektene kun representeres som punkt, men i den kinematiske delen kan observasjonene representeres både som punkt og som linjer. Begge representasjonene skal brukes.

Tidligere studier har vist at å måle med GNSS-mottakere under lukket kronetak i skogen kan forverre posisjonsnøyaktigheten i forhold til å måle under åpen himmel (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, 2008) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). Med utgangspunkt i dette velges det ut ett testområde under åpen himmel, og ett testområde under lukket kronetak i skogen i den statiske delen. Disse testområdene skal representere henholdsvis gode og vanskelige måleforhold for GNSS-mottakere (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008). I den kinematiske delen velges det ut ett testområde som innehar en høy grad av variasjon mellom antatt gode og dårlige måleforhold.

Som nevnt i kapittel 2 er GNSS-teknologien som testobjektene baserer seg på utsatt for flere feilkilder som kan påvirke ytelsen. I sammenlikningen av modeller og innstillinger tas det sikte på å kompensere for dette ved å samle inn data samtidig under identiske måleforhold (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008) (Kaartinen, et al., 2015), slik at eventuelle forskjeller som avdekkes i hovedsak kan skyldes elektronikken og/eller innstillinger i testobjektene. Måleforholdene antas identiske når testobjektene samler inn data til samme tid fra samme testområde. På hvert testområde vil ikke separasjonsavstandene mellom testobjektene under datainnsamlingen være større enn 4 meter. I påfølgende avsnitt beskrives det hvordan problemstillingene fastsatt i avsnitt 1.2 skal besvares i forsøkene:

Sammenlikning av modeller: Dersom Fenix 5X er innstilt på bruk av kun GPS-konstellasjonen og samler inn data under identiske måleforhold som Forerunner 310XT, vil ytelsene kunne sammenliknes og eventuelle forskjeller i posisjonsnøyaktighet avdekkes. Fenix 5X må stilles inn på kun GPS siden Forerunner 310XT kun benytter GPS-konstellasjonen som nevnt

tidligere (Garmin E., 2018). Dette skal beregnes i den statiske delen av oppgaven. Hypotesen er at Fenix 5X, som en nyere modell, vil gi en bedre posisjonsnøyaktighet enn Forerunner 310XT.

Bidrag fra GLONASS på posisjonsnøyaktighet: For å finne et eventuelt bidrag fra GLONASS-konstellasjonen skal posisjonsnøyaktigheten mellom to identiske testobjekter av typen Fenix 5X sammenliknes. Ett av testobjektene vil være innstilt på bruk av GPS+GLONASS, og det andre testobjektet vil være innstilt på bruk av kun GPS (Garmin D., 2018). Begge testobjektene skal samle inn data under identiske måleforhold. Dette skal beregnes i den statiske delen av oppgaven. Hypotesen er at inkludering av GLONASS-konstellasjonen vil forbedre posisjonsnøyaktigheten.

Effekt av sampling-rate på posisjonsnøyaktighet: Sampling-raten i testobjektene kan stilles inn på ett sekund eller «smart recording». «Smart recording» registrerer færre punktobservasjoner under datainnsamlingen og har til hensikt å spare plass i enhetene, imens 1 - sekund sampling-rate registrerer punkt hvert sekund og kan gi en mer detaljert aktivitetshistorikk (Garmin C., 2018) (Garmin, 2013). For å finne en eventuell effekt av dette på posisjonsnøyaktigheten skal et av testobjektene stilles inn på «smart recording» og et annet, identisk testobjekt stilles inn med sampling-rate på ett sekund under en målesesjon. Her skal testobjektet av typen Fenix 5X med kun GPS-konstellasjonen benyttes. Dette skal beregnes i den kinematiske delen av oppgaven. Hypotesen er at «smart recording» reduserer posisjonsnøyaktigheten.

Forventet posisjonsnøyaktighet under ulike måleforhold for de ulike modellene med ulike innstillinger: Til slutt beregnes det estimerer for den forventede statiske og kinematiske posisjonsnøyaktigheten for begge testobjektene med ulike innstillinger og for alle testområder. Disse estimatene skal være basert på alle målesesjoner. Hensikten med dette er at estimatene skal bli så pålitelige og representative for testobjektene som mulig, ved at tilfeldige og kortvarige variasjoner midles ut over tid. Dette skal beregnes både i den statiske og i den kinematiske delen av oppgaven. Hypotesen er at den forventede posisjonsnøyaktigheten blir innenfor 5 til 10 meter, og at den holder seg innenfor 15 meter 95% av tiden (Garmin A., 2018) (Garmin A., 2017).

4 Datainnsamling og beregninger

4.1 DEL 1: STATISK

4.1.1 Innledning

I denne delen av oppgaven har dataene blitt samlet inn statisk, noe som betyr at testobjektene har stått i ro under datainnsamlingen. Både fasitverdi og innsamlede data fra testobjekter representeres som punkt.

4.1.2 Metode

I denne delen av oppgaven vil den statiske posisjonsnøyaktigheten til testobjektene beregnes ved å sammenlikne deres punktobservasjoner med koordinatene til en fasitverdi, noe som også tidligere ble gjort i Andersen et al., (2009), Wing, (2008), Wing et al., (2005) og Schaefer & Woodyer, (2015). Fasitverdien vil i denne oppgaven kalles referanse. I Wing et al., (2005) og Wing, (2008) ble referansen beregnet ved bruk av totalstasjon, imens i Andersen et al., (2009) og Schaefer & Woodyer, (2015) ble det brukt både totalstasjoner og differensiell GNSS. Det ble rapportert om en posisjonsnøyaktighet på 1 cm ved bruk av differensiell GNSS, og en horisontal posisjonsnøyaktighet på 5 cm og 10 cm ved bruk av totalstasjon (Schaefer & Woodyer, 2015) (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009). Det tas sikte på å oppnå en nøyaktighet i referansen som er to størrelsesordener høyere enn den antatte nøyaktigheten i testobjektene, dvs. standardavvik på referansen i størrelsesorden centimeter.

Ved differensielle målinger, også kjent som relative målinger, kan en beregne vektorkomponenter mellom to oppstillinger med GNSS-mottakere. Det er essensielt at GNSS-mottakerne i de to punktene måler samtidig (Ghilani, 2010). Som nevnt i kapittel 2.3, kan det oppnås en høy presisjon ved bruk av fasemålinger i mottakerne, og ved differensiering av observasjonene elimineres klokkefeil i satellitt og mottaker. I tillegg kan faseflertydigheten identifiseres som et heltall (Kristiansen, 2017). Dersom koordinatene til basestasjonen er godt kjent, adderes vektorkomponentene til de kjente koordinatene for å bestemme koordinatene til det aktuelle punktet. Referansepunktet kan bestemmes med formelen (Ghilani, 2010)

$$\begin{aligned}
X_{REF} &= X_{BASE} + \Delta X_{BASE-REF} \\
Y_{REF} &= Y_{BASE} + \Delta Y_{BASE-REF} \\
Z_{REF} &= Z_{BASE} + \Delta Z_{BASE-REF}
\end{aligned}
\tag{4.1.1}$$

der $X_{REF}, Y_{REF}, Z_{REF}$ er de beregnede kartesiske koordinatene til referansepunktene, X_{BASE}, Y_{BASE} og Z_{BASE} er de kjente koordinatene til basestasjonene, og $\Delta X_{BASE-REF}, \Delta Y_{BASE-REF}$ og $\Delta Z_{BASE-REF}$ er de kartesiske vektorkomponentene i den beregnede GNSS-vektoren. Med statiske målinger som er prosessert i ettertid kan det oppnås en punktnøyaktighet på 5-10 mm + 1 ppm i grunnriss (Skogseth & Norberg, 2014).

I en polar enkeltpunktbestemmelse måles det vinkler og avstander mot et ukjent punkt med en totalstasjon fra et kjent punkt som har tilsikt til et annet kjent punkt (Skogseth & Norberg, 2014). Punktet som totalstasjonen står i, kan bestemmes med en frioppstilling der det observeres vinkler og avstander til fastpunkt med kjente koordinater. Koordinatene i grunnriss gitt i nord og øst-verdier til punktet kan dermed bestemmes ved en polar beregning (Skogseth & Norberg, 2014)

$$\begin{aligned}
N_2 &= N_1 + D_k \times \cos\varphi_{1-2} \\
E_2 &= E_1 + D_k \times \sin\varphi_{1-2}
\end{aligned}
\tag{4.1.2}$$

der N_2 og E_2 er de ukjente koordinatene som skal bestemmes, N_1 og E_1 er kjente koordinater, D_k er avstanden i kartprojeksjonsplanet og φ_{1-2} er retningsvinkelen mellom punktene. Retningsvinkelen mellom to kjente punkt kan bestemmes ved (Skogseth & Norberg, 2014)

$$\varphi = \arctg \frac{E_3 - E_1}{N_3 - N_1}
\tag{4.1.3}$$

der E_3 og E_1 er de kjente øst-koordinatene til punktene 3 og 1, og N_3 og N_1 er de kjente nord-koordinatene til punktene 3 og 1. Dersom det siktes til de kjente punktene 3 og 1 fra det ukjente punktet 2, kan retningsvinkelen fra 2 også bestemmes. Det måles til flere kjentpunkt enn minimum for kontroll. Med en totalstasjon kan det oppnås en nøyaktighet i størrelsesorden millimeter på aktuelle punkt (Skogseth & Norberg, 2014).

Etter gjennomført grovfeilsøk og kontroll med en multippel t-test og F-test, skal koordinatene til referansepunktene beregnes med en utjevning etter minste kvadraters metode (Ghilani, 2010).

Testobjektene skal stilles opp over de aktuelle referansepunktene og samle inn data (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, 2008) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Schaefer & Woodyer, 2015). For beregning av posisjonsnøyaktighet fra hver målesesjon i form av standardavvik benyttes formel (1.1) fra avsnitt 2.1. For beregning av systematiske avvik benyttes formel (1.4) og formel (1.5) fra avsnitt 2.1. Estimatene på posisjonsnøyaktigheten fra hver målesesjon baseres på 601 punktobservasjoner.

Usikkerheten i referansen antas å være avhengig av nøyaktigheten på bestemmelsen av referansepunktene, i tillegg til en sentreringsusikkerhet for testobjektene over referansepunktene i hver målesesjon. Hver gang testobjektene skal sentreres med roverstengene over de aktuelle referansepunktene, kan posisjonen til roverstengene avvike noe fra det sanne referansepunktet. I mange målesammenhenger refereres det til dette som en sentreringusikkerhet (Ghilani, 2010). Dersom sentreringsusikkerheten kan antas statistisk uavhengig av nøyaktigheten til referansepunktet, kan den spesielle loven for forplantning av varianser (Ghilani, 2010) fra formel (1.6) fra avsnitt 2.1 benyttes for å angi usikkerheten i referansen s_f gitt som standardavvik ved

$$s_f = \sqrt{s_p^2 + s_s^2} \quad (4.1.4)$$

der s_p angir usikkerheten i referansepunktet og s_s angir sentreringsusikkerheten i hver oppstilling, begge gitt som standardavvik. Usikkerheten i referansepunktene s_p kan estimeres etter en utjevning ved minste kvadraters metode (Ghilani, 2010), og sentreringsusikkerheten s_s antas å være 0.05 meter i nord og 0.05 meter i øst.

For å besvare problemstillingene fastsatt i avsnitt 1.2 skal det benyttes statistiske hypotesetester (Schaefer & Woodyer, 2015) (Wing, 2008). I og med at et av kvalitetsmålene for posisjonsnøyaktigheten skal gis som standardavvik, ville et naturlig valg ha vært å benytte en variansanalyse. Bruk av variansanalyse baserer seg dog på strenge forutsetninger om at observasjonene i de ulike gruppene er uavhengige av hverandre, normalfordelte og har samme standardavvik (Løvås, 2013). Ut i fra forsøksdesignen beskrevet i kapittel 3 skulle posisjonsnøyaktigheten til testobjektene sammenliknes ved å måle samtidig fra samme testområde, noe som gjør det plausibelt å anta at målingene vil være sterkt korrelerte. Ergo vil en av forutsetningene for bruk av variansanalyse være brutt. For å bøte på dette ble det valgt å benytte to statistiske hypotesetester, nærmere bestemt en paret T-test og Pitman's T. Videre følger en beskrivelse av fremgangsmåten som er brukt for de to statistiske testene.

Paret T-test

Som tidligere nevnt i kapittel 3 om forsøksdesign, har det blitt forsøkt å sørge for mest mulig rettfærdige forsøksbetingelser ved å måle med testobjektene samtidig fra samme testområde. Dersom det er to grupper som sammenliknes, kan observasjonene i den påfølgende testen opptre som par, noe som muliggjør bruk av en paret T-test (Løvås, 2013). Hensikten med en paret T-test er å undersøke om det finnes en statistisk signifikant forskjell mellom to gruppegjennomsnitt (Løvås, 2013). Det velges å benytte en paret T-test fremfor en uparet T-test i hovedsak fordi bruk av en uparet T-test forutsetter at de to gruppene som sammenliknes er uavhengige av hverandre (Løvås, 2013). Dette er en forutsetning som ikke kan antas å være oppfylt siden de to gruppene, altså observasjonene fra testobjektene, har målt under identiske forhold, og dermed blitt utsatt for samme feilkilder. Videre velges det å

benytte en ensidig test fremfor en tosidig test. Dette baseres på hypotesene som ligger til grunn fra kapittel 3, der det antas at bruk av både GPS og GLONASS-satellitter kontra kun GPS-satellitter vil forbedre posisjonsnøyaktigheten på grunn av tilgang til flere satellitter (Torge & Müller, 2012), og at Fenix 5X som en nyere modell gir en bedre posisjonsnøyaktighet enn Forerunner 310XT som en eldre modell.

Dataene skal grupperes inn i tre grupper: Fenix 5X kun GPS, Fenix 5X GPS+GLONASS og Forerunner 310XT. I hver gruppe skal det beregnes ett estimat på den gjennomsnittlige posisjonsfeilen μ for hver målesesjon. Deretter sammenliknes to og to grupper, nærmere bestemt Fenix 5X kun GPS og Forerunner 310XT for å sammenlikne modeller, og Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS for å bestemme et eventuelt bidrag fra GLONASS i Fenix 5X. Gruppene sammenliknes ved at differansene i de gjennomsnittlige posisjonsfeilene fra hver gruppe i hver målesesjon regnes ut (Løvås, 2013). Med gjennomsnittlig posisjonsfeil μ menes det i dette tilfellet den gjennomsnittlige, horisontale kartesiske avstanden mellom fasitverdien i referansepunktene og punktobservasjonene i grunnriss fra testobjektene i hver målesesjon. Den kartesiske avstanden i grunnriss regnes med Pythagoras- teoremet fra formel (7.1) fra avsnitt 2.7, der x_j og y_j angir nord- og østkoordinatene til fasitpunktet, og x_i og y_i angir nord- og østkoordinatene til punktobservasjonen fra det aktuelle testobjektet. Videre beregnes den gjennomsnittlige posisjonsfeilen for hver målesesjon ved å ta gjennomsnittet av disse avstandene, slik at (Statens kartverk, 2015)

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (4.1.5)$$

der d_i er den kartesiske avstanden i grunnriss for punktobservasjon i og n er antall punktobservasjoner.

Med 20 statiske målesesjoner blir det totalt 20 parvise differanser som skal brukes i den statistiske testen. For å benytte en paret T-test må det gjøres antakelser om at observasjonsparene er statistisk uavhengige av hverandre, og at de beregnede differansene er omtrentlig normalfordelte. Observasjoner i samme par vil dog vanligvis være avhengige av hverandre (Løvås, 2013). Observasjoner fra samme målesesjoner betraktes som observasjonspar siden de har målt under identiske måleforhold, og det antas at observasjonsparene er statistisk uavhengige av hverandre siden de er beregnet fra ulike målesesjoner. Igjen påpekes det her at differansene beregnes på grunnlag av gjennomsnittlig posisjonsfeil i hver målesesjon, og ikke den beregnede posisjonsnøyaktigheten i form av standardavvik. Årsaken til dette var at det ikke var mulig å finne subtraksjon av standardavvik som en gyldig operasjon. For den ensidige testen vil hypotesene settes opp som følger:

Sammenlikning av modeller:

Nullhypotese $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Alternativ hypotese $H_1: \mu_1 > \mu_2$

der μ_1 angir den gjennomsnittlige posisjonsfeilen for Forerunner 310XT, og μ_2 angir den gjennomsnittlige posisjonsfeilen for Fenix 5X kun GPS. Dersom $T > t_\alpha$ forkastes nullhypotesen (Løvås, 2013).

Bidrag fra GLONASS:

Nullhypotese $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Alternativ hypotese $H_1: \mu_1 > \mu_2$

der μ_1 angir den gjennomsnittlige posisjonsfeilen for Fenix 5X kun GPS, og μ_2 angir den gjennomsnittlige posisjonsfeilen for Fenix 5X GPS+GLONASS. Dersom $T > t_\alpha$ forkastes nullhypotesen ved α signifikansnivå (Løvås, 2013).

Den t-fordelte testobservatoren T , variansen S_D^2 til differansene og gjennomsnittet \bar{D} til differansene kan regnes ut ved (Løvås, 2013)

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (4.1.6)$$

$$S_D^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \quad (4.1.7)$$

$$T = \frac{\bar{D}}{S_D/\sqrt{n}} \quad (4.1.8)$$

der n angir antall observasjoner og D_i angir differansen fra målesesjon i .

Pitman's T

Hensikten med en Pitman's T-test er å teste nullhypotesen om at to korrelerte prøver er tatt fra populasjoner med like varianser (Wuensch, 2016). I forhold til denne oppgaven vil Pitman's T derfor ta sikte på å avdekke eventuelle statistisk signifikante forskjeller i variansene til Fenix 5X kun GPS mot Fenix 5X GPS+GLONASS eller Forerunner 310XT, og samtidig ta høyde for korrelasjon i observasjonene. Fremgangsmåten for Pitman's T med tilhørende formler er gitt som følger (Wuensch, 2016)

1. Regn ut variansen til prøvene i de to gruppene, dvs. variansen til prøvene i Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS eller Forerunner 310XT.
2. Regn ut en F-verdi som forholdstallet mellom den store variansen og den lille variansen, slik at (Wuensch, 2016)

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (4.1.9)$$

der variansen S_1^2 har høyere verdi enn variansen S_2^2 .

3. Regn ut testobservatoren t gitt ved (Wuensch, 2016)

$$t = \frac{(F - 1)\sqrt{n - 2}}{2\sqrt{F(1 - r^2)}} \quad (4.1.10)$$

der F er F-verdien fra formel (4.1.9), n er antall prøver og r er korrelasjonen mellom prøvene i Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS, eller mellom prøvene i Fenix 5X kun GPS og Forerunner 310XT.

4. Evaluer testobservatoren t mot en tabellverdi fra en t-fordeling med n-2 frihetsgrader. Dersom testobservatoren t er større enn tabellverdien kan det være en signifikant forskjell mellom variansene til de to gruppene (Wuensch, 2016), altså at den beregnede større variansen S_1^2 er statistisk signifikant større enn den beregnede mindre variansen S_2^2 fra formel (4.1.9).

I praksis implementeres testen i oppgaven ved å behandle enkeltavvikene fra de aktuelle testobjektene på korresponderende tidspunkt som prøver. Det skal hentes ut én prøve fra hver målesesjon, det vil si ett enkeltavvik på korresponderende tidspunkt for hvert av testobjektene. Som det senere forklares i avsnitt 4.1.4.3.1, registrerer hvert testobjekt punktobservasjoner hvert sekund, slik at hver målesesjon inneholder 601 enkeltavvik. Hver

målesesjon er overlappende, og alle enkeltavvikene er registrert på samme tidspunkt i UTC-tid i hvert testobjekt (Topografix, 2004). For ordens skyld benyttes enkeltavvik nummer 300 fra hver målesesjon som en prøve. To og to grupper testes hver for seg, dvs. først Fenix 5X kun GPS mot Forerunner 310XT, deretter Fenix 5X kun GPS mot Fenix 5X GPS+GLONASS. Nord- og østkomponentene skal testes hver for seg for å ta høyde for retninger i beregningen av korrelasjon. Med 20 målesesjoner tilsvarer dette 20 enkeltavvik og dermed inngår det 20 prøver i testen, slik at $n=20$.

Etter å ha hentet ut de aktuelle prøvene gjøres videre beregninger i programvaren MATLAB. For beregning av variansen som nevnt i 1., benyttes funksjonen «**var**» som regner ut variansen for de aktuelle enkeltavvikene som er samlet i en vektor (MathWorks A., 2018). For beregning av korrelasjonen r benyttes funksjonen «**corrcoef**», som regner ut korrelasjonskoeffisienten mellom enkeltavvikene til de aktuelle testobjektene samlet i to vektorer (MathWorks B., 2018). Tabellverdien hentes fra en tabell for t-fordeling i Løvås, (2013) med 18 frihetsgrader og et signifikansnivå på 0.05.

4.1.3 Verktøy

Verktøyene som har blitt brukt i den statiske datainnsamlingen og programvarer som ble brukt i senere beregninger vises i påfølgende tabell

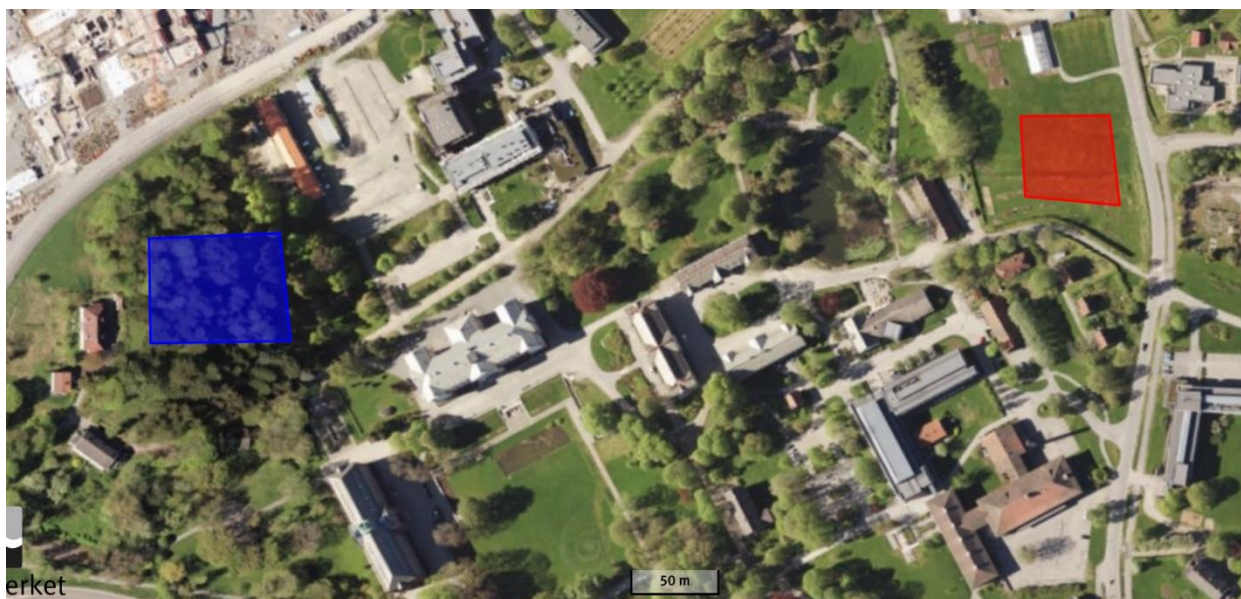
Type	Produsent	Navn
Løpeklokke	Garmin	Forerunner 310XT
Løpeklokke	Garmin	Fenix 5X
GNSS-antenne	Topcon	LegAnt-2
GNSS-antenne	Topcon	PG-A1
GNSS-mottaker	Topcon	Legacy E
Totalstasjon	Sokkia	Set2100
Programvare	TerraTec	TerraPos 2.4.90
Programvare	Norkart	GISLINE 6.0.0.0
Programvare	MathWorks	MATLAB R2016b
Programvare	Leica	Leica Geo Office 8.2
Programvare	Adam Schneider	GPSVisualizer
Programvare	GPSBabel	GPSBabel

Tabell 1: Oversikt over verktøy som ble brukt for datainnsamling og beregninger i den statiske delen av oppgaven.

4.1.4 Datagrunnlag

4.1.4.1 Valg av testområder

Som fastsatt i kapittel 3 om forsøksdesign skal det velges ut to testområder hvor datainnsamlingen skal foregå. De to testområdene velges på grunnlag av tilgjengelighet og måleforhold for GNSS-mottakerne. Av hensyn til tilgjengelighet velges begge de to områdene til å være på universitetets campus.



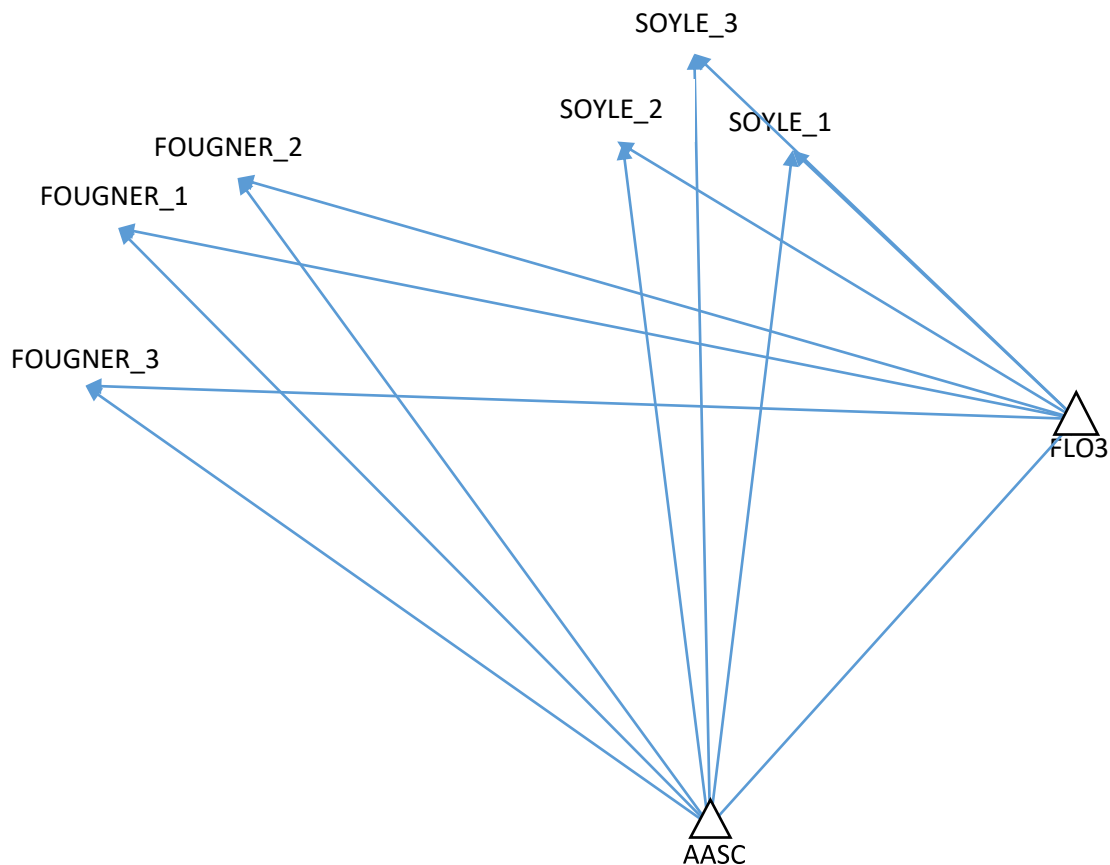
Figur 7: Testområder for statistisk datainnsamling. Blått område representerer vanskelige måleforhold og rødt område representerer gode måleforhold. Hentet fra Norgeskart.no (Kartverket D., 2018).

I figur 7 vises de to valgte testområdene som ligger til grunn for den statistiske datainnsamlingen. Testområdet markert i blått er lokalisert på Fougnerhaugen på universitetets campus og ligger under lukket kronetak i skogen. Testområdet markert i rødt ligger under åpen himmel. Det røde området skal derfor representere gode måleforhold, og det blå området representerer dårlige måleforhold for GNSS-mottakere (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008). Testområdene er separert med en avstand på omtrent 400 meter. Videre i oppgaven refereres det til det blå testområdet som FOUGNER, og det røde testområdet som SOYLE.

4.1.4.2 Referansepunkt

4.1.4.2.1 GNSS-vektorer

På hvert av testområdene opprettes det tre referanser i form av fastpunkt som bestemmes ved beregning av GNSS-vektorer fra nærliggende basestasjoner med godt kjente koordinater (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009). Hvert referansepunkt ble markert med en spiker i bakken som var festet i enden på en markeringsstang. I hvert referansepunkt stilles det opp en roverstang med en påmontert GNSS-antenne som er koblet til en GNSS-mottaker. Roverstangen horisonteres ved hjelp av en dåselibelle. Hver GNSS-vektor målte i omtrent 1 time.

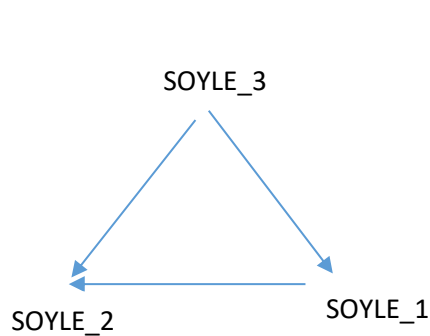


Figur 8: Målte GNSS-vektorer mellom basestasjonene AASC og FLO3 og de aktuelle referansepunktene.

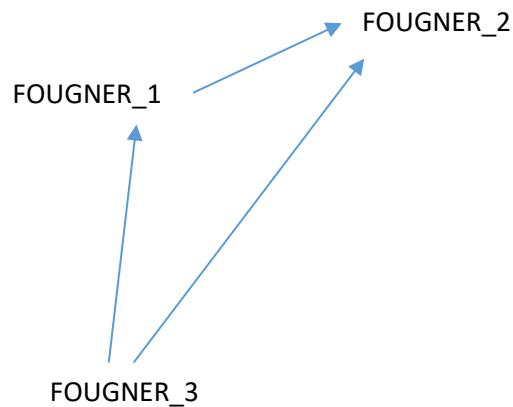
Figur 8 illustrerer de målte GNSS-vektorene mellom basestasjonene AASC og FLO3 og de aktuelle referansepunktene på de statiske testområdene. Referansepunkt med navn FOUIGNER angir punkt på testområdet FOUIGNER, imens referansepunkt med navn SOYLE angir punkt på testområdet SOYLE. Det er viktig å poengtere at figur 8 av visuelle hensyn ikke gjengir absolutte størrelser, da avstanden mellom referansepunktene og basestasjonene var

noen hundre meter og avstanden mellom referansepunktene seg imellom på hvert av testområdene var mellom 2 meter og noen titalls meter.

For kontroll av referansepunktene og for å styrke geometrien i nettet (Ghilani, 2010), måles det også GNSS-vektorer mellom referansepunktene på hvert av testområdene. I hvert av referansepunktene stilles det opp og horisonteres en roverstang med en påmontert GNSS-antenne som er koblet til en GNSS-mottaker. Hver GNSS-vektor målte i omtrent én time.



Figur 9: Målte GNSS-vektorer mellom referansepunktene på SOYLE.

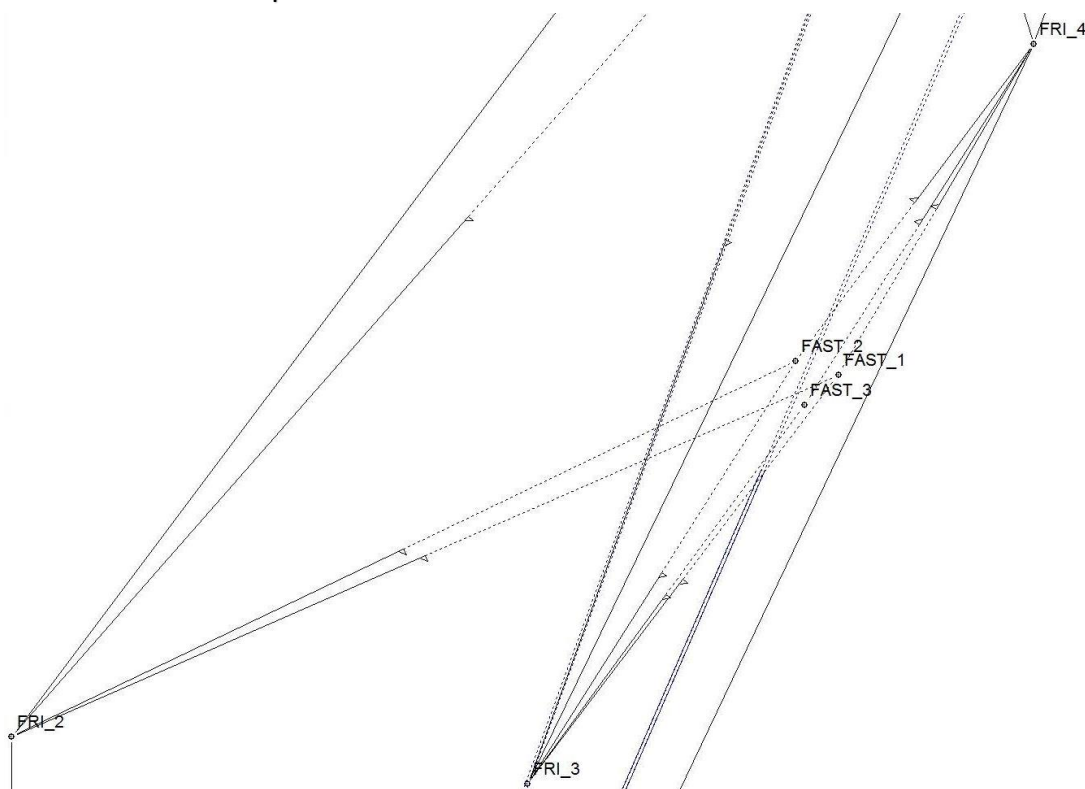


Figur 10: Målte GNSS-vektorer mellom referansepunktene på FOUGNER.

Figur 9 og figur 10 illustrerer de målte GNSS-vektorene mellom referansepunktene på de statiske testområdene. Det er viktig å merke seg her at FOUGNER_1, FOUGNER_2 og FOUGNER_3 ikke angir referansepunktene som ble brukt som fasitverdi i sammenlikningen med dataene fra testobjektene på testområdet FOUGNER, men at disse punktene ble brukt som kjentpunkt for frioppstillingene. Siden koordinatene til frioppstillingene vil være avhengig av koordinatene på disse kjentpunktene, antas det i den senere kontrollen at referansepunktene dermed være kontrollert med GNSS-vektorene. Alle GNSS-vektorene prosesseres i programvaren Leica Geo Office 8.2, og resultatene eksporteres som tekstfiler på ASCII-format som kan leses av et tekstredigeringsprogram.

4.1.4.2.2 Totalstasjon og prisme

På grunn av sin plassering under lukket kronetak i skogen ble det valgt å bruke totalstasjon og prisme (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) for polar innmåling av punktene på testområdet FOUGNER. Fastpunktene som var målt inn ved hjelp av GNSS-vektorer fra nærliggende basestasjoner ble brukt som kjentpunkt (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) for beregning av koordinater på frioppstillingene. Det ble gjort målinger til de tre referansepunktene fra totalt tre frioppstillinger. Fra hver frioppstilling ble det målt avstand, horisontalretning og senitvinkel i begge kikkertstillinger til tre kjentpunkt. Ved å måle i to kikkertstillinger med en påfølgende midling av målingene kan sikteaksefeilen i instrumentet og horisontalakseskjevhet elimineres (Skogseth & Norberg, 2014). Videre ble det gjort en polar innmåling av de aktuelle referansepunktene fra hver frioppstilling ved å måle avstand, horisontalretning og senitvinkel til et prisme som var sentrert og horisontert over hvert referansepunkt.



Figur 11: Polar innmåling av referansepunkt med totalstasjon og prisme på testområdet FOUGNER. FRI_2, FRI_3 og FRI_4 angir frioppstillingene, FAST_1, FAST_2 og FAST_3 angir referansepunktene som skal beregnes.

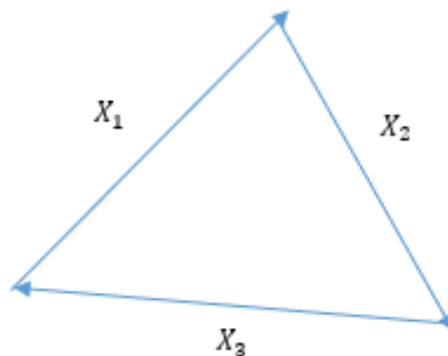
Figur 11 viser frioppstillingene og referansepunktene som ble målt inn. Her er det viktig å merke seg at i hver av frioppstillingene FRI_2, FRI_3 og FRI_4 er det målt til tre kjentpunkt, og at hvert av referansepunktene FAST_1, FAST_2 og FAST_3 er siktet til fra minst to frioppstillinger. Dette ble gjort med tanke på kontroll (Skogseth & Norberg, 2014) og for styrke den interne geometrien i nettet med flere observasjoner. Alle observasjoner fra totalstasjonen ble skrevet inn i programvaren GISLINE for videre beregninger.

4.1.4.2.3 Grovfeilsøk og kontroll

Grovfeilsøket i denne delen av oppgaven skal gjennomføres i to trinn: i første trinn kontrolleres GNSS-vektorene som er prosessert i programvaren Leica Geo Office 8.2 direkte, og i andre trinn importeres GNSS-vektorene i GISLINE for kontroll ved hjelp av observasjonstester og grunnlagstester som ligger i programvaren. I GISLINE kontrolleres også observasjonene gjort med totalstasjon.

4.1.4.2.3.1 Leica Geo Office

Vektorkomponentene til GNSS-vektorene prosessert i Leica Geo Office 8.2 kan leses direkte ved hjelp av et tekstredigeringsprogram. Nettverket av alle de målte GNSS-vektorene deles inn i flere trekanter. I et ideelt tilfelle vil summen av de korresponderende vektorkomponentene fra hver GNSS-vektor i hver trekant bli null, men på grunn av ulike feilkilder kan avvik oppstå (Ghilani, 2010). Disse avvikene kalles også gap.



Figur 12: Prinsipp for kontroll av GNSS-vektorer. X_1 , X_2 og X_3 er målte vektorer mellom de aktuelle referansepunktene. Hentet fra Øvstedal, (2017).

$$\Delta = X_1 + X_2 + X_3 \quad (4.1.11)$$

Formel (4.1.11) viser hvordan vektorene X_1 , X_2 og X_3 summeres for å beregne gapet Δ (Øvstedal, 2017). Hver av vektorene X_1 , X_2 og X_3 dekomponeres i sine X, Y og Z-komponenter, som deretter summeres hver for seg i hver trekant. Det resulterende gapet for trekanten beregnes ved å ta kvadratroten av summen til de kvadrerte gapene til hver av vektorkomponentene (Ghilani, 2010), altså den tredimensjonale kartesiske avstanden. Alle vektorene inngår i minst én av trekantene i grovfeilsøket. Dersom gapet Δ overskrider en gitt terskelverdi, kan en grov feil være tilstede i observasjonsmaterialet i trekanten av vektorer. Størrelsen til denne terskelverdien gitt som standardavvik kan regnes med formelen (Ghilani, 2010)

$$\sigma_{trekant} = \sqrt{2n\sigma_s^2 + na^2 + (L \times ppm)^2} \quad (4.1.12)$$

der n angir antall vektorer i trekanten, σ_s^2 angir sentreringsusikkerheten i oppstillingene, a er en spesifisert konstant feil for en observert vektor, L er summen av lengden til alle vektorene og ppm – «parts per million» er en avstandsavhengig usikkerhet i vektorene. I forbindelse med denne oppgaven ble det antatt følgende verdier for bruk av formel (4.1.12)

Variabel	Verdi
Antall vektorer n	3
Sentreringsusikkerhet σ_s	0.05 m
Feilkonstant på vektor a	0.005 m
Summen av lengdene L	2000 m
Avstandsavhengig feil ppm	1

Tabell 2: Angitte verdier for beregning av terskelverdi.

I tabell 2 er det verdt å merke seg den forholdsvis høye sentreringsusikkerheten σ_s . Dette var forårsaket av vanskelige forhold på bakken i form av is og snø rundt referansepunktene, noe som kunne gjøre det vanskelig å sentrere over referansepunktene med særlig høyere nøyaktighet. Variablene a og ppm er oppgitt som typiske verdier ved statiske målinger av GNSS-vektorer (Ghilani, 2010).

Basestasjonene består av permanente GNSS-mottakere som står i ro, og det antas derfor ingen sentreringsusikkerhet i disse. Sentreringsusikkerheten kan bare antas å ha innvirkning når det gjøres oppstillinger med instrumenter over referansepunktene. Hver trekant består av tre GNSS-vektorer. To av vektorene i trekanten var målt mellom de aktuelle referansepunktene og en basestasjon. Den siste av vektorene i trekanten var målt mellom de aktuelle referansepunktene på en annen dag, noe som gir to sentreringer over referansepunktene med tilhørende sentreringsusikkerhet. Hver trekant hadde derfor to oppstillinger med sentreringsusikkerhet. Av den grunn multipliseres sentreringsusikkerheten σ_s^2 med faktor 2 i formel (4.1.12), slik at

$$\sigma_{trekant} = \mp 0.071 \text{ meter}$$

Figur 13: Beregnet terskelverdi.

Under en antagelse om normalfordeling av feilene, noe som er plausibelt når vektorene vanligvis er basert på observasjoner fra mer enn 30 individuelle epoker, vil $2.968\sigma_{trekant}$ romme 99.7% av feilene (Ghilani, 2010). Dette betyr at den kartesiske avstanden beregnet fra gapet Δ i en trekant må være større enn

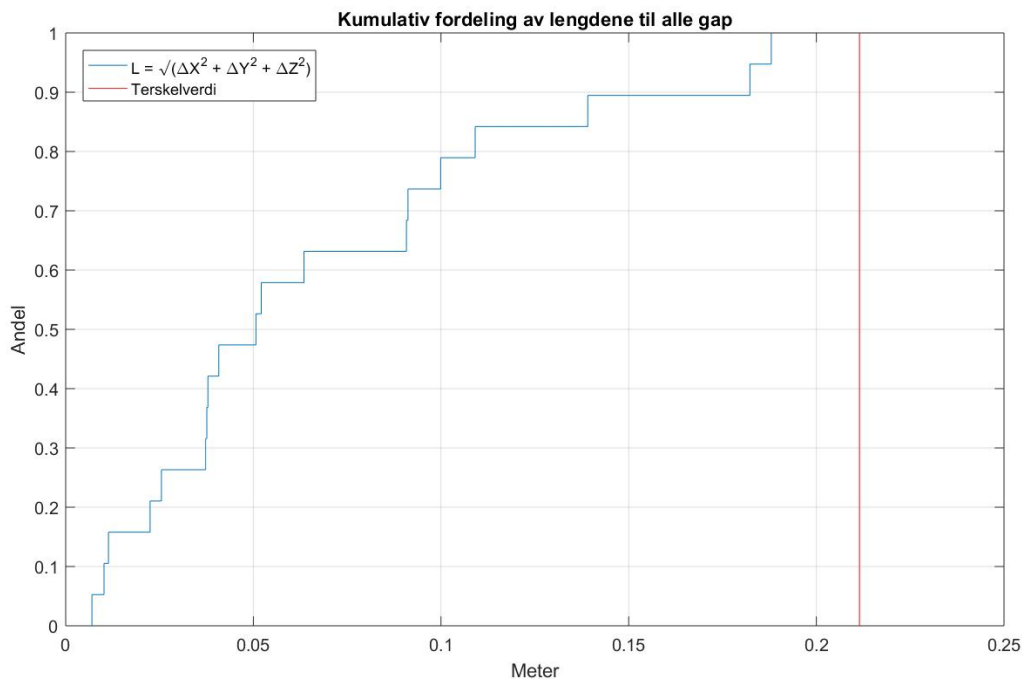
$$2.968\sigma_{trekant} = \mp 0.212 \text{ meter}$$

Figur 14: Terskelverdi for kartesisk avstand til gap i hver trekant ved 99.7% sannsynlighet.

$$\sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2 + \Delta_Z^2} > 0.212 \text{ meter}$$

Figur 15: Definisjon av grov feil beregnet fra den kartesiske avstanden til gapet i hver trekant.

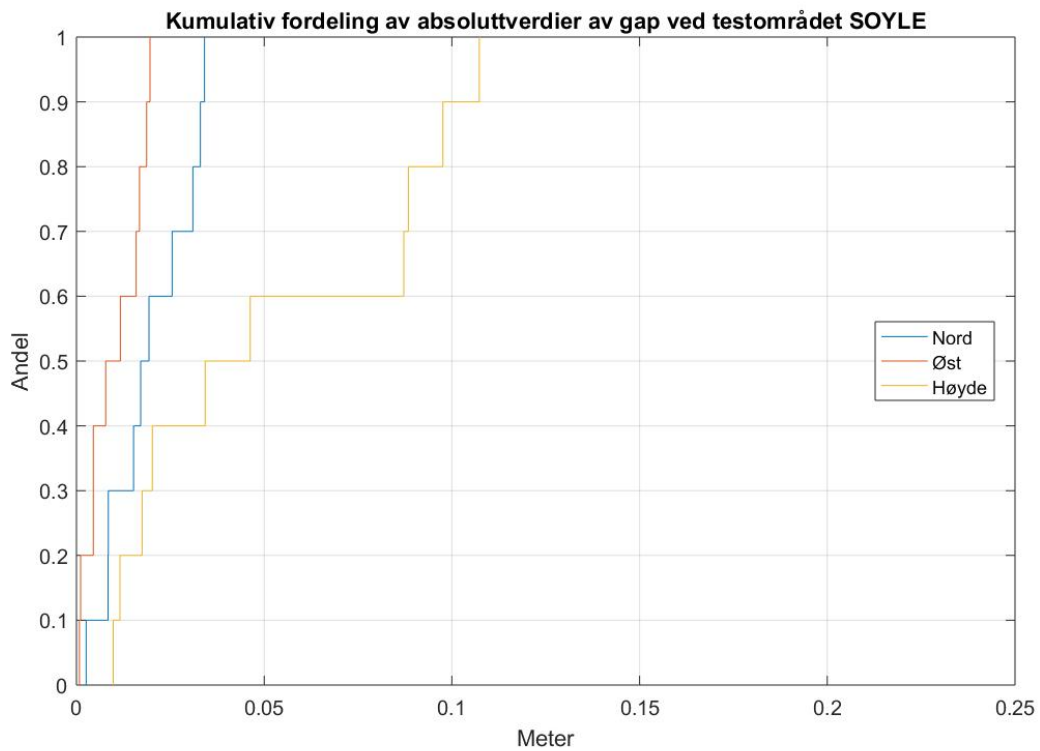
for å kunne karakteriseres som en grov feil (Ghilani, 2010). En grov feil er en feil i observasjonsmaterialet som ikke kan regnes som tilfeldig, og antas som avvik som er 3 ganger større enn standardavviket (Statens kartverk, 2015).



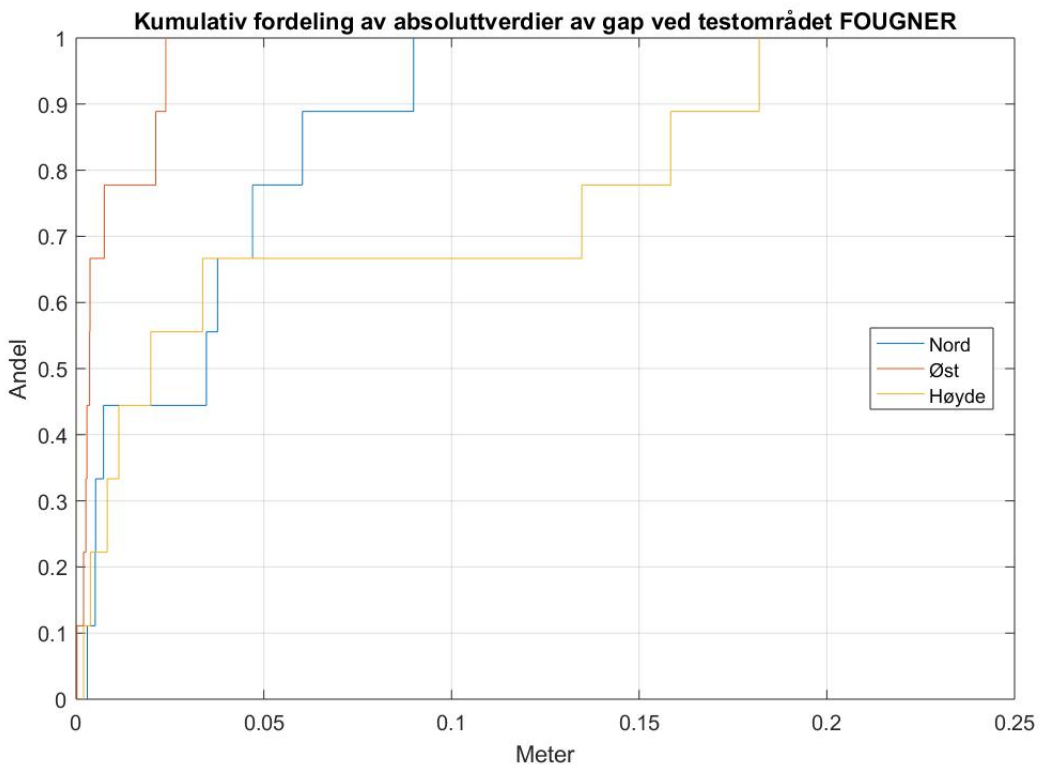
Figur 16: Kumulativ fordeling av lengder til alle gap fra alle trekantene. Den blå linjen angir den kumulative fordelingen av lengdene til alle gapene, og den røde linjen angir terskelverdien for grove feil.

Figur 16 viser den kumulative fordelingen av lengdene til alle gapene fra alle trekantene, samt terskelverdien for grove feil. Den horisontale akselen angir meter og den vertikale akselen angir andel av alle gapene. Det er viktig å merke seg her at ingen av lengdene til noen av gapene overstiger terskelverdien fastsatt ovenfor, og at det derfor ikke kan sies å være grove feil tilstede i observasjonsmaterialet ved 99.7% sannsynlighet. Fortsatt havner noen av lengdene urovekkende nære terskelverdien, og det må derfor gjøres videre analyser for å avdekke hvor i datagrunnlaget feilene ligger.

Gapene som er gitt i de kartesiske vektorkomponentene transformeres til de mer intuitive nord-, øst- og høydekomponentene gitt i et lokalt toposentrisk koordinatsystem. Formel (3.1) fra avsnitt 2.3 brukes og implementeres i programvaren MATLAB.



Figur 17: Kumulativ fordeling av absoluttverdier til gap gitt i nord-, øst- og høydekomponenter i et lokalt topocentrisk koordinatsystem ved testområdet SOYLE.



Figur 18: Kumulativ fordeling av absoluttverdier av gap gitt i nord-, øst- og høydekomponenter i et lokalt topocentrisk koordinatsystem ved testområdet FOUIGNER.

Fra figur 17 og figur 18 kommer det tydelig fram at høydekomponentene utgjør de største delene av gapene på testområdene. For begge testområdene holder alle gapene i de horisontale nord- og østkomponentene seg under en absoluttverdi på 10 centimeter. Gapene i høydekomponentene er vesentlig større, spesielt ved testområdet FOUIGNER. Videre analyser peker på at gapene i høydekomponentene er spesielt store for ett av referansepunktene. Ut i fra figur 17 og figur 18 vil usikkerheten i høydekomponentene i referansepunktene trolig bli noe større enn usikkerheten i de horisontale komponentene i nord og øst. Gapene kan gi et inntrykk av den oppnåelige nøyaktigheten for de aktuelle referansepunktene som skal beregnes (Ghilani, 2010). Tatt i betraktning en antatt nøyaktighet i størrelsesorden meter på testobjektene, regnes dette datagrunnlaget som godt nok og brukes dermed videre i sin helhet.

4.1.4.2.3.2 GISLINE

I programvaren GISLINE velges kommandoen «Tolk satellittvektorer til KOF» som leser alle GNSS-vektorene på ASCII-format til KOF-formatet. KOF står for «Koordinat- og Observasjonsformat for Feltminner», og er et dataformat utviklet av Norkart for bruk i deres programvare (Norkart, 2005). Etter råd fra min veileder Ola Øvstedal multipliseres alle standardavvik i GNSS-vektorene på KOF-formatet med faktor 10. Bakgrunnen for dette er at programvaren Leica Geo Office 8.2 kan gi for optimistiske tall på standardavvikene til hver vektor, noe som kan forstyrre vektingen av observasjonene i senere beregninger. Videre benyttes kommandoen «Les satellittvektorer fra KOF til OREG», som transformerer den aktuelle GNSS-vektoren fra kartesiske og geosentriske vektorkomponenter til asimut, vertikalvinkel og skråavstand gitt i et lokalgeodetisk koordinatsystem (Norkart A.). Etter at alle GNSS-vektorene for hvert testområde er importert i GISLINE, skal det gjøres en observasjonstest for alle de importerte GNSS-vektorene, og en grunnlagstest av gittpunktene. Observasjonstesten gjennomføres som en fri utjevning med metoden «Multippel T-Test» (Norkart B.), og grunnlagstesten gjennomføres med metoden «F-Test» med en feilslutningssannsynlighet 0.05 (Norkart C.). Dersom observasjonstesten gjør utslag, settes observasjonen med høyest beregnet t-verdi som passiv eller fjernes helt før en ny observasjonstest gjennomføres. Grovfeilsøket avsluttes når ingen observasjoner gjør utslag på observasjonstesten (Gjevestad, 2018). For begge testområder gjennomføres observasjonstestene og grunnlagstestene separat i grunnriss og i høyde. Videre følger en trinnvis beskrivelse av gjennomføringen av observasjonstestene.

For testområdet SOYLE:

- Ingen av observasjonene gjør utslag på den første observasjonstesten i grunnriss.
- Ingen av observasjonene gjør utslag på den første observasjonstesten i høyde.
- Den første grunnlagstesten i grunnriss avdekker ingen feil i grunnlaget.

TEST AV GRUNNLAG

DATUM: EUREF89 - SONE 32

UTJEVNING I GRUNNRIS

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.689

TEST AV GRUNNLAG

Tvungen utjevning: f= 18 Spvv= 715.15293849

Fri utjevning : f= 16 Spvv= 706.13563094

Tabellverdi = 3.63 (Fisher, f1=2, f2=16, alfa=0.0500)

Beregnet verdi = 0.10

Figur 19: Utskrift fra GISLINE som viser resultat av grunnlagstest i grunnriss for testområdet SOYLE.

- Den første grunnlagstesten i høyde avdekker ingen feil i grunnlaget.

TEST AV GRUNNLAG

UTJEVNING I HØYDE

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

TEST AV GRUNNLAG

Tvungen utjevning: f= 9 Spvv= 1607.23973620
Fri utjevning : f= 8 Spvv= 1597.63741241

Tabellverdi = 5.32 (Fisher, f1=1, f2=8, alfa=0.0500)
Beregnet verdi = 0.05

Figur 20: Utskrift fra GISLINE som viser resultat av grunnlagstest i høyde for testområdet SOYLE.

MERKNAD: Det er viktig å poengtere her at høydekomponenten for basestasjonen FLO3 i grunnlagstesten i grunnriss som vises i figur 19 er annerledes enn den som fremgår i figur 20 og senere utjevninger. Forskjellen i høydekomponenten er på 7 millimeter. Dette ble oppdaget sent i oppgaven og er mest sannsynlig forårsaket av en personlig feil. Fortsatt er det viktig å ta i betraktning følgende resonnerer:

1. Forskjellen er på 7 millimeter, noe som er under nøyaktighetsnivået på centimeter som skal oppnås.
2. Høydekomponentene til referansepunktene skal ikke brukes videre for beregning av nøyaktighetsmål.

For testområdet FOUGNER:

- Ingen av GNSS-vektorene på testområdet FOUGNER gjør utslag på den første observasjonstesten i grunnriss.
- GNSS-vektoren fra basestasjonen FLO3 til FOUGNER 2 gjør utslag på den første observasjonstesten i høyde. Dette var det samme punktet som hadde store gap i høyde i den tidligere kontrollen, og kan med sikkerhet settes som passiv.
- Ingen av GNSS-vektorene gjør utslag på den andre observasjonstesten i høyde.
- Alle observasjoner fra frioppstillingene med totalstasjonen importeres inn i GISLINE, og nye observasjonstester gjennomføres.
- En horisontalretning fra en frioppstilling til kjentpunktet FOUGNER_2 gjør utslag på den andre observasjonstesten i grunnriss. Denne observasjonen fjernes.
- Ingen av observasjonene gjør utslag på den tredje observasjonstesten i grunnriss.
- Ingen av observasjonene gjør utslag på den tredje observasjonstesten i høyde
- Den første grunnlagstesten i grunnriss avdekker ingen feil i grunnlaget.

TEST AV GRUNNLAG

DATUM: EUREF89 - SONE 32

UTJEVNING I GRUNNRIS

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

TEST AV GRUNNLAG

Tvungen utjevning: f= 32 Spvv= 69.48242248
Fri utjevning : f= 30 Spvv= 65.51489684

Tabellverdi = 3.32 (Fisher, f1=2, f2=30, alfa=0.0500)
Beregnet verdi = 0.91

Figur 21: Utskrift fra GISLINE som viser resultat av grunnlagstest i grunnriss for testområdet FOUGNER.

- Den første grunnlagstesten i høyde avdekker ingen feil i grunnlaget.

TEST AV GRUNNLAG

UTJEVNING I HØYDE

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

TEST AV GRUNNLAG

Tvungen utjevning: f= 17 Spvv= 1845.20956696
 Fri utjevning : f= 14 Spvv= 1810.12797508

Tabellverdi = 3.34 (Fisher, f1=3, f2=14, alfa=0.0500)
 Beregnet verdi = 0.09

Figur 22: Utskrift fra GISLINE som viser resultat av grunnlagstest i høyde for testområdet FOUGNER.

4.1.4.2.4 Utjevning og endelige referansepunkt

Etter at kontrollen og grovfeilsøket er avsluttet, antas datagrunnlaget som fritt for grove feil. De gjenværende observasjonsfeilene antas dermed som tilfeldige og normalfordelte, noe som betyr at bruk av minste kvadraters metode vil gi en optimal løsning på estimatene (Gjevestad, 2018). I denne sammenheng er estimatene koordinatene på referansepunktene. I GISLINE velges det å bruke tvungen utjevning der koordinatene i basestasjonene AASC og FLO3 regnes som gittpunkt, og dermed låses fast. Koordinatene i basestasjonene er gitt i referanserammen EUREF89, og derfor vil også de resulterende koordinatene på punktene også være gitt i EUREF89. Alle andre punkt settes som ukjente. Som kvalitetsmål på de beregnede koordinatene skal det brukes indre pålitelighet, ytre pålitelighet og standardavvik, i tillegg til det beregnede standardavviket på vektsenheten fra hver utjevning. På tilsvarende måte som i grovfeilsøket og kontrollen, gjøres beregningene separat i grunnriss og i høyde.

Testområdet SOYLE i grunnriss:

STATISTIKK

Antall iterasjoner	:	1
Antall observasjoner retning	:	12
Antall observasjoner avstand	:	12
Antall observasjoner	:	24
Antall ukjente grunnrisskoordinater	:	6
Antall ukjente	:	6
Antall overbestemmelser	:	18
Antall korrelasjoner	:	12
Feilkvadratsum	:	715.15288627
Beregnet std.avvik på vektsenheten	:	6.3032
Antatt std.avvik på vektsenheten	:	1.0000

YTRE PÅLITELIGHET

DATUM: EUREF89 - SONE 32

UTJEVNING I GRUNNRIS

TVUNGEN UTJEVNING

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

NYBESTEMTE KOORDINATER MED MIDLERE FEIL [meter]

PUNKT	N	E	H	sN	sE	sH
SOYLE_1	6615715.076	599810.022		0.005	0.003	
SOYLE_2	6615715.012	599807.019		0.004	0.003	
SOYLE_3	6615717.133	599808.535		0.003	0.003	

YTRE PÅLITELIGHET - KOORDINATER [meter]

COORDINAT	Observasjon.... [meter/gon]	Indre pål.	Ytre pål.
P SOYLE_1	SOYLE_3 1 SOYLE_1	D -0.037	0.011
P SOYLE_2	AASC 1 SOYLE_2	D -0.023	0.007
P SOYLE_3	AASC 1 SOYLE_3	D 0.027	0.009

Figur 23: Utskrift fra GISLINE som viser resultater fra utjevning i grunnriss på testområdet SOYLE. Koordinatene er gitt i EUREF89 UTM sone 32N.

Testområde SOYLE i høyde:

STATISTIKK

```

Antall iterasjoner                :                1
Antall observasjoner høydeforskjell :                12
Antall observasjoner                :                12
Antall ukjente høydekoordinater    :                3
Antall ukjente                      :                3

Antall overbestemmelser            :                9

Feilkvadratsum                     :                1607.23973169
Beregnet std.avvik på vektsenheten :                13.3635
Antatt std.avvik på vektsenheten   :                1.0000
  
```

YTRE PÅLITELIGHET

UTJEVNING I HØYDE

TVUNGEN UTJEVNING

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

NYBESTEMTE KOORDINATER MED MIDLERE FEIL [meter]

PUNKT	N	E	H	sN	sE	sH
SOYLE_1			142.056			0.018
SOYLE_2			141.853			0.018
SOYLE_3			142.295			0.015

YTRE PÅLITELIGHET - KOORDINATER [meter]

COORDINAT	Observasjon....[meter/gon]	Indre pål.	Ytre pål.
H SOYLE_1	SOYLE_3 1 SOYLE_1	dH 0.138	0.040
H SOYLE_2	SOYLE_3 1 SOYLE_2	dH 0.121	0.036
H SOYLE_3	AASC 1 SOYLE_3	dH 0.112	0.036

Figur 24: Utskrift fra GISLINE som viser resultater fra utjevning i høyde for testområdet SOYLE. Høydene er ellipsoidiske.

Testområde FUGNER i grunnriss:

STATISTIKK

Antall iterasjoner	:	1
Antall observasjoner retning	:	26
Antall observasjoner avstand	:	27
Antall observasjoner	:	53
Antall ukjente grunnrisskoordinater	:	18
Antall ukjente orienteringselementer	:	3
Antall ukjente	:	21
Antall overbestemmelser	:	32
Antall korrelasjoner	:	10
Feilkvadratsum	:	69.48242248
Beregnet std.avvik på vektsenheten		1.4735
Antatt std.avvik på vektsenheten	:	1.0000

YTRE PÅLITELIGHET

DATUM: EUREF89 - SONE 32

UTJEVNING I GRUNNRIS

TVUNGEN UTJEVNING

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

NYBESTEMTE KOORDINATER MED MIDLERE FEIL [meter]

PUNKT	N	E	H	sN	sE	sH
FAST_1	6615578.139	599347.339		0.007	0.004	
FAST_2	6615578.531	599346.083		0.007	0.004	
FAST_3	6615577.262	599346.348		0.008	0.005	
FOUGNER_1	6615597.951	599349.865		0.006	0.003	
FOUGNER_2	6615626.544	599367.422		0.006	0.004	
FOUGNER_3	6615524.198	599322.852		0.005	0.003	
FRI_2	6615567.575	599323.183		0.006	0.003	
FRI_3	6615566.180	599338.257		0.006	0.003	
FRI_4	6615587.801	599353.043		0.006	0.004	

YTRE PÅLITELIGHET - KOORDINATER [meter]

COORDINAT	Observasjon....[meter/gon]	Indre pål.	Ytre pål.
P FAST_1	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.011
P FAST_2	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.011
P FAST_3	FRI_4 1 FAST_3 D	0.027	0.014
P FUGNER_1	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.010
P FUGNER_2	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.010
P FUGNER_3	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.014
P FRI_2	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.012
P FRI_3	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.012
P FRI_4	FLO3 1 FUGNER_3 R	-0.00225	0.011

Figur 25: Utskrift fra GISLINE som viser resultater fra utjevning i grunnriss for testområdet FUGNER. Koordinatene er gitt i EUREF89 UTM sone 32N.

Testområdet FUGNER i høyde:

STATISTIKK

```

Antall iterasjoner           :           1
Antall observasjoner høydeforskjell :       26
Antall observasjoner           :       26
Antall ukjente høydekoordinater :         9
Antall ukjente                 :         9

Antall overbestemmelser     :           17

Feilkvadratsum              :       1845.20956705
Beregnet std.avvik på vektsenheten :       10.4183
Antatt std.avvik på vektsenheten   :           1.0000
  
```

YTRE PÅLITELIGHET

UTJEVNING I HØYDE

TVUNGEN UTJEVNING

GITTE KOORDINATER [meter]

PUNKT	N	E	H
AASC	6614931.498	600389.138	133.463
FLO3	6615523.159	600153.480	142.696

NYBESTEMTE KOORDINATER MED MIDLERE FEIL [meter]

PUNKT	N	E	H	sN	sE	sH
FAST_1			127.619			0.073
FAST_2			127.691			0.073
FAST_3			127.707			0.073
FOUGNER_1			126.394			0.072
FOUGNER_2			124.938			0.073
FOUGNER_3			127.935			0.071
FRI_2			128.451			0.072
FRI_3			129.694			0.072
FRI_4			128.610			0.072

YTRE PÅLITELIGHET - KOORDINATER [meter]

KOORDINAT	Observasjon.... [meter/gon]	Indre pål.	Ytre pål.
H FAST_1	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*
H FAST_2	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*
H FAST_3	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*
H FUGNER_1	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.120*
H FUGNER_2	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*
H FUGNER_3	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.123*
H FRI_2	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*
H FRI_3	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*
H FRI_4	FLO3 1 FUGNER_3 dh	-0.330	-0.121*

Figur 26: Utskrift fra GISLINE som viser resultater fra utjevning i høyde for testområdet FUGNER. Høydene er ellipsoidiske.

Figurene 23, 24, 25 og 26 viser resultatene fra utjevningene på de to testområdene i grunnriss og høyde. Det er her viktig å merke seg at på testområdet SOYLE er det fastpunktene SOYLE_1, SOYLE_2 og SOYLE_3 som skal brukes som referansepunkt, imens på testområdet FOUGNER er det fastpunktene FAST_1, FAST_2 og FAST_3 som skal brukes som referansepunkt. Med referansepunkt menes det fastpunktene testobjektene skal måle over, og som derfor skal benyttes som fastverdier (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008) (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Schaefer & Woodyer, 2015). De påfølgende tabellene oppsummerer resultatene fra figur 23, figur 24, figur 25 og figur 26.

Punkt	Nord	Øst	sN	sE	Ytre pålitelighet
SOYLE_1	6615715.076	599810.022	0.005	0.003	0.011
SOYLE_2	6615715.012	599807.019	0.004	0.003	0.007
SOYLE_3	6615717.133	599808.535	0.003	0.003	0.009

Tabell 3: Koordinater i grunnriss til referansepunktene på testområdet SOYLE gitt i UTM sone 32 EUREF89 med tilhørende kvalitetsmål. Enhet er meter.

Punkt	Høyde	sH	Ytre pålitelighet
SOYLE_1	142.056	0.018	0.040
SOYLE_2	141.853	0.018	0.036
SOYLE_3	142.295	0.015	0.036

Tabell 4: De beregnede høydene på referansepunktene på testområdet SOYLE med tilhørende kvalitetsmål. Høydene er ellipsoidiske. Enhet er meter.

Punkt	Nord	Øst	sN	sE	Ytre pålitelighet
FAST_1	6615578.139	599347.339	0.007	0.004	0.011
FAST_2	6615578.531	599346.083	0.007	0.004	0.011
FAST_3	6615577.262	599346.348	0.008	0.005	0.014

Tabell 5: Koordinater i grunnriss til referansepunktene på testområdet FOUGNER gitt i UTM sone 32 EUREF89 med tilhørende kvalitetsmål. Enhet er meter.

Punkt	Høyde	sH	Ytre pålitelighet
FAST_1	127.619	0.073	0.121
FAST_2	127.691	0.073	0.121
FAST_3	127.707	0.073	0.121

Tabell 6: De beregnede høydene på referansepunktene på testområdet FOUGNER med tilhørende kvalitetsmål. Høydene er ellipsoidiske. Enhet er meter.

Fra utjevningresultatene fremgår det at de beregnede koordinatene på begge testområder er bestemt vesentlig bedre i grunnriss enn i høyde. Dette var som forventet, da høydekomponentene i gapene til trekantene av GNSS-vektorene var betraktelig større enn gapene i grunnrisskomponentene, noe som kan skyldes en høy sentreringsusikkerhet. Den høye sentreringsusikkerheten gir seg også til uttrykk i det beregnede standardavviket på vektsenheten i utjevningen i grunnriss på testområdet SOYLE, da det her var målt tre ekstra GNSS-vektorer med tre nye sentreringer. Videre undersøkelser i GISLINE avdekker at instrumentparameterne for det aktuelle instrumentet som er benyttet i denne oppgaven er satt til 2 millimeter, imens det i realiteten er nærmere 5 centimeter som tidligere fastsatt.

Fortsatt må resultatene av disse utjevningene vurderes i forhold til kriteriene som ble fastsatt i avsnitt 4.1.2, der det ble nevnt at nøyaktigheten til referansene bør være i størrelsesorden centimeter. I grunnriss viser det seg at dette kriteriet er oppfylt for alle de målte fastpunktene, der standardavvikene på de estimerte koordinatene er bedre enn 1 centimeter. De beregnede ytre pålitelighetene, som er den største skaden en gjenværende grov feil kan gjøre på koordinatene (Gjevestad, 2018), ligger mellom 1 og 2 centimeter som vist i tabell 3 og tabell 5. Høydekomponentene på SOYLE har standardavvik på rundt 2 centimeter med en ytre pålitelighet på rundt 4 centimeter, imens høydekomponentene på FOUGNER har standardavvik på omtrent 7 centimeter med en ytre pålitelighet på 12 centimeter som vist i tabell 4 og tabell 6. Videre i oppgaven er det standardavviket på de estimerte koordinatene som skal brukes som kvalitetsmål på referansepunktene, og derfor antas estimatene på koordinatene fra utjevningene ovenfor som et godt nok datagrunnlag for videre beregninger.

4.1.4.3 Testobjekter

4.1.4.3.1 Rutiner for datainnsamling

I henhold til metoden fastsatt i kapittel 4.1.2 skulle punktobservasjonene fra testobjektene sammenliknes med en fasitverdi for beregning av posisjonsnøyaktighet. I henhold til forsøksdesignen fastsatt i kapittel 3 skulle deretter posisjonsnøyaktigheten til de ulike testobjektene sammenliknes ved at dataene samles inn under identiske måleforhold. For å realisere dette ble det målt inn tre referansepunkt av signifikant høyere nøyaktighet enn den antatte nøyaktigheten i dataene fra testobjektene på hvert av testområdene. Disse referansepunktene skulle fungere som fasitverdier (Schaefer & Woodyer, 2015) (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009) (Wing, 2008) (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). For å sikre konsistens i datagrunnlaget ble det fulgt et sett med rutiner før og under hver målesesjon:

Før:

- Testobjektene ble slått på 10-15 minutter utendørs før hver målesesjon settes i gang. Dette ble gjort for å sikre at testobjektene får lastet ned de kringkastede bane- og klokke-dataene fra satellittene, som i teorien skal ta 12.5 minutter (Seeber, 2003).
- Hvert testobjekt festes til toppen av en roverstang som sentreres over ett av referansepunktene (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008). Roverstengene har en lengde på 130 eller 140 centimeter.
- Hver roverstang horisonteres over referansepunktene ved bruk av dåselibeller som er påmontert. Det sørges for at testobjektene holdes horisontert under hele målesesjonen ved bruk av støttearmer festet til roverstengene.
- Alle testobjektene stilles inn på data-sampling hvert sekund.

Under:

- Alle testobjektene starter å samle inn data på samme tid så langt det er mulig.
- Navn på testobjekt og korresponderende referansepunkt det måles over, noteres ned.
- Etter at alle testobjektene har samlet inn data i et 10 minutters overlappende tidsintervall avsluttes målesesjonen. Dette tilsvarer 600 punktobservasjoner i hvert testobjekt fra hver målesesjon.

Den statiske datainnsamlingen tok sted i slutten av februar 2018 og starten av mars 2018. Det ble gjennomført 10 statiske målesesjoner på hvert av testområdene på 10 forskjellige dager, noe som tilsvarer totalt 20 målesesjoner.

Målesesjon	Dato	Klokkeslett(UTC)
1	18.02.18	12:42 – 12:53
2	19.02.18	14:10 – 14:21
3	22.02.18	11:46 – 11:58
4	23.02.18	12:22 – 12:34
5	02.03.18	14:01 – 14:12
6	03.03.18	09:53 – 10:04
7	04.03.18	10:06 – 10:16
8	05.03.18	09:04 – 09:15
9	06.03.18	08:17 – 08:27
10	07.03.18	13:20 – 13:30

Tabell 7: Oversikt over målesesjonene på testområdet SOYLE.

Målesesjon	Dato	Klokkeslett(UTC)
11	18.02.18	14:15 – 14:26
12	19.02.18	12:38 – 12:50
13	22.02.18	12:28 – 12:38
14	23.02.18	13:03 – 13:15
15	02.03.18	14:59 – 15:10
16	03.03.18	10:44 – 10:55
17	04.03.18	10:50 – 11:00
18	05.03.18	09:47 – 09:58
19	06.03.18	09:11 – 09:21
20	07.03.18	14:06 – 14:17

Tabell 8: Oversikt over målesesjonene på testområdet FOUNER.

Tabell 7 og 8 gir en oversikt med dato og klokkeslett for de gjennomførte målesesjonene på de to statistiske testområdene. Målesesjonene 1 til 10 har funnet sted på SOYLE og målesesjonene 11 til 20 har funnet sted på FOUNER. Det er verdt å merke seg her at målesesjonene på de to statistiske testområdene er gjennomført på samme dag, og at alle målesesjonene har funnet sted stort sett på morgenen og formiddagen.

4.1.4.3.2 Prosessering av data fra testobjekter

Etter at den aktuelle målesesjonen for testobjektene er avsluttet, gjennomføres følgende steg for å klargjøre dataene fra testobjektene for videre beregninger:

- Dataene fra testobjektene overføres til «Garmin connect» ved bruk av USB-kabler eller ANT-stick.
- Dataene lastes ned igjen i form av punktobservasjoner på GPX-format. GPX-formatet er et XML dataformat utviklet av kartprogramvareselskapet TopoGrafix for utveksling av GPS-data mellom ulike applikasjoner (McNamara, 2008). Alle koordinatene i GPX-formatet er gitt relativt til WGS84-datumet, alle målingene er metriske og alle tidspunkt er gitt i UTC-tid (Topografix, 2004).
- GPX-filene konverteres deretter til et mer lesbart tekstformat ved bruk av et verktøy på nettsiden «GPS Visualizer». «GPS Visualizer» inneholder et webgrensesnitt for konvertering mellom ulike filformater for GPS data (McNamara, 2008). Dette brukergrensesnittet baserer seg på programvaren «GPSBabel» (Schneider, 2018). «GPSBabel» er en gratis programvare for overføring og konvertering av ulike formater med GPS data (Lipe, 2018) (McNamara, 2008).
- Punktobservasjonene i tekstfilene transformeres fra bredde- og lengdegrader i WGS84 til EUREF89 UTM sone 32N med programvaren TerraPos. TerraPos er en programvare for etter-prosessering av GNSS/INS-data med muligheter for geodetiske transformasjoner, utviklet av TerraTec AS (TerraTec AS) (TerraTec AS, 2018) (TerraTec AS, 2013). I transformasjonen antas det at punktobservasjonene i referanserammen WGS84 er identiske med referanserammen ITRF2014 epoke 2018. Dette er en plausibel antagelse, tatt i betraktning at WGS84 og ITRF er sammenfallende på centimeter-nivå (Seeber, 2003) (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006).
- For videre prosessering benyttes MATLAB til beregning av aktuelle kvalitetsmål som fastsatt i avsnitt 4.1.2.

4.2 DEL 2: KINEMATISK

4.2.1 Innledning

I denne delen av oppgaven har dataene fra testobjektene blitt samlet inn kinematisk, noe som betyr at testobjektene har vært i bevegelse under datainnsamlingen. En konseptuell forskjell fra den statiske delen er at resultatene fra testobjektene både kan representeres som punkt og som linjer. I denne oppgaven er det valgt å bruke metoder som tar utgangspunkt i begge representasjonene.

4.2.2 Metode

I denne delen av oppgaven skal den kinematiske posisjonsnøyaktigheten til testobjektene beregnes ved å sammenlikne punktobservasjonene fra testobjektene med en referanse av bedre posisjonsnøyaktighet (Kaartinen, et al., 2015). I en undersøkelse fra 2015 viste Kaartinen et al., (2015) at det kan oppnås en posisjonsnøyaktighet i grunnriss på 0.7 meter i form av RMSE på en referanselinje målt inn under ulike vegetasjonsforhold. Referanselinjen var målt inn ved å benytte en kombinasjon av IMU- og GNSS instrumenter montert på en ATV. Dataene ble deretter prosessert i ettetid i egnet programvare. At en tilsvarende posisjonsnøyaktighet kan oppnås i en kombinasjon av IMU og GNSS, støttes også av Han et al., (2015) der ytelsen til et slikt system ble undersøkt under vanskelige måleforhold. Med vanskelige måleforhold menes det i hovedsak områder der signaler fra satellitter i periodevis kan være utilgjengelig, som for eksempel i urbane kløfter. Undersøkelsen fant at ved å bruke et kombinert INS/GPS/BDS – system med TC integrasjon kan man oppnå centimeter posisjonsnøyaktighet, selv under vanskelige måleforhold (Han, Wang, Wang, & Tan, 2015).

Med utgangspunkt i de nevnte undersøkelsene ble det valgt å benytte en kombinasjon av IMU og GNSS for å beregne en referanselinje langs en forhåndsbestemt sti på det aktuelle testområdet. Dette testområdet beskrives nærmere i avsnitt 4.2.4.1. Etter initiativ fra min veileder Ola Øvstedal ble det besluttet å gjennomføre flere målesesjoner på det aktuelle testområdet med det IMU/GNSS-kombinerte systemet, da instrumentene kan være utsatt for ulike feilkilder (Groves, 2013) som fastsatt i avsnitt 2.5. For grovfeilsøk, kontroll og utjevning av de innmålte referanselinjene ble det til disse formålene skrevet et program av Ola Øvstedal. Ola Øvstedal sto for både arkitekturen og selve programmeringen av dette programmet. Programmet baserer seg på bruk av vektet utjevning etter minste kvadraters metode og en multipl t-test for grovfeilsøk (Gjevstad, 2018). Videre følger en trinnvis beskrivelse av den grunnleggende virkemåten til programmet

- Programmet baserer seg på bruk av punktdatasett gitt i et tekstformat.
- Programmet velger ett av punktdatasettene, her kalt opprinnelig punktdatasett, som utgangspunkt for videre beregninger. Programmet regner seg suksessivt gjennom alle punktene i det opprinnelige punktdatasettet.
- For hvert punkt i det opprinnelige punktdatasettet identifiseres ett nærliggende punkt fra hver av de andre punktdatasettene basert på nærmeste naboavstand. Med andre ord finner programmet de nærmeste nabopunktene til de andre punktdatasettene, beregnet fra punktet i det opprinnelige punktdatasettet (O'Sullivan & Unwin, 2010). Punktet i det opprinnelige punktdatasettet med de identifiserte punktene fra de andre punktdatasettene, utgjør det som vil refereres til som en punktklynge. Hver punktklynge vil bestå av like mange punkt som antall punktdatasett som inngår i beregningene.
- For hver punktklynge estimeres koordinatene til et nytt punkt. De identifiserte punktene brukes som observasjoner i en vektet utjevning etter minste kvadraters metode (Ghilani, 2010). Antall observasjoner for hvert estimert punkt er antall punktdatasett multiplisert med to. Vektingen baseres på usikkerheten i observasjonene (Ghilani, 2010), altså standardavviket til de identifiserte punktene.
- De ukjente, søkte estimatene er nord- og østkoordinatene til det nye utjevnete punktet i den aktuelle punktklyngen med tilhørende standardavvik. I tillegg estimeres en grovfeil \widehat{V}_l (Gjevestad, 2018).
- For grovfeilen \widehat{V}_l estimeres det også et standardavvik $\widehat{\sigma}_{\widehat{V}_l}$, som muliggjør beregning av en teststørrelse t fra formel (2.8) i avsnitt 2.2 for vurdering av om estimert grovfeil \widehat{V}_l er signifikant forskjellig fra null (Gjevestad, 2018).
- Første iterasjon avsluttes når det er estimert ett punkt i hver av punktklyngene.
- I neste iterasjon gjentas samme prosedyre. Dersom teststørrelsen t som ble beregnet for hvert av de nye, utjevnete punktene overskrider en terskelverdi hentet fra en t -fordeling, kan en potensiell grov feil være tilstede i den aktuelle observasjonen, dvs. punktet fra det aktuelle punktdatasettet. Dette punktet forkastes før en ny utjevning gjennomføres (Gjevestad, 2018). Det er viktig å merke seg at dersom den grove feilen detekteres kun i nord eller øst-komponenten for et punkt, forkastes det aktuelle punktet i sin helhet.
- Det gjennomføres et tilstrekkelig antall iterasjoner for at alle grove feil i datasettet skal lukes ut, slik at de resterende feilene kan antas tilfeldige og normalfordelte. Dersom dette er tilfellet vil utjevning etter minste kvadraters metode gi et optimalt estimat på de ukjente koordinatene (Gjevestad, 2018).

For videre beregninger av posisjonsnøyaktighet i testobjektene tas det utgangspunkt i artikkelen Tveite & Langaas, (1999), hvor det presenteres ulike metoder for å vurdere geometrisk nøyaktighet og fullstendighet på linjedatasett. Den første metoden som presenteres i dette avsnittet tar utgangspunkt i beregning av kvalitetsmål på basis av en punktrepresentasjon, imens den andre metoden tar utgangspunkt i beregning av kvalitetsmål på basis av en linjerepresentasjon.

Punkt

Dersom man kan finne korresponderende punkt langs to linjer som representerer det samme fenomenet, der én linje X er av ukjent kvalitet og én linje Q er av antatt bedre nøyaktighet, kan den geometriske nøyaktigheten for linje X beregnes ved å finne enkeltavvikene mellom de korresponderende punktene på de to linjene (Tveite & Langaas, 1999). I praksis kan dette gjennomføres ved sampling av punkt i jevne intervaller langs linjene X og Q, og for hvert av punktene langs X finne det korresponderende punktet på Q basert på nærmeste naboavstand (Tveite & Langaas, 1999). Kvalitetsmål for hele linjen X kan dermed beregnes i form av standardavvik og systematisk avvik, basert på enkeltavvikene mellom alle de korresponderende punktene (Tveite & Langaas, 1999). I denne oppgaven skal standardavviket beregnes med formel (1.1) fra avsnitt 2.1 og de systematiske avvikene beregnes med formel (1.4) og (1.5) fra avsnitt 2.1.

Dersom sentreringsusikkerheten over referansen antas å være statistisk uavhengig av usikkerheten i bestemmelsen av referansen på tilsvarende måte som i avsnitt 4.1.2, kan formel (1.6) fra avsnitt 2.1 om forplantning av varianser (Ghilani, 2010) benyttes til å beregne den totale usikkerheten s_f gitt i formel (4.1.4) fra avsnitt 4.1.2.

Sentreringsusikkerheten kan i denne sammenheng tolkes som evnen til å treffe den utjevne, sanne referanselinjen med testobjektene under hver målesesjon. En inspeksjon i testområdet langs stien viser at stibredden er omtrent 3 meter, og sentreringsusikkerheten i form av standardavvik antas dermed til å være 1.0 meter i både nord-komponenten og øst-komponenten. Usikkerheten s_p i referansepunktene antas å være 0.2 meter i nord-komponenten og øst-komponenten. Dette baseres i hovedsak på figur 42 i avsnitt 4.2.4.2.5, der det vises at omtrent 90 prosent av punktene som utgjør referanselinjen har en usikkerhet i form av standardavvik på 0.2 meter eller mindre.

Linjer

En annen metode for beregning av geometrisk nøyaktighet for linjer som presenteres i Tveite & Langaas, (1999) kalles «The buffer-overlay-statistics method» - BOS-metoden. BOS-metoden baserer seg i hovedsak på buffer- og overlay-operasjonene som er tilgjengelig i de fleste GIS-programvarer (Tveite & Langaas, 1999). I praksis implementeres metoden i trinnvise steg:

1. En bufferoperasjon med en gitt avstand i gjøres på både referanselinjen Q av kjent kvalitet og linjen X av ukjent kvalitet. Resultatet av bufferoperasjonene er polygonene XB og QB.
2. En overlay-operasjon gjennomføres på polygonene QB og XB som er dannet fra bufferoperasjonene.
3. Statistiske mål beregnes på grunnlag av resultatene fra 1 og 2.

Et mål på den geometriske nøyaktigheten til linjen X, i denne artikkelen kalt «average displacement» - gjennomsnittlig forskyvning, gis ved formelen (Tveite & Langaas, 1999)

$$DE_i = \pi \times bs_i \times \frac{Area(\overline{XB_i} \cap QB_i)}{Area(XB_i)} \quad (4.2.1)$$

der bs_i angir bufferstørrelse i, $Area(XB_i)$ angir arealet til polygonen XB_i , og $Area(\overline{XB_i} \cap QB_i)$ angir arealet utenfor polygonen XB_i og innenfor polygonen QB_i . Enhet er meter. Metoden er iterativ i den forstand at for hver bufferstørrelse i beregnes det et nytt estimat for den gjennomsnittlige forskyvningen DE_i . De gjennomsnittlige forskyvningene fra alle iterasjonene kan så plottes i en graf for visualisering av resultatene. Punktet der grafen flater skal gi et godt estimat for den gjennomsnittlige forskyvningen for linjen X (Tveite & Langaas, 1999). Det er viktig å merke seg at linjen Q bør være av signifikant bedre kvalitet enn linjen X, men siden BOS-metoden gir relative kvalitetsmål vil den fungere på alle typer referansedatasett (Tveite & Langaas, 1999).

Estimatene på koordinatene fra utjevningsprogrammet beskrevet tidligere, skal kontrolleres både ved bruk av BOS-metoden og nærmeste nabo (Tveite & Langaas, 1999).

For beregning av kinematisk posisjonsnøyaktighet skal punktobservasjonene fra testobjektene først samples på nytt, før det gjennomføres en romlig kobling basert på nærmeste nabo (Tveite, 2014) mellom de nye, samplede punktene og de utjevnedde punktene på referanselinjen. I samplingen benyttes en separasjonsavstand mellom punktene langs linjen dannet fra punktobservasjonene fra testobjektene på 5 centimeter, og i den romlige koblingen benyttes punktobservasjonene fra testobjektene som «Input vector layer» og de utjevnedde punktene på referanselinjen som «Join vector layer» (Tveite, 2014). Det henvises til appendiks A for en nærmere beskrivelse av romlig kobling ved bruk av «NNJoin» (Tveite, 2014), og appendiks C for en nærmere beskrivelse av sampling av nye punkt langs linjer (Kapusta, 2015) (Macho, 2017). Til slutt beregnes estimater på posisjonsnøyaktighet i henhold til formel (1.1), (1.3), (1.4) og (1.5) fra avsnitt 2.1.

Sammenlikning av smart recording mot 1 sekund rate

For å avgjøre om bruk av smart-recording i testobjektet Fenix 5X har en statistisk signifikant påvirkning på posisjonsnøyaktigheten, skal det benyttes en statistisk hypotesetest i form av paret T-test som beskrevet i avsnitt 4.1.2 (Løvås, 2013). Hypotesene settes opp som følger

$$\text{Nullhypotese} \quad H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$\text{Alternativ hypotese} \quad H_1: \mu_1 > \mu_2$$

der μ_1 angir den vektete, gjennomsnittlige posisjonsfeilen for gruppen Fenix 5X kun GPS – smart recording og μ_2 angir den vektete, gjennomsnittlige posisjonsfeilen for gruppen Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate. Posisjonsfeilene vektet for å ta høyde for usikkerhet i referansepunktene som er koblet med punktene fra testobjektene. I mange sammenhenger baseres vektene på usikkerheten i de uavhengige observasjonene, slik at (Ghilani, 2010)

$$w_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (4.2.2)$$

der σ_0^2 angir variansen til vektsenheden og σ_i^2 angir variansen til observasjon i. Dersom variansen til vektsenheden i formel (4.2.2) settes lik 1 og posisjonsfeilene antas uavhengige (Ghilani, 2010), kan vekten w_i for posisjonsfeil i kan regnes ut ved

$$w_i = \frac{1}{s_f^2} \quad (4.2.3)$$

der s_f beregnes fra formel (4.1.4) fra avsnitt 4.1.2 med usikkerheten i referansepunktet s_p lik punktstandardavviket i grunnriss for det aktuelle referansepunktet beregnet fra formel (1.3) fra avsnitt 2.1, og sentreringsusikkerheten s_s antas til å være 1.4 meter.

For å beregne den vektete, gjennomsnittlige posisjonsfeilen $\overline{\mu_{vektet}}$ benyttes (Statens kartverk, 2015)

$$\overline{\mu_{vektet}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.2.4)$$

der w_i angir vekten for posisjonsfeil μ_i .

For hver målesesjon beregnes det én vektet gjennomsnittlig posisjonsfeil for Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate, og én vektet gjennomsnittlig posisjonsfeil Fenix 5X kun GPS - smart recording, som deretter brukes som observasjoner i den paret T-testen. De vektete, gjennomsnittlige posisjonsfeilene for hver av målesesjonene benyttes som et observasjonspar som det beregnes differanser for. Videre brukes formlene (4.1.6), (4.1.7) og (4.1.8) fra avsnitt 4.1.2 for beregning av aktuelle størrelser som inngår i den paret T-testen. Dersom $T > t_\alpha$ forkastes nullhypotesen ved α signifikansnivå (Løvås, 2013).

4.2.3 Verktøy

Verktøy for den kinematiske datainnsamlingen og programvarene som ble brukt i senere beregninger vises i påfølgende tabell.

Type	Produsent	Navn
Løpeklokke	Garmin	Forerunner 310XT
Løpeklokke	Garmin	Fenix 5X
GNSS-antenne	Septentrio	PolaNt – x MF
Integrert INS/GNSS	Applanix	APX-15
Programvare	TerraTec AS	TerraPos 2.4.90
Programvare	QGIS	QGIS Desktop 2.18.3
Programvare	MathWorks	MATLAB R2016b
Programvare	Adam Scheider	GPSVisualizer
Programvare	GPSBabel	GPSBabel

Tabell 9: Oversikt over verktøy som ble brukt for datainnsamling og beregninger i den kinematiske delen av oppgaven.

4.2.4 Datagrunnlag

4.2.4.1 Valg av testområde



Figur 27: Kulturminnestien i Holstad i Askjumskogen med ortofoto som bakgrunn.

Før datainnsamling og analyser kunne iverksettes skulle det velges ett testområde som utgangspunkt for det kinematiske datagrunnlaget. Området skulle i hovedsak velges på bakgrunn av tilgjengelighet, terrengforhold, oppmerking og muligheter for kontroll. Området som ble valgt ligger i Askjumskogen i Ås kommune. Askjumskogen har en oppmerket sti og lysløype, nærmere bestemt Kulturminnestien i Holstad, som er en del av den åpne nasjonale databasen for tur- og friluftsruter. Denne databasen forvaltes av Kartverket i samarbeid med Miljødirektoratet (Kartverket B., 2017). Figur 27 viser et utsnitt over stien som ble brukt som utgangspunkt for den kinematiske datainnsamlingen. Som det fremgår

av figur 27 og etter en inspeksjon i felt, har denne stien i høy grad varierende terreng- og vegetasjonsforhold. Hver runde startet og sluttet nederst til høyre på den røde linjen i figur 27, der én runde hadde en lengde på omtrent 3.7 kilometer.

4.2.4.2 Referanse

4.2.4.2.1 Tur- og friluftsruter

Tur- og friluftsruter er et kartdatasett som kan lastes ned gratis fra Geonorge (Kartverket A., 2018). Geonorge er et nasjonalt nettsted for kartdata som driftes av Kartverket (Kartverket B., 2018), og inneholder blant annet skiløyper, fotruter og turruter for hele landet. Dataene leveres i formater som enkelt kan åpnes i diverse GIS-programvarer i et valgfritt romlig referansesystem, som i denne oppgaven er valgt til EUREF89 UTM sone 32.

Fra produktspesifikasjonen Tur- og friluftsruter fremgår det at datagrunnlaget for kulturminnestien i Holstad i Askjumskogen er samlet inn ved bruk av flere forskjellige målemetoder, og har dermed varierende grad av nøyaktighet (Kartverket A., 2017). Målemetodene inkluderer bruk av digitalt og analytisk stereoinstrument, samt en kombinasjon av GNSS og treghetsnavigasjon. Stien er delt opp i flere sammenhengende linjesegmenter koblet sammen med noder, altså punkt, med en oppført nøyaktighet i form av punktstandardavvik som varierer fra 30 centimeter til 5 meter. Dette bekreftes etter videre mailkorrespondanse med Kartverket. Figur 27 visualiserer det aktuelle datasettet med ortofoto som bakgrunn.

4.2.4.2.2 Ortofoto

Ortofoto som datagrunnlag i denne oppgaven ble mottatt på mail etter å ha sendt en forespørsel til min tilleggsveileder Håvard Tveite ved fakultet for realfag og teknologi, NMBU. Som Norge digitalt – medlem har NMBU tilgang til flere Geovekst-produkter. Metadata om det aktuelle ortofotoet vises i påfølgende tabell:

METADATA	ORTOFOTO
PROSJEKTNAMN	Follo 2013
EIER	Geovekst
FOTODATO	2013-07-06
DEKNINGSNUMMER	CO-10559
STRIPENUMMER	011 - 015
BILDENUMMER	47-71
PROSJEKTSTART	2013
ORTOFOTOTYPE	1
PIXELSTØRRELSE	0.08
BILDE-BIT-PIXEL	24
OPPTAKSMETODE	2
BILDEKATEGORI	3
OPPRINNELIGBILDESYS	22
OPPRINNELIGBILDEFORMAT	Tiled TIFF
ORIENTERINGSMETODE	2
FLYFIRMA	Cowi AS
PRODUSENT	Cowi AS

Tabell 10: Metadata om ortofoto som er benyttet i den kinematiske delen av oppgaven.

Ortofotot er levert i EUREF89 UTM sone 32. I henhold til Produktspesifikasjon for ortofoto i Norge – versjon 4.5 beskrives ortofototype 1 som «Ortofoto 10», opptaksmetode 2 som «Digital sensor», bildekategori 3 som «opptak i det synlige området» og orienteringsmetode 2 som «GNSS/INS med AAT» (Statens Kartverk, 2013).

Som fastsatt i avsnitt 2.6 vil hvert bildeelement i et ortofoto være stedfestet, og målinger kan dermed gjøres direkte i bildet (Andersen Ø. , 2003). Ved å måle koordinatene til hvert bildeelement langs kulturminnestien i Holstad der den kinematiske datainnsamlingen har foregått, kan en referanselinje bestemmes direkte i ortofotot. Dette forutsetter dog at stien er synlig i bildet. I forhold til denne oppgaven ble ortofotot først og fremst brukt for visuell kontroll og måling av avstander eller koordinater.

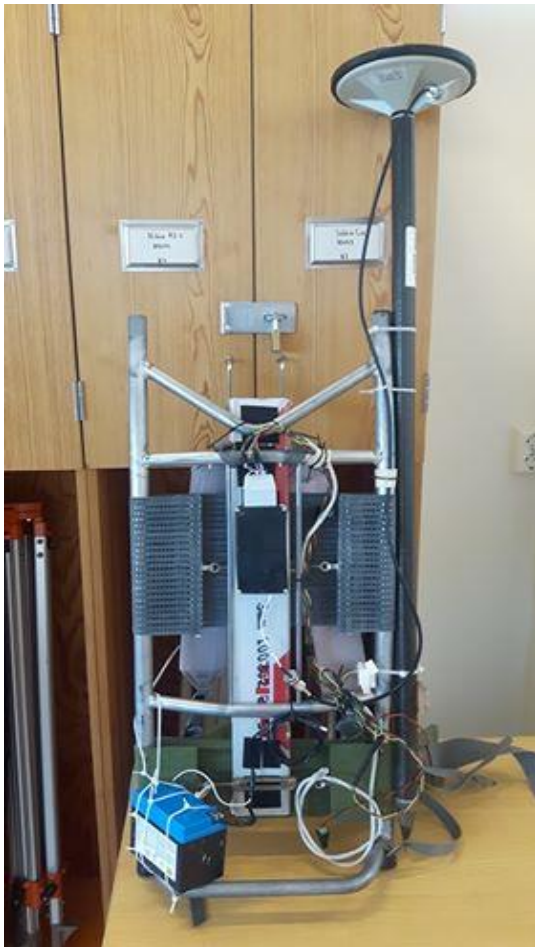
Kravene til stedfestingsnøyaktigheten i ortofotoene er først og fremst avhengig av ortofototype og FKB-standarden for området ortofotoene dekker (Statens Kartverk, 2013).

FKB-standard	Ortofotostandard		
	Ortofoto 10	Ortofoto 20	Ortofoto 50 - omløpsfotografering
A/B	35	50	500
B	90	90	500
C	150	300	500
D	-	-	500
Ortofotopløsning	10-15	20-25	50

Tabell 11: Toleranse for stedfestingsnøyaktighet, oppgitt som maksimalt tillatt standardavvik i grunnriss, og ortofotopløsning for produsert ortofoto. Enhet er centimeter. Tabellen er hentet fra Statens Kartverk, (2013).

Fra tabell 11 fremgår det at Ortofoto 1 fra prosjektet Follo 2013, som er av typen Ortofoto 10, har et krav om stedfestingsnøyaktighet mellom 35 og 150 centimeter. Ved søking i Kartverkets metadatakatalog om Ås kommune kommer det frem at det aktuelle området er av FKB-standard B (Kartverket C., 2018). Det maksimale tillatte standardavviket i grunnriss kan dermed antas å være 90 centimeter.

4.2.4.2.3 IMU/GNSS



Figur 28: Sekkmeis med INS/GNSS, GNSS-antenne og batteri.

Med hjelp fra professor Jon Glenn Omholt Gjevestad ved fakultet for realfag og teknologi, NMBU, ble et IMU/GNSS- kombinert system satt sammen med et batteri og en GNSS-antenne av typen PolaNt-x MF. I Kaartinen et al., (2015) ble de ulike komponentene fra det IMU/GNSS – kombinerte systemet montert på en ATV, men i denne oppgaven ble de nevnte komponentene montert på en stiv og bærbar plattform i form av en sekkmeis. Figur 28 viser den aktuelle sekkmeisen med det IMU/GNSS-kombinerte systemet som ble benyttet i datainnsamlingen.

Sekkmeisen med de påmonterte instrumentene ble båret på ryggen i rask og jevn gangfart under hele målesesjonen. Hver målesesjon startet fra hjem eller universitetsområdet, som ligger omtrent 40 minutters gange unna kulturminnestien i Holstad i Askjumskogen. På venstre arm ble testobjektene festet, og startet å logge data ved ankomst Askjumskogen. Det ble etter beste evne forsøkt å følge senterlinjen av stien under hele målesesjonen. Da hele runden i

Askjumskogen på omtrent 3.7 kilometer var gjennomført etter cirka 40 minutter, ble dataloggingen i testobjektene slått av før IMU/GNSS instrumentene ble båret tilbake til startpunktet. Her ble målesesjonen avsluttet og dataene overført. Varigheten på hver målesesjon var omtrent 2 timer. Datainnsamlingen tok sted i medio november 2017 og medio mars 2018, og totalt ble det gjennomført seks målesesjoner på seks forskjellige dager med det kombinerte IMU/GNSS – systemet.

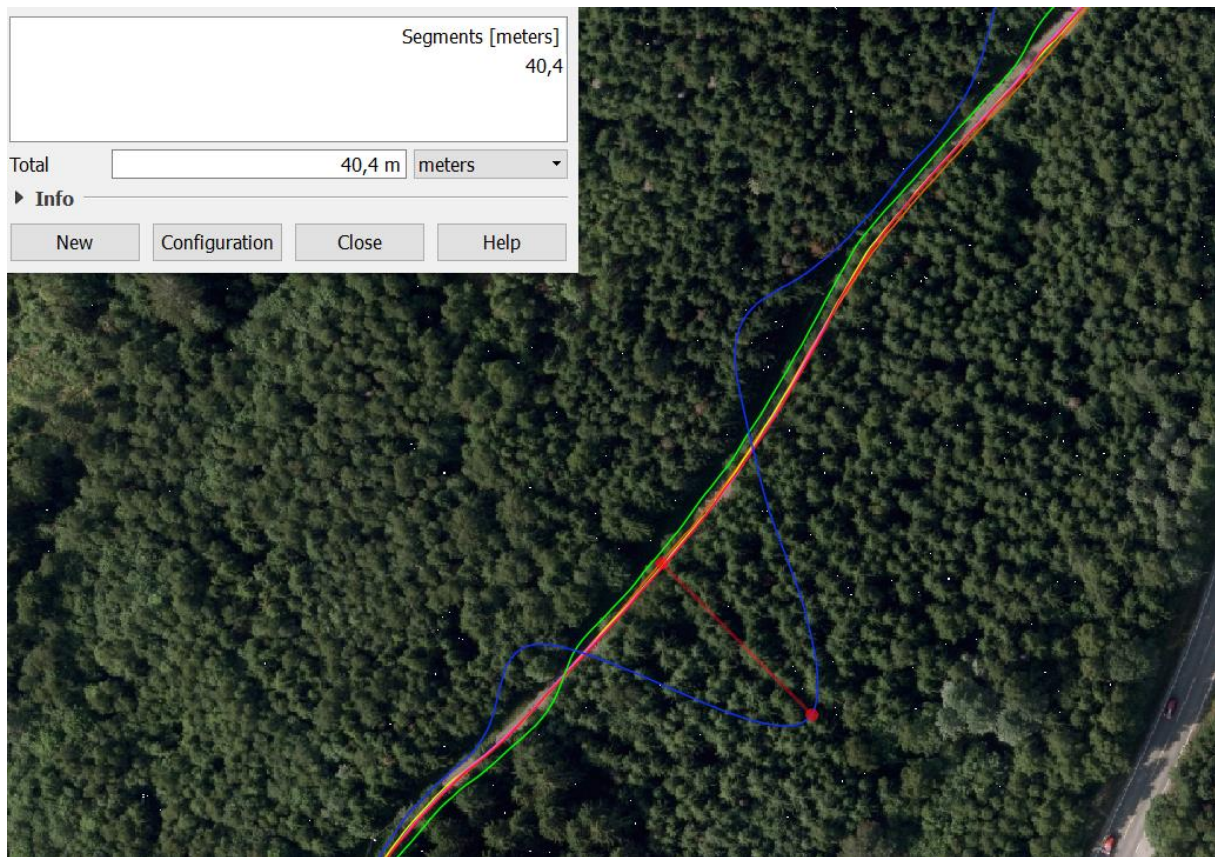
Dataene fra det IMU/GNSS- kombinerte systemet ble prosessert i programvaren TerraPos av professor Jon Glenn Omholt Gjevestad. På forespørsel ble resultatene fra prosesseringen skrevet ut i form av tekstfiler, der hver rad representerte ett punkt med tilhørende koordinater, standardavvik, ytre pålitelighet og tidspunkt med intervaller på ett sekund. Tidspunktene er gitt i UTC-tid. Koordinatene fra prosesseringen ble gitt som UTM-koordinater i sone 32 i referanserammen EUREF89. Posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik på punktene varierte fra størrelsesorden centimeter til størrelsesorden meter.



Figur 29: De seks beregnede linjene fra seks ulike målesesjoner med det IMU/GNSS kombinerte systemet med ortofoto som bakgrunn. Linjene fra hver målesesjon vises med hver sin farge.

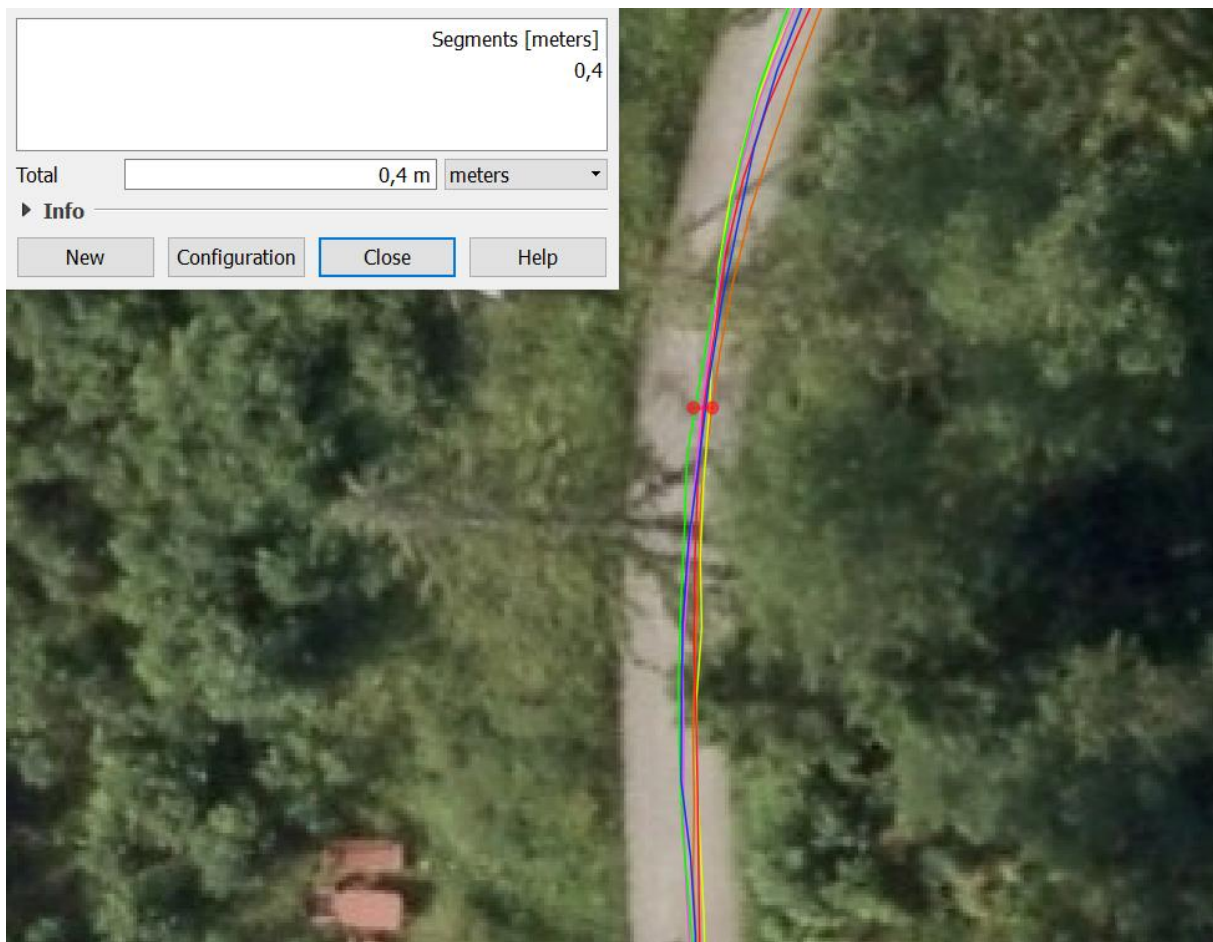
Figur 29 viser resultatene fra hver av målesesjonene som linjer. Linjene er dannet i QGIS ved hjelp av en plugin kalt «Points2One», som kan danne linjer eller polygoner ved å koble sammen hjørnepunkt (Kapusta, 2015). Fra figur 29 er det også verdt å merke seg at linjene fra hver målesesjon kan avvike betydelig fra hverandre, noen steder over 10 meter, selv om den samme stien er fulgt i hver målesesjon. Bredden på stien er omtrent 3 meter som det

ble påpekt i avsnitt 4.2.2, og man ville i utgangspunktet ikke forvente særlig større avvik enn dette.



Figur 30: Eksempel på beregnede linjer fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet med betydelige avvik fra hverandre med ortofoto som bakgrunn. Linjene fra hver målesesjon vises med hver sin farge.

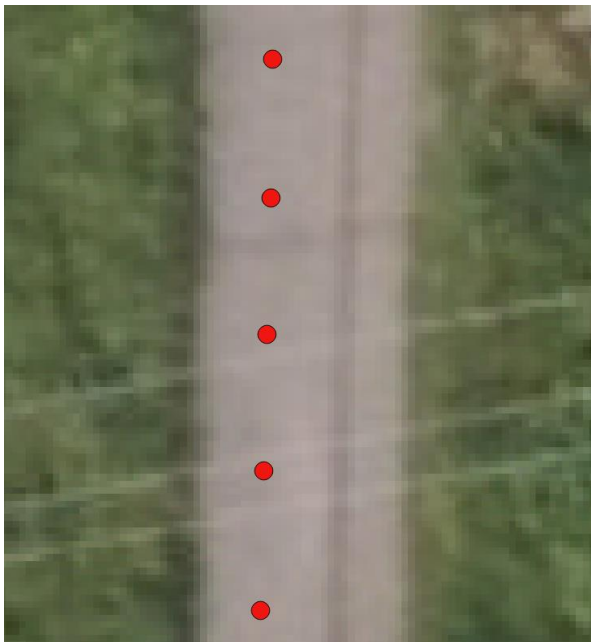
I figur 30 vises et eksempel hvor det er betydelige avvik mellom de beregnede linjene fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet. Etter målinger i bildet med måleverktøyet «Measure Line» (QGIS A., 2018) kan det se ut til at den røde linjen avviker omtrent 40 meter fra stien som ble brukt.



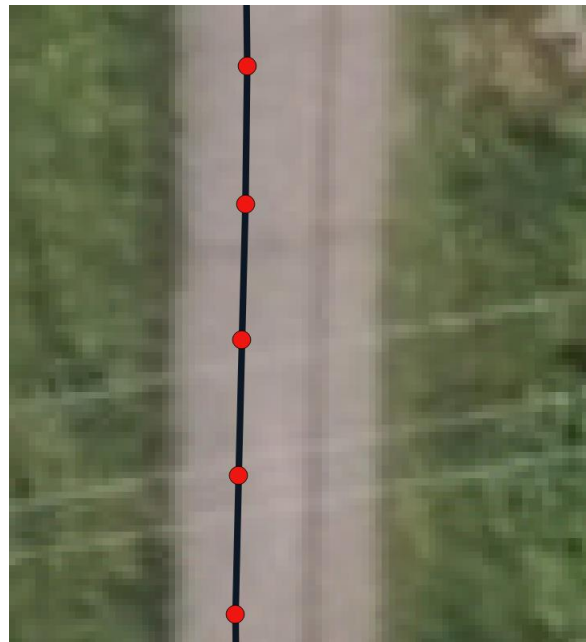
Figur 31: Eksempel på beregnede linjer fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet som sammenfaller svært godt. Hver av de beregnede linjene fra hver målesesjon vises med forskjellige farger med ortofoto som bakgrunn.

Figur 31 viser et eksempel hvor de beregnede linjene fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet sammenfaller godt. Ved bruk av måleverktøyet «Measure Line» (QGIS A., 2018) ser det ut til at avstanden mellom linjene er omtrent en halvmeter.

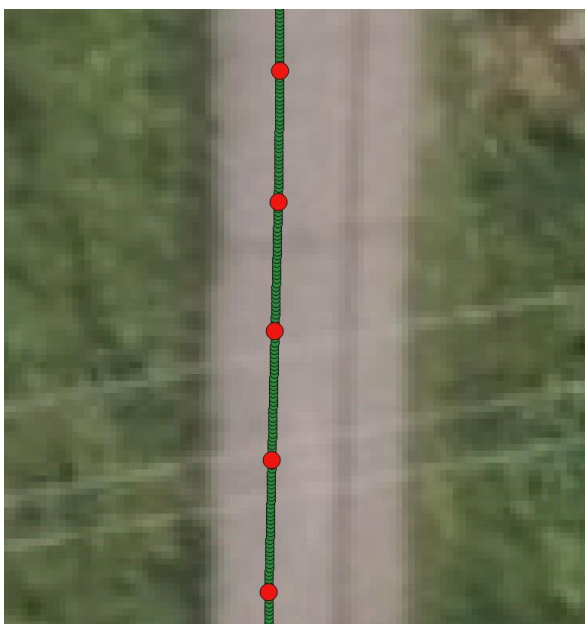
Etter konsultasjon med min veileder Ola Øvstedal ble det bestemt at de resulterende dataene fra det IMU/GNSS - kombinerte systemet måtte ytterligere tilrettelegges for optimal funksjon av programmet beskrevet i avsnitt 4.2.2. Årsaken til denne tilretteleggingen er at det aktuelle programmet for den senere utjevningen ikke behandler linjedatasett, men kun punktdatasett. Dersom punktene har svært kort avstand seg imellom kan det tenkes at punktdatasettet kan tilnærme seg en linje. Siden hvert punkt inngår som en observasjon i den påfølgende vektete utjevningen, vil det også være nødvendig å estimere usikkerheten i de nye samlede punktene. Usikkerheten i de nye samlede punktene skal interpoleres basert på usikkerheten i nærmeste nabo-kontrollpunkt (O'Sullivan & Unwin, 2010). Det henvises til appendiks C for en mer detaljert beskrivelse av fremgangsmåten i samlingen av nye punkt langs en linje (Kapusta, 2015) (Macho, 2017), og appendiks A for en beskrivelse av fremgangsmåten for en romlig kobling ved hjelp av «NNJoin» (Tveite, 2014).



Figur 32: Punktobservasjoner fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet importert i QGIS med ortofoto av stien som bakgrunn.



Figur 33: Linje som er dannet ut i fra punktobservasjonene med plugin «Points2Line» (Kapusta, 2015).



Figur 34: Nye, samlede punkt langs linjen (Macho, 2017) vist som grønne punkt. Standardavvik på de nye, samlede punktene er hentet fra nærmeste nabo fra de røde punktene ved hjelp av «NNJoin» (Tveite, 2014). Avstanden mellom de grønne punktene langs linjen er 5 centimeter.

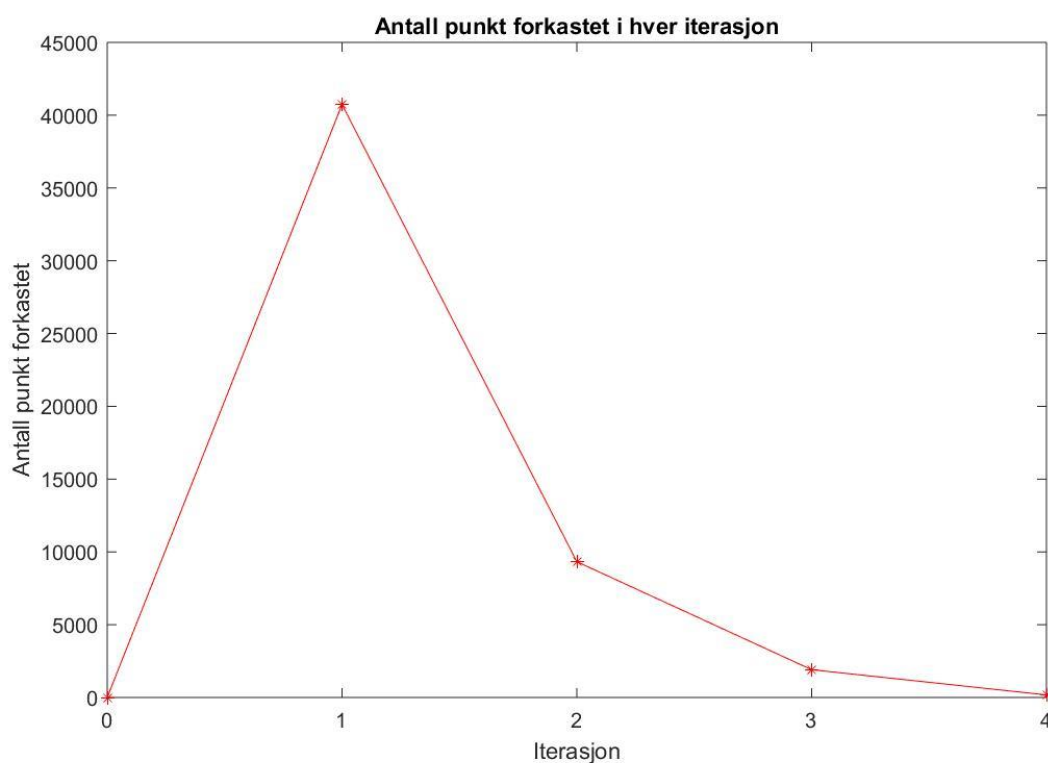
Figur 32, figur 33 og figur 34 illustrerer den trinnvise prosedyren som ble fulgt for tilrettelegging av punktobservasjonene fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet for den senere utjevningen. Prosessen med at det dannes nye punkt med tilhørende koordinater i et område langs den aktuelle linjen kan betraktes som en ny romlig sampling i én dimensjon (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010). Hvert nytt samplet punkt (Macho, 2017) som vist i figur 34 har hentet standardavvik fra nærmeste nabo fra de røde punktene ved hjelp av en romlig kobling med «NNJoin» (Tveite, 2014). Dette kan betraktes som en romlig interpolasjon basert på nærmeste naboavstand (O'Sullivan & Unwin, 2010) for å estimere usikkerheten i de nye

samplede punktene.

Resultatet av tilretteleggingen av dataene som er beskrevet i dette avsnittet er nye, samlede punkt med 5 centimeter fast avstand langs stien som er fulgt i testområdet. Til sammen tilsvarer dette mellom 70 000 og 80 000 punkt fra hver målesesjon med det IMU/GNSS kombinerte systemet.

4.2.4.2.4 Kontroll og grovfeilsøk

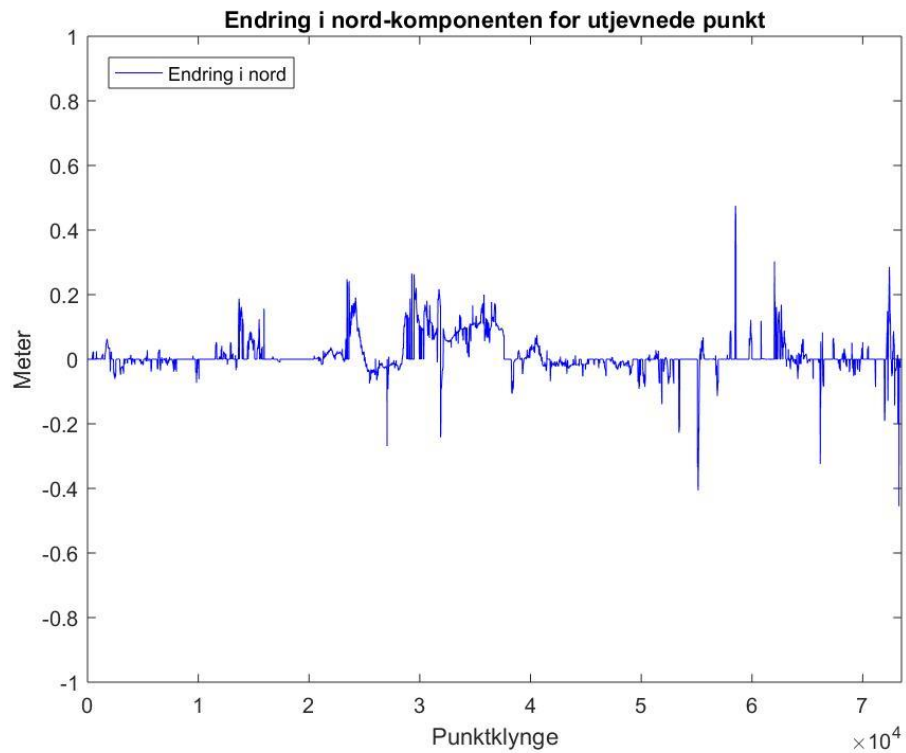
Fra avsnitt 4.2.2 i beskrivelsen av virkemåten til programmet skrevet av Ola Øvstedal, kommer det frem at det for hver iterasjon programmet gjennomfører, gjøres et grovfeilsøk og beregning av teststørrelser som inngår i en multipl T-test for hver observasjon. I den neste, påfølgende iterasjonen utelates de grove feilene dersom teststørrelsen er større enn en gitt t-verdi (Gjevstad, 2018), før en ny utjevning gjennomføres. Grovfeilsøket gjøres derfor allerede i en automatisert, iterativ prosess i programmet. Det ble gjennomført totalt 4 iterasjoner med utjevning og grovfeilsøk der grovfeilen som var mest signifikant ble identifisert og tilhørende observasjon utelatt i hver iterasjon.



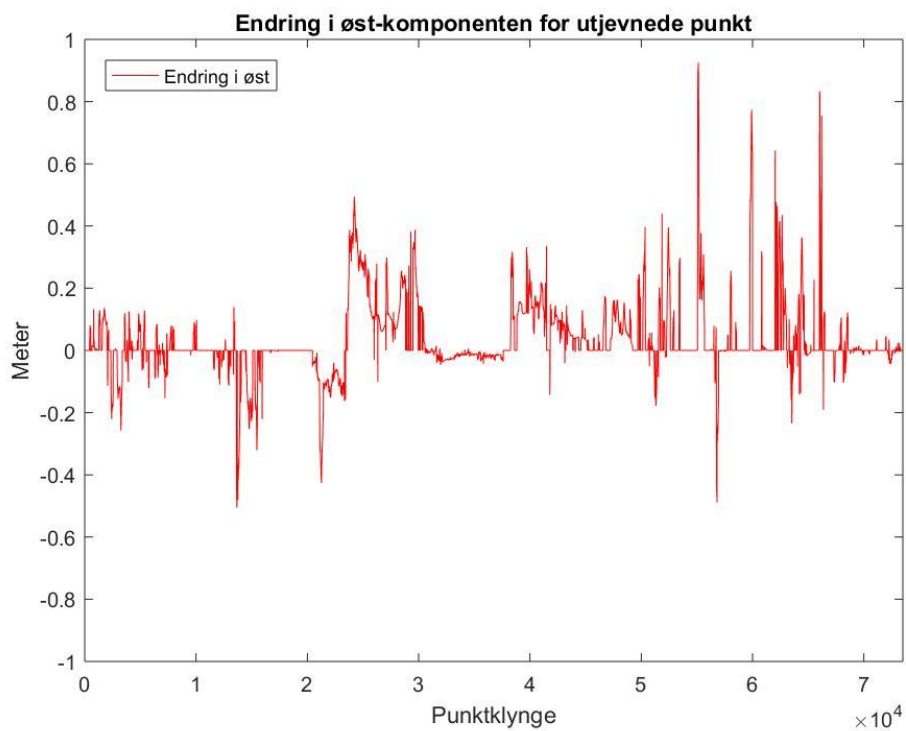
Figur 35: Antall punkt som forkastes per iterasjon.

Figur 35 viser antall punkt som forkastes i hver iterasjon. Det inngikk 6 punktdatasett med totalt 446880 punkt i den nulte iterasjonen. Fra figur 35 er det verdt å merke seg at det forkastes vesentlig færre punkt i iterasjon 4 enn i iterasjon 1, noe som kan føre til at estimatene på koordinatene til punktene etterhvert vil stabilisere seg. Etter 4 iterasjoner ble det forkastet totalt 52145 punkt, som er 11.6% av de opprinnelige punktene som programmet startet med i første iterasjon. I og med at differansen mellom antall punkt som inngår i referanselinjene er størst mellom iterasjon 0 og iterasjon 4, antas det at de største forskjellene vil vise seg mellom referanselinjene fra disse iterasjonene.

Totalt ble det estimert 74478 punkt i 74478 punktklynger som utgjorde referanselinjen i hver iterasjon.

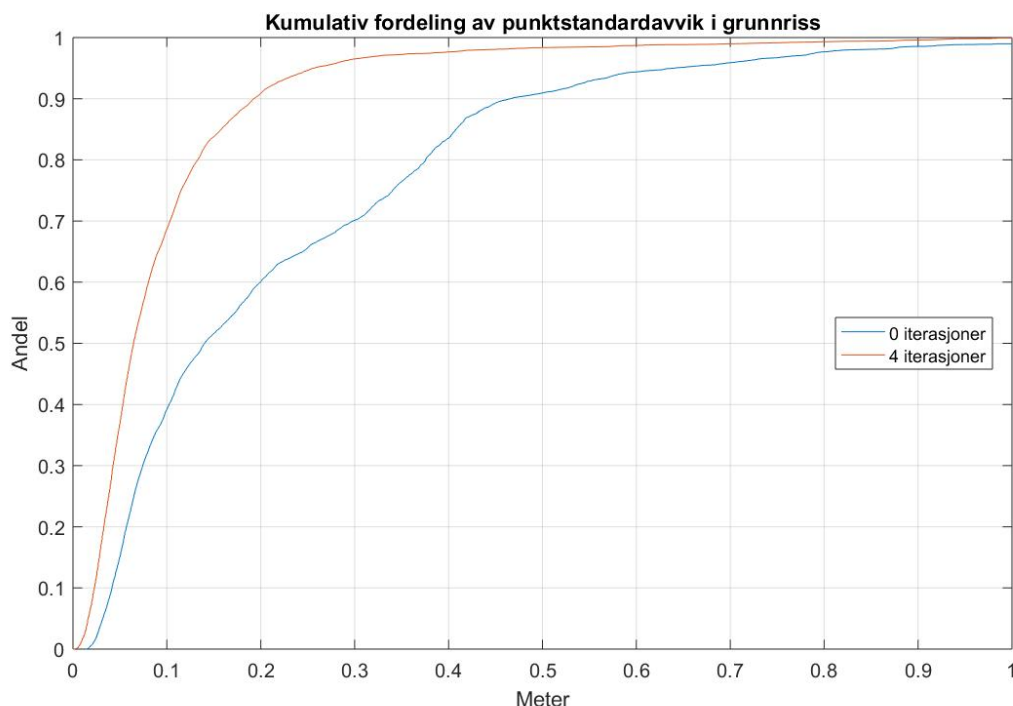


Figur 36: Endring i nord-komponenten for de utjevnete punktene i hver punktklynge mellom nulte og fjerde iterasjon.



Figur 37: Endring i øst-koordinater for de utjevnete punktene i hver punktklynge mellom nulte og fjerde iterasjon.

Figur 36 og figur 37 viser endringene i henholdsvis nord og øst-komponentene i de utjevnete punktene mellom nulte og fjerde iterasjon. Horisontalaksene angir nummeret på punktklyngen og vertikalaksene angir differansene gitt i enheten meter. Figurene kan gi et inntrykk av hvor mye de aktuelle punktene som utgjør referanselinjen har flyttet på seg etter hvert som de grove feilene har blitt forkastet av programmet. Fra figurene kan det se ut til at endringene i øst-komponentene er større enn endringene i nord-komponentene, og at endringene stort sett er i størrelsesorden desimeter, om ikke mindre. Videre er det viktig å merke seg her at endringene som vises i figur 36 og figur 37 viser endringer relativt til hverandre, og sier ikke nødvendigvis noe om den absolutte nøyaktigheten til den estimerte referanselinjen.



Figur 38: Kumulativ fordeling av punktstandardavvik i grunnriss etter nulte og fjerde iterasjon. Blå graf angir nulte iterasjon og rød graf angir fjerde iterasjon.

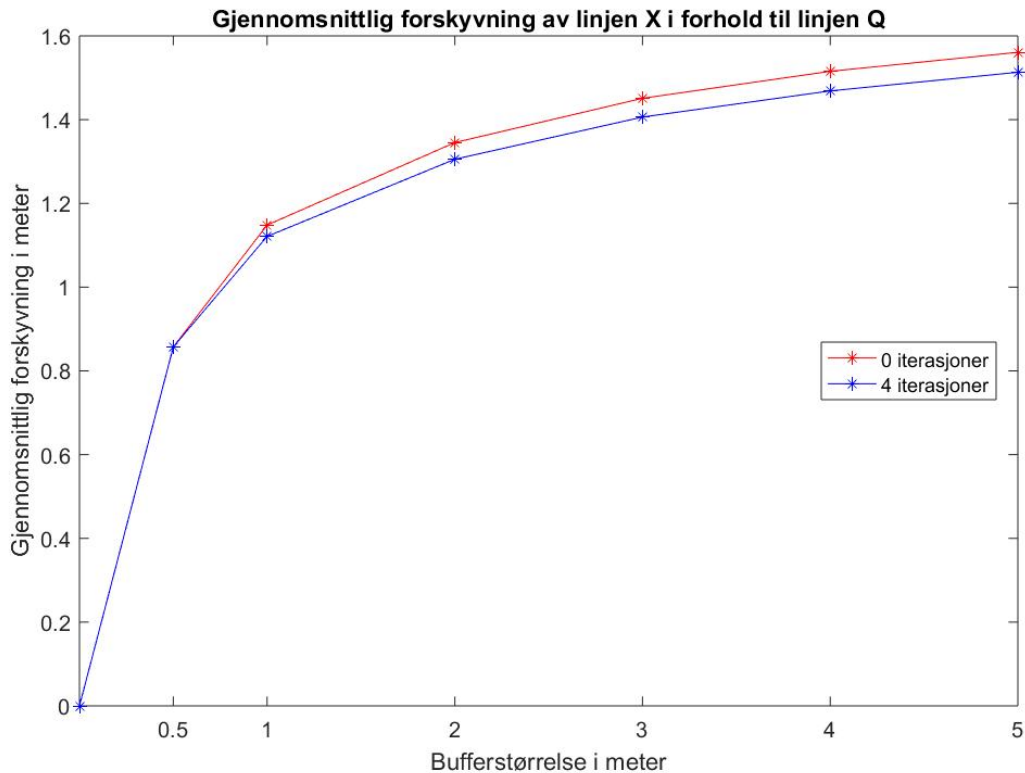
Figur 38 viser den kumulative fordelingen av punktstandardavvik i grunnriss etter nulte og fjerde iterasjon. Det inngår like mange punktklynger og dermed like mange utjevnete punkt i hver iterasjon. Fra figur 38 kan det observeres at det er en vesentlig høyere forekomst av lave standardavvik etter fjerde iterasjon sammenliknet med nulte iterasjon. Den blå grafen representerer nulte iterasjon, og etter denne iterasjonen ligger omtrent 60 prosent av standardavvikene til de estimerte punktene under 0.2 meter. Den røde grafen representerer fjerde iterasjonen, og etter denne iterasjonen ligger omtrent 90 prosent av standardavvikene til de estimerte punktene under 0.2 meter. Det er igjen viktig å påpeke at det er like mange punkt, nærmere bestemt 74478, som er beregnet i nulte iterasjon og i fjerde iterasjon.

I Kaartinen et al., (2015) ble en uavhengig kontroll gjennomført ved hjelp av målinger av referanseobjekter i en punktsky som ble målt av en laserskanner. Disse referanseobjektene bestod av trær som var bestemt ved bruk av totalstasjon og sanntids-kinematisk GPS. Ut i fra avstandsmålinger til disse referanseobjektene i punktskyen ble posisjonen til ATV'en bestemt, og deretter sammenliknet med posisjonene fra det IMU/GNSS-kombinerte systemet (Kaartinen, et al., 2015).

Referansen i denne kontrollen skal hentes fra tur- og friluftsruter, som antas å være et datasett som er uavhengig av de utjevnedde punktene som ble beregnet tidligere. Som beskrevet i avsnitt 4.2.4.2.1 har datasettet med tur- og friluftsruter fra Kartverket en kjent, men en noe varierende grad av kvalitet. Punktstandardavvik som oppgis ligger mellom 30 centimeter og 5 meter. Disse punktstandardavvikene kan for noen områder dermed være dårligere enn det som kan oppnås med en kombinasjon av IMU/GNSS (Kaartinen, et al., 2015) (Han, Wang, Wang, & Tan, 2015). Kontrollen som gjennomføres i dette avsnittet tar dermed sikte på å sammenlikne resultatene fra utjevningsprogrammet med et kvalitetssikret datasett fra Kartverket, og kvalitetsmålene for de ulike metodene beregnes derfor relativt til dette datasettet. Det er også viktig å påpeke at de aktuelle metodene gir kvalitetsmål på referanselinjen som helhet (Tveite & Langaas, 1999).

Fremgangsmåten for kontrollen baserer seg både på BOS-metoden med linjer, og nærmeste nabo med punkt som beskrevet i avsnitt 4.2.2. Kvalitetsmål fra BOS-metoden gis i form av en gjennomsnittlig forskyvning, og med nærmeste nabo gis kvalitetsmål som standardavvik (Tveite & Langaas, 1999).

BOS-metoden utføres i praksis ved hjelp av innebygd funksjonalitet i programvaren QGIS i henhold til metoden beskrevet i avsnitt 4.2.2 og formel (4.2.1) fra avsnitt 4.2.2. Linjen fra datasettet tur- og friluftsruter brukes som en linje Q av kjent kvalitet, imens linjen X fra de utjevnedde punktene brukes som en linje av ukjent kvalitet. Det velges 6 bufferstørrelser: 0.5, 1, 2, 3, 4 og 5. Bufferstørrelsene er basert på de oppgitte kvalitetsmålene i datasettet tur- og friluftsruter (Tveite & Langaas, 1999). Alle tall er gitt i meter. Det henvises til appendiks B for en mer detaljert beskrivelse av fremgangsmåten med BOS-metoden (Tveite & Langaas, 1999) i programvaren QGIS 2.18.3.



Figur 39: Gjennomsnittlig forskyvning av linjen X dannet med de utjevnete punktene, fra linjen Q hentet fra datasettet tur- og friluftsruter. Rød graf angir linjen med de utjevnete punktene etter null iterasjoner, og blå graf angir linjen med punktene etter fjerde iterasjon.

Figur 39 viser resultatene ved bruk av BOS-metoden for de aktuelle linjene. Den røde grafen representerer den gjennomsnittlige forskyvningen av linjen X dannet med de utjevnete punktene beregnet i nulte iterasjon, fra linjen Q hentet fra datasettet tur- og friluftsruter. Den blå grafen representerer det samme, bare at de utjevnete punktene er beregnet etter fjerde iterasjon. Fra figuren kan det observeres at både den røde og den blå grafen ser ut til å flate ut ved en gjennomsnittlig forskyvning på omtrent 1.5 meter. Dette kan gi et estimat på den gjennomsnittlige forskyvningen av linjene dannet med de utjevnete punktene, fra linjen hentet fra tur- og friluftsruter (Tveite & Langaas, 1999). Fra figur 39 er det også verdt å merke seg at estimatet på den gjennomsnittlige forskyvningen ikke er særlig forskjellig mellom de to iterasjonene. Forskjellen ligger på omtrent 5 centimeter, som i denne sammenhengen er av liten betydning.

For å finne nærmeste nabo fra de utjevnedde punktene til nodene i datasettet tur- og friluftsruter benyttes «NNJoin» (Tveite, 2014). De beregnede, utjevnedde punktene brukes som «input vector layer», imens nodene fra datasettet tur- og friluftsruter brukes som «join layer». Det henvises til appendiks A for en nærmere beskrivelse av en romlig kobling basert på nærmeste nabo ved bruk av «NNJoin» (Tveite, 2014) i programvaren QGIS 2.18.3. Den koblede tabellen eksporteres som en CSV-fil og importeres i MATLAB for videre beregninger av kvalitetsmål.

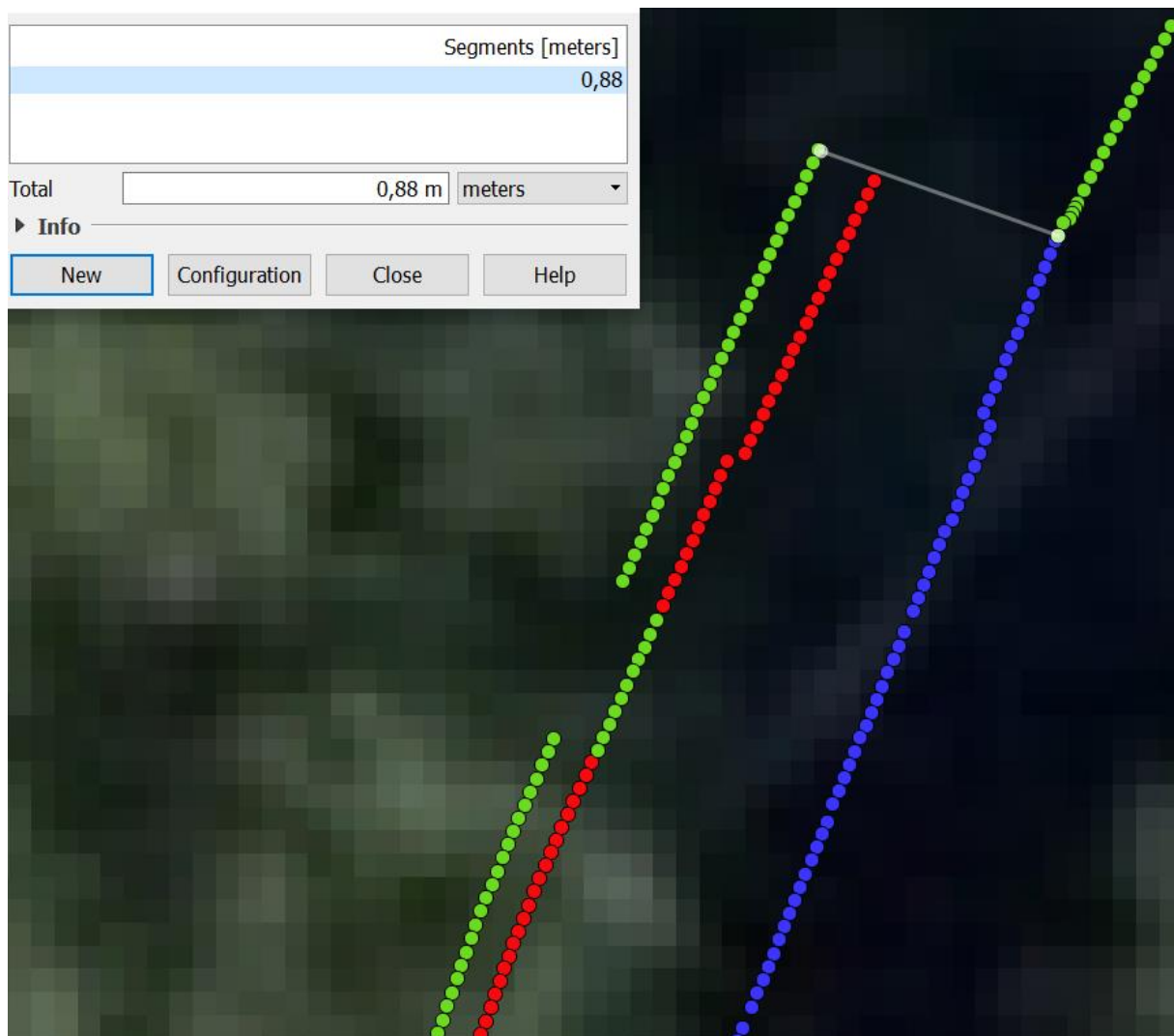
For beregning av kvalitetsmål i form av standardavvik brukes formel (1.1) fra avsnitt 2.1, der ε angir de sanne enkeltavvikene mellom de utjevnedde punktene som utgjør referanselinjen og de korresponderende nodene på tur- og friluftsruter basert på nærmeste naboavstand, n angir antall enkeltavvik og s_f angir usikkerheten i nodene gitt som standardavvik. Som tidligere nevnt varierer den oppgitte usikkerheten på nodene i tur- og friluftsruter i form av punktstandardavvik i grunnriss i tur- og friluftsruter (Kartverket A., 2017) fra 30 centimeter til 5 meter. Det antas derfor en usikkerhet i form av standardavvik på 2 meter i både nord- og østkomponentene på nodene i tur- og friluftsruter. I og med at stien har en bredde og ikke nødvendigvis er en godt definert linje, tas sentreringsusikkerheten også i betraktning i henhold til metoden beskrevet i avsnitt 4.2.2.

Iterasjon	sN	sE	sP
1	2.099	1.359	2.501
5	2.088	1.333	2.477

Tabell 12: Beregnede standardavvik for de utjevnedde punktene basert på nærmeste nabo til punktene i tur- og friluftsruter. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. Enhet er meter.

Tabell 12 viser resultatene i form av standardavvik i henholdsvis nord, øst og grunnriss. Fra tabellen fremgår det at det beregnede punktstandardavviket i grunnriss for begge iterasjonene ligger på omtrent 2.5 meter, og at forskjellen i standardavvikene mellom antall iterasjoner er i størrelsesorden centimeter. Det er igjen viktig å poengtere at de beregnede standardavvikene i tabell 12 og den gjennomsnittlige forskyvningen fra figur 39 er beregnet for den utjevnedde referanselinjen i forhold til datasettet tur- og friluftsruter (Tveite & Langaas, 1999). Dette datasettet kan ikke nødvendigvis antas å være feilfritt eller alltid signifikant bedre enn den utjevnedde referanselinjen, og den påfølgende kontrollen blir derfor ikke særlig skarp. Fortsatt kan datasettet tur- og friluftsruter antas å være kvalitetssikret av Kartverket og uavhengig av den beregnede referanselinjen, slik at en eventuell stor grov feil i den absolutte plasseringen av den beregnede referanselinjen som helhet kunne ha blitt avdekket.

For å undersøke og kontrollere resultatene fra utjevningen videre, gjøres en visuell inspeksjon av de utjevnedde punktene ved bruk av ortofoto som bakgrunn.

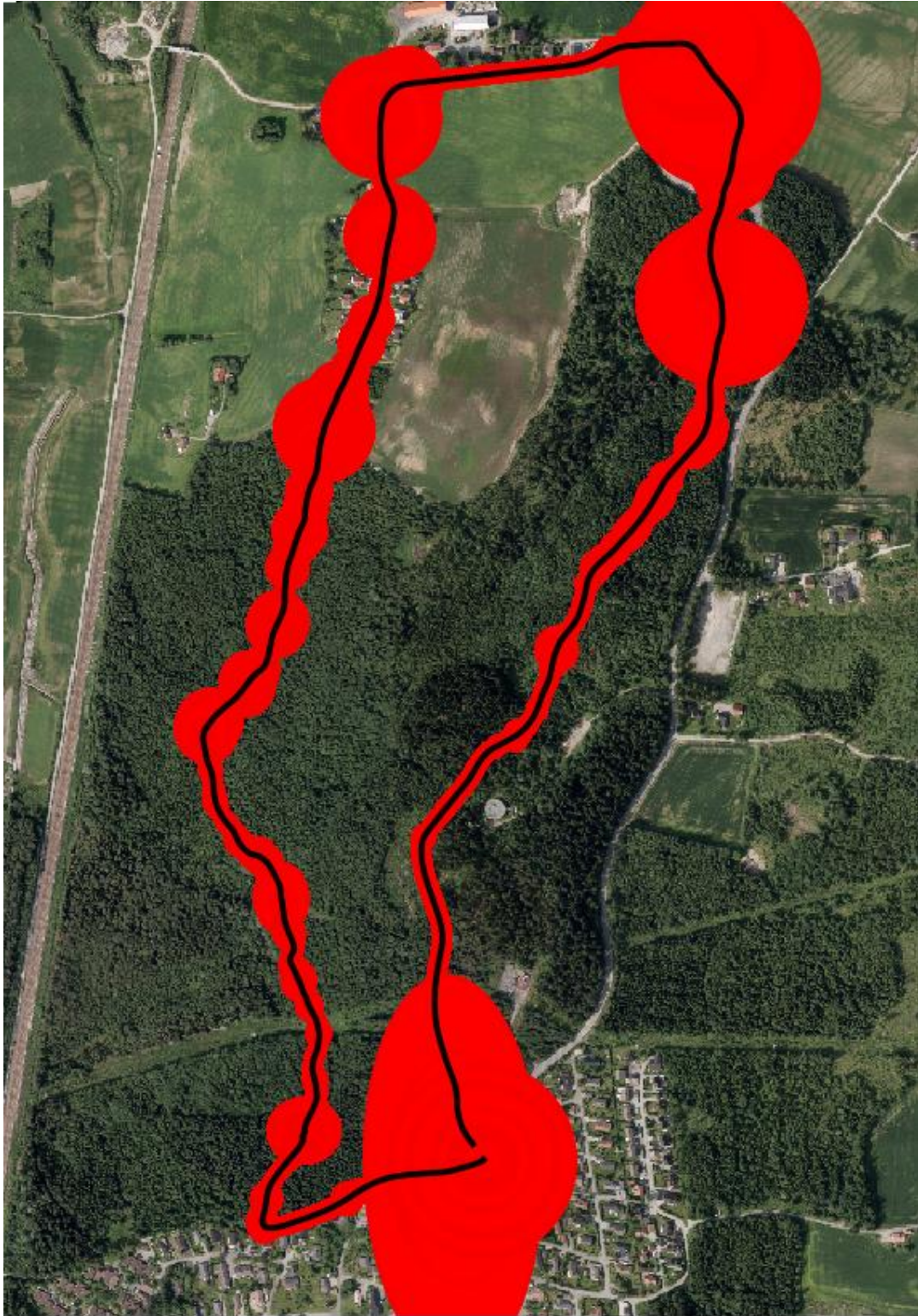


Figur 40: Eksempel på at resultatet endrer seg ut i fra antall iterasjoner programmet har gjennomført. Grønne punkt er beregnet etter 4 iterasjoner, røde punkt er beregnet etter 1 iterasjon og blå punkt er beregnet etter 0 iterasjoner. Den hvite linjen angir linjesegmentet som er målt i det grafiske brukergrensesnittet.

Figur 40 viser de resulterende punktene fra ulike antall av iterasjoner med utjevningsprogrammet. De grønne punktene skal representere referanselinjen er beregnet etter 4 iterasjoner med programmet, og ser ut til å følge en mer diskontinuerlig linje enn de blå punktene som er beregnet etter 0 iterasjoner. Ut i fra målinger i ortofoto som ligger i bakgrunnen ved hjelp av måleverktøyet «Measure Line» (QGIS A., 2018), har de grønne punktene flyttet seg omtrent 0.88 meter fra linjen som opprinnelig ble fulgt. Sannsynligvis er dette forårsaket av forkastning av en detektert grov feil i påfølgende iterasjon. Stort sett ville man forvente at stien følger en mer kontinuerlig linje uten store sprang, noe som også bør tas i betraktning i valget av den endelige referanselinjen.

4.2.4.2.5 Utjevning og endelig referanse

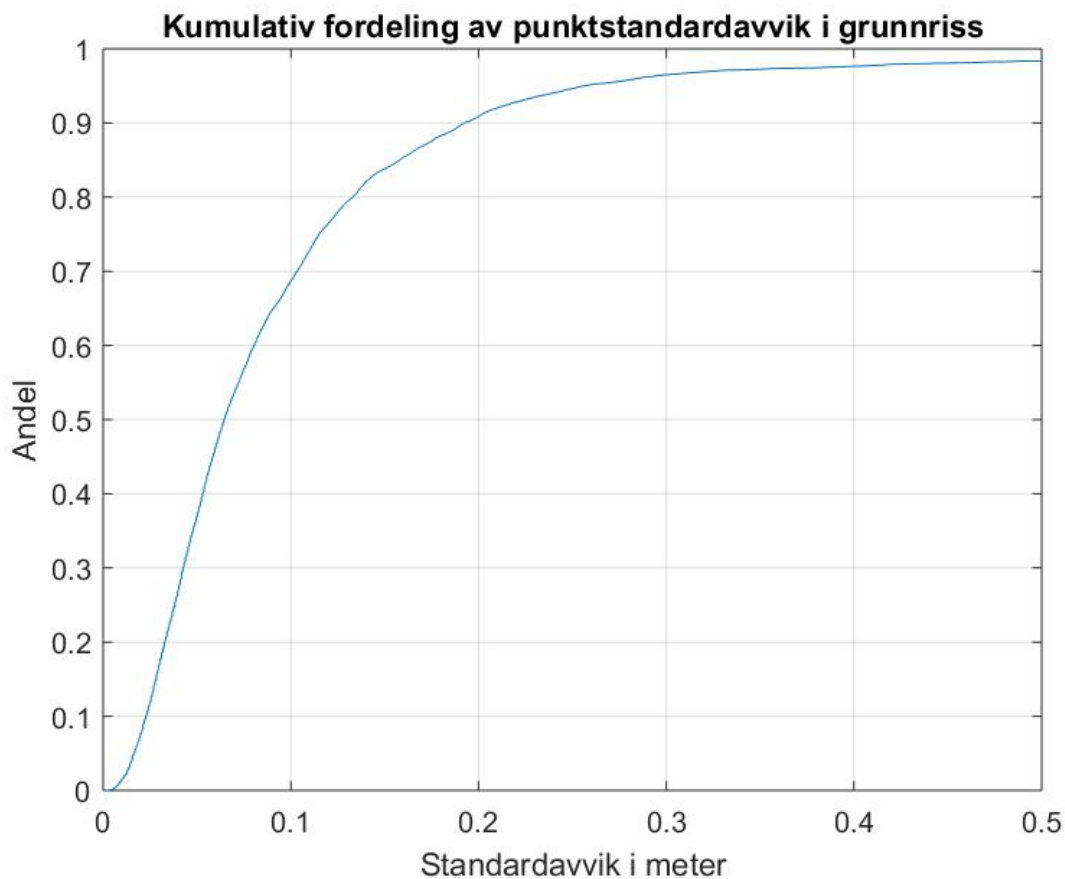
Fra figur 36 og figur 37 kan det observeres at mange av de utjevnete punktene i hver punktklynge har endret koordinater mellom nulte og fjerde iterasjon. Det er nærliggende å anta at dette er en konsekvens av forkastningene av grove feil som finner sted i hver iterasjon for hver punktklynge, som vist i figur 35. Fra figur 38 kan det videre se ut til at det er en høyere forekomst av lave standardavvik for de utjevnete punktene etter fjerde iterasjon kontra etter nulte iterasjon. Dette kan bety at de utjevnete punktene etter fjerde iterasjon jevnt over må ha et lavere standardavvik, og dermed en antatt lavere usikkerhet, enn de utjevnete punktene etter nulte iterasjon. Dersom standardavviket er det eneste kvalitetsmålet som skal ligge til grunn for valget av referanselinjen som skal brukes videre, ville det ha vært naturlig å velge den siste referanselinjen etter fjerde iterasjon. Etter en visuell inspeksjon av referanselinjene som vist i figur 40 og konsultasjon med min veileder Ola Øvstedal, velges det derimot å benytte de utjevnete punktene fra tredje iterasjon som referanselinje. Dette valget var i hovedsak begrunnet med at etter tre iterasjoner har grovfeilsøket forkastet nok punkt som kan kategoriseres som grove feil, men ikke så mange at referanselinjen viser for høy grad av diskontinuitet. Dersom det hadde vært mulig med beregning av ytre pålitelighet på hvert av de utjevnete punktene kunne dette ha vært et godt kvalitetsmål å velge den mest pålitelige referanselinjen, i og med at den ytre påliteligheten vil si noe om hvor stor skade en skjult grovfeil kan gjøre på koordinatene til punktene (Gjevestad, 2018).



Figur 41: Visualisering av den valgte referanselinjen og den tilhørende usikkerheten. Den svarte linjen angir referanselinjen dannet av de utjevnedde punktene fra tredje iterasjon, og de røde områdene rundt angir usikkerheten til punktene langs linjen. Størrelsene på de røde områdene er skalert, og gir dermed ikke absolutte mål på den beregnede usikkerheten.

I figur 41 visualiseres den valgte referanselinjen med tilhørende usikkerhet. Figuren er laget ved hjelp av QGIS-plugin «Vector field renderer» som inneholder funksjoner for å tegne vektorfelt i punktdatasett (Crook, 2016). I denne sammenheng er det benyttet en funksjon

for å gjengi feilellipser på punktene (Crook, 2016) langs referanselinjen, der feilellipsenes akser er spesifisert til å være lik de beregnede standardavvikene i nord og øst-komponentene. Det er viktig å påpeke her at de tegnede feilellipsene rundt punktene er skalert av visuelle årsaker, og følgelig ikke gjengir de absolutte verdiene i den beregnede usikkerheten for referanselinjen. Videre er det verdt å merke seg de forholdsvis store feilellipsene i de øvre hjørnene og hjørnet nederst til høyre. De store feilellipsene var sannsynligvis forårsaket både av stor spredning av punktdatasettene som ligger til grunn for beregningene, og fordi programmet på slutten av linjen fant nærmeste nabopunkt fra starten av linjen.



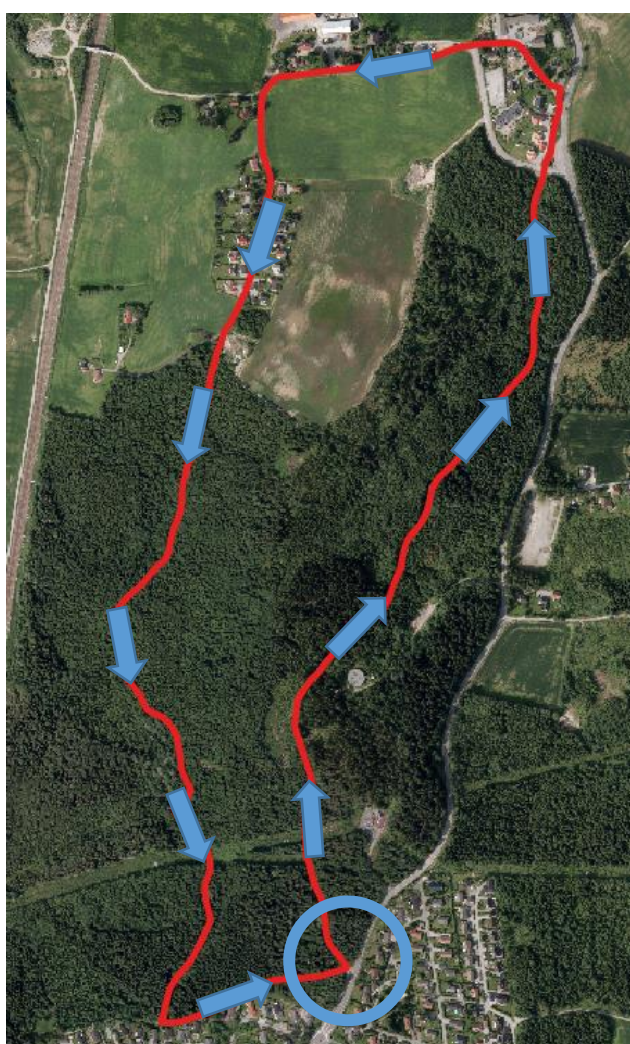
Figur 42: Kumulativ fordeling av punktstandardavvik i grunnriss for de utjevnede punktene som utgjør den valgte referanselinjen. Horisontalaksen angir meter og vertikalaksen angir andel av totalt antall punkt.

Figur 42 viser den kumulative fordelingen av alle punktstandardavvikene i grunnriss for den valgte referanselinjen. Fra grafen kan det observeres at i overkant av 90 prosent av punktene som referanselinjen består av har et punktstandardavvik i grunnriss lik eller under en verdi på 0.2 meter. Dette kan gi et helhetlig inntrykk av posisjonsnøyaktigheten på den valgte referanselinjen som visualiseres i figur 41.

4.2.4.3 Testobjekter

4.2.4.3.1 Rutiner for datainnsamling

Den kinematiske datainnsamlingen med testobjektene tok sted langs den oppmerkede kulturminnestien i Holstad i Askjumskogen. En målesesjon med kinematisk datainnsamling startet fra tidspunktet testobjektene begynte å logge punktobservasjoner, fram til tidspunktet loggingen av punktobservasjoner ble slått av. Hver målesesjon startet og sluttet på samme sted.



Figur 43: Rød linje viser stien i testområdet for den kinematiske datainnsamlingen. Blå ring angir start- og slutt punkt for hver målesesjon, og blå piler angir retningen langs stien som ble fulgt i den kinematiske datainnsamlingen.

Figur 43 illustrerer start- og slutt punkt for hver målesesjon med kinematisk datainnsamling, samt retningen som ble fulgt langs stien i den kinematiske datainnsamlingen.

For å sikre konsistens i datagrunnlaget ble det fulgt et sett med rutiner før og under hver målesesjon i datainnsamlingen.

Før:

- Testobjektene ble slått på 10-15 minutter utendørs før hver målesesjon kunne begynne. Dette ble gjort for å sikre at testobjektene får lastet ned de kringkastede bane- og klokke-dataene fra satellittene, som i teorien skal ta 12.5 minutter (Seeber, 2003).
- Testobjektet Fenix 5X ble innstilt på bruk av enten kun GPS-konstellasjonen eller GPS+GLONASS, avhengig av hva som var bestemt på forhånd.
- Testobjektene ble festet på venstre arm. Dette ble gjort for at måleforholdene til hvert av testobjektene skulle være så like som mulig.
- Dersom det var effekten av sampling-rate på posisjonsnøyaktigheten som skulle undersøkes, ble det brukt to testobjekter av typen Fenix 5X. Begge testobjektene stilles inn på bruk av kun GPS-konstellasjonen. Videre stilles ett av testobjektene inn på bruk av smart recording, og et annet stilles inn med en sampling-rate på 1 sekund.

Under:

- Hver målesesjon ble satt i gang samtidig så langt det var mulig.
- Det ble etterstrebet å følge senterlinjen på stien/veien, og holde jevnest mulig hastighet under datainnsamlingen. Dette ble gjort for at dataene fra testobjektene skulle refereres til samme linje som referansen, og dermed redusere sentreringsusikkerheten i hver målesesjon mest mulig.

Den kinematiske datainnsamlingen tok sted på ulike tidspunkt i perioden august 2017 til og med april 2018. I henhold til forsøksdesignen i kapittel 3 ble det gjennomført mange sesjoner med kinematisk datainnsamling over lengre tid for å kunne få gode, representative kvalitetsmål på posisjonsnøyaktigheten i de aktuelle testobjektene.

4.2.4.3.2 Prosessering av data fra testobjekter

Etter at den aktuelle målesesjonen for testobjektene er avsluttet, gjennomføres en tilsvarende prosedyre som fastsatt i avsnitt 4.1.4.3.2 for å overføre dataene og transformere punktobservasjonene til UTM-koordinater i sone 32N gitt i EUREF89 (TerraTec AS).

Resultatet av denne prosedyren er en tekstfil med punktobservasjoner som kan importeres i programvaren QGIS 2.18 (QGIS B., 2018). Videre gjennomføres en tilsvarende prosedyre som fastsatt i avsnitt 4.2.4.2.3 for å danne en linje av dataene fra testobjektene (Kapusta, 2015), for deretter å sample nye punkt for hver femte centimeter langs denne linjen (Macho, 2017). Det henvises til appendiks C for en nærmere beskrivelse av sampling av nye punkt langs en linje (Kapusta, 2015) (Macho, 2017).

I henhold til metoden beskrevet i avsnitt 4.2.2 kunne posisjonsnøyaktigheten for en linje beregnes ved å koble samplede punkt langs denne linjen med nærmeste nabo i en referanselinje (Tveite & Langaas, 1999). Det henvises til appendiks A for en mer detaljert beskrivelse av romlig kobling ved bruk av «NNJoin» (Tveite, 2014). Resultatet av den romlige koblingen mellom de samplede punktene fra testobjektene og punktene langs referanselinjen, blir en tabell med kolonner som inneholder koordinatene til punktene fra testobjektene og koordinatene til det nærmeste nabopunktet på referanselinjen (Tveite, 2014). Den nye tabellen eksporteres fra QGIS som en CSV-fil som vist i punkt 4 i appendiks A og appendiks C. CSV-filen importeres i programvaren MATLAB ved bruk av funksjonen «csvread», som kan lese numeriske verdier fra komma-separerte filer inn i en matrise (MathWorks C., 2018). I MATLAB skrives det et enkelt program som henter ut de aktuelle koordinatene og beregner de søkte kvalitetsmålene basert på sanne enkeltavvik. De sanne enkeltavvikene beregnes ved å finne differansen mellom de nye samplede punktene fra testobjektene, og de korresponderende punktene på referanselinjen basert på nærmeste nabo (Tveite & Langaas, 1999), i henhold til metoden beskrevet i avsnitt 4.2.2.

5 Resultater

5.1 Sammenlikning av modeller

5.1.1 Statisk posisjonsnøyaktighet

Testområde	Testobjekt	sN	sE	sP	aN	aE	aP
SOYLE	Fenix 5X kun GPS	2.55	1.42	2.92	-0.01	0.13	0.13
SOYLE	Forerunner 310XT	2.92	1.55	3.31	0.53	0.53	0.75
FOUGNER	Fenix 5X kun GPS	6.57	3.24	7.32	-0.06	-0.04	0.07
FOUGNER	Forerunner 310XT	8.27	4.46	9.39	3.57	-1.80	4.00

Tabell 13: Sammenlikning av de forventede statistiske posisjonsnøyaktighetene for de ulike modellene i form av standardavvik og systematisk avvik ved de ulike statistiske testområdene. Enhet er meter.

5.1.2 Paret T-test

Målesesjon	μ_1 (Forerunner)	μ_2 (Fenix kun GPS)	D
1	0.74	0.72	0.02
2	2.52	1.66	0.86
3	2.77	1.94	0.83
4	1.21	3.16	-1.95
5	1.53	1.96	-0.43
6	2.11	0.40	1.71
7	1.71	2.98	-1.27
8	4.02	5.61	-1.59
9	6.48	3.97	2.51
10	4.58	2.33	2.25
11	8.97	7.93	1.04
12	9.20	5.64	3.56
13	11.51	4.80	6.71
14	4.67	4.82	-0.15
15	6.42	8.04	-1.62
16	8.28	5.40	2.88
17	10.18	6.60	3.58
18	3.89	4.15	-0.26
19	5.69	10.26	-4.57
20	8.07	5.48	2.59

Tabell 14: Gjennomsnittlige posisjonsfeil i grunnriss μ mellom punktobservasjonene og fasiten, beregnet for hver målesesjon for hver av modellene Forerunner 310XT og Fenix 5X kun GPS. Enhet er meter.

Nullhypotese: $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Alternativ hypotese: $H_1: \mu_1 > \mu_2$

Gjennomsnittlig differanse: $\bar{D} = 0.84$

Standardavvik på differanser: $S_D = 2.51$

Antall differanser: $n = 20$

Beregnet testobservator: $T = 1.497$

Tabellverdi: $T_{0.05,19} = 1.729$

Nullhypotesen kan ikke forkastes ved 5% signifikansnivå.

5.1.3 Pitman's T

5.1.3.1 Nord-komponent

Målesesjon	Fenix 5X kun GPS (1)	Forerunner 310XT (2)
1	0.11	-0.31
2	-1.68	-0.79
3	-1.89	0.06
4	-2.73	0.16
5	-0.78	-1.60
6	0.33	1.06
7	-1.46	1.45
8	5.46	4.21
9	3.84	7.11
10	-1.30	-4.59
11	3.29	7.89
12	-14.40	3.64
13	-6.51	6.20
14	-4.21	-4.87
15	11.44	-2.58
16	0.50	13.18
17	-4.97	20.52
18	2.67	-1.28
19	16.15	5.21
20	-4.19	-1.58

Tabell 15: Enkeltavvik nummer 300 i nord-komponenten i hver målesesjon for hver av modellene Fenix 5X kun GPS og Forerunner 310XT. Enhet er meter.

Nullhypotese: $H_0: S_1^2 = S_2^2$

Alternativ hypotese: $H_1: S_2^2 > S_1^2$

Varians Fenix 5X kun GPS: $S_1^2 = 41.19$

Varians Forerunner 310XT: $S_2^2 = 38.18$

F-verdi: $F = 1.08$

Korrelasjonskoeffisient r: $r = -0.04$

Testobservator t: $t = 0.16$

Tabellverdi: $t_{0.05,18} = 1.734$

Nullhypotesen kan ikke forkastes ved 5% signifikansnivå.

5.1.3.2 Øst-komponent

Målesesjon	Fenix 5X kun GPS (1)	Forerunner 310XT (2)
1	-0.52	0.58
2	1.10	1.76
3	-0.31	-2.40
4	1.12	0.10
5	1.92	0.61
6	-0.42	1.98
7	-2.43	0.29
8	1.25	0.01
9	-1.30	0.42
10	2.28	1.81
11	-8.02	-2.19
12	1.48	2.16
13	-1.40	-5.80
14	-0.01	4.93
15	1.59	-3.37
16	4.79	-0.77
17	-1.61	3.06
18	-0.44	-3.98
19	0.66	-1.92
20	3.95	-0.44

Tabell 16: Enkeltavvik nummer 300 i øst-komponenten i hver målesesjon for hver av modellene Fenix 5X kun GPS og Forerunner 310XT. Enhet er meter.

Nullhypotese: $H_0: S_1^2 = S_2^2$

Alternativ hypotese: $H_1: S_2^2 > S_1^2$

Varians Fenix 5X kun GPS: $S_1^2 = 7.01$

Varians Forerunner 310XT: $S_2^2 = 6.58$

F-verdi: $F = 1.07$

Korrelasjonskoeffisient r: $r = 0.15$

Testobservator t: $t = 0.15$

Tabellverdi: $t_{0.05,18} = 1.734$

Nullhypotesen kan ikke forkastes ved 5% signifikansnivå.

5.2 Bidrag fra GLONASS i Fenix 5X

5.2.1 Statisk posisjonsnøyaktighet

Testområde	Testobjekt	sN	sE	sP	aN	aE	aP
SOYLE	Fenix 5X kun GPS	2.55	1.42	2.92	-0.01	0.13	0.13
SOYLE	Fenix 5X GPS+GLONASS	1.80	1.08	2.10	-0.64	0.78	1.01
FOUGNER	Fenix 5X kun GPS	6.57	3.24	7.32	-0.06	-0.04	0.07
FOUGNER	Fenix 5X GPS+GLONASS	3.64	2.45	4.39	-0.18	0.10	0.21

Tabell 17: Sammenlikning av de forventede statistiske posisjonsnøyaktighetene for Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS i form av standardavvik og systematisk avvik ved de ulike statistiske testområdene. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir punktstandardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk avvik i grunnriss. Enhet er meter.

5.2.2 Paret T-test

Målesesjon	μ_1 (kun GPS)	μ_2 (GPS+GLONASS)	D
1	0.72	2.24	-1.52
2	1.66	2.01	-0.35
3	1.94	2.63	-0.69
4	3.16	1.73	1.43
5	1.96	1.12	0.84
6	0.40	2.48	-2.08
7	2.98	1.38	1.60
8	5.61	2.75	2.86
9	3.97	2.08	1.89
10	2.33	1.67	0.66
11	7.93	4.91	3.02
12	5.64	3.90	1.74
13	4.80	6.99	-2.19
14	4.82	2.71	2.11
15	8.04	4.31	3.73
16	5.40	1.82	3.58
17	6.60	2.67	3.93
18	4.15	1.80	2.35
19	10.26	4.48	5.78
20	5.48	3.35	2.13

Tabell 18: Gjennomsnittlige posisjonsfeil i grunnriss μ mellom punktobservasjonene og fasiten, beregnet for hver målesesjon for Fenix 5X kun GPS(1) og Fenix 5X GPS+GLONASS(2). Enhet er meter.

Nullhypotese: $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Alternativ hypotese $H_1: \mu_1 > \mu_2$

Gjennomsnittlig differanse: $\bar{D} = 1.54$

Standardavvik på differanser: $S_D = 2.11$

Antall differanser: $n = 20$

Beregnet testobservator: $T = 3.264$

Tabellverdi: $T_{0.05,19} = 1.729$

Nullhypotesen kan forkastes ved 5% signifikansnivå.

5.2.3 Pitman's T

5.2.3.1 Nord-komponent

Målesesjon	Fenix 5X kun GPS (1)	Fenix 5X GPS+GLONASS (2)
1	0.11	-1.78
2	-1.68	-1.60
3	-1.89	-2.72
4	-2.73	-1.25
5	-0.78	0.33
6	0.33	-2.34
7	-1.46	-1.17
8	5.46	2.69
9	3.84	1.79
10	-1.30	-0.46
11	3.29	7.05
12	-14.40	-0.23
13	-6.51	-3.83
14	-4.21	-0.21
15	11.44	1.18
16	0.50	-1.60
17	-4.97	-3.20
18	2.67	1.28
19	16.15	1.45
20	-4.19	-0.27

Tabell 19: Enkeltavvik nummer 300 i nord-komponenten i hver målesesjon for Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS. Enhet er meter.

Nullhypotese:	$H_0: S_1^2 = S_2^2$
Alternativ hypotese:	$H_1: S_1^2 > S_2^2$
Varians Fenix 5X kun GPS:	$S_1^2 = 41.19$
Varians Fenix 5X GPS+GLONASS:	$S_2^2 = 5.98$
F-verdi:	$F = 6.87$
Korrelasjonskoeffisient r:	$r = 0.48$
Testobservator t:	$t = 5.42$
Tabellverdi:	$t_{0.05,18} = 1.734$

Nullhypotesen kan forkastes ved 5% signifikansnivå.

5.2.3.2 Øst-komponent

Målesesjon	Fenix 5X kun GPS (1)	Fenix 5X GPS+GLONASS (2)
1	-0.52	0.82
2	1.10	1.51
3	-0.31	-0.02
4	1.12	1.55
5	1.92	0.38
6	-0.42	0.06
7	-2.43	0.50
8	1.25	0.76
9	-1.30	1.40
10	2.28	1.87
11	-8.02	-3.37
12	1.48	-1.77
13	-1.40	0.94
14	-0.01	0.89
15	1.59	-3.17
16	4.79	0.69
17	-1.61	0.69
18	-0.44	-0.42
19	0.66	0.02
20	3.95	2.21

Tabell 20: Enkeltavvik nummer 300 i øst-komponenten i hver målesesjon for Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS. Enhet er meter.

Nullhypotese: $H_0: S_1^2 = S_2^2$

Alternativ hypotese: $H_1: S_1^2 > S_1^2$

Varians Fenix 5X kun GPS: $S_1^2 = 7.01$

Varians Fenix 5X GPS+GLONASS: $S_2^2 = 2.25$

F-verdi: $F = 3.12$

Korrelasjonskoeffisient r: $r = 0.45$

Testobservator t: $t = 2.85$

Tabellverdi: $t_{0.05,18} = 1.734$

Nullhypotesen kan forkastes ved 5% signifikansnivå.

5.3 Sammenlikning av sampling-rate

5.3.1 Kinematisk posisjonsnøyaktighet

Testobjekt	sN	sE	sP	aN	aE	aP
Fenix 5X kun GPS 1 sekund rate	2.6	3.7	4.5	-0.1	-0.1	0.1
Fenix 5X kun GPS smart recording	2.8	4.3	5.1	-0.2	0.7	0.7

Tabell 21: Sammenlikning av de forventede kinematiske posisjonsnøyaktighetene for Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate og Fenix 5X kun GPS – smart recording i form av standardavvik og systematisk avvik. Det er viktig å poengtere her at estimatene på posisjonsnøyaktighetene i Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate er basert på målesesjonene fra de samme datoene som Fenix 5X kun GPS – smart recording. Enhet er meter.

5.3.2 Paret T-test

Dato	μ_1 vektet (smart recording)	μ_2 vektet (1 sekund)	Differanse
17.03.18	2.4	3.3	-0.9
18.03.18	2.9	2.6	0.3
19.03.18	1.7	2.1	-0.4
25.03.18	4.1	5.2	-1.1
02.04.18	2.5	2.8	-0.3
06.04.18	4.9	3.9	1.0
09.04.18	5.5	4.1	1.5
15.04.18	6.5	4.1	2.4

Tabell 22: Vektete, gjennomsnittlige posisjonsfeil i grunnriss μ_{vektet} mellom punktobservasjonene og fasiten, beregnet for hver målesesjon for Fenix 5X kun GPS – smart recording og Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate. Enhet er meter.

Nullhypotese: $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Alternativ hypotese: $H_1: \mu_1 > \mu_2$

Gjennomsnittlig differanse: $\bar{D} = 0.3$

Standardavvik på differanser: $S_D = 1.2$

Antall differanser: $n = 8$

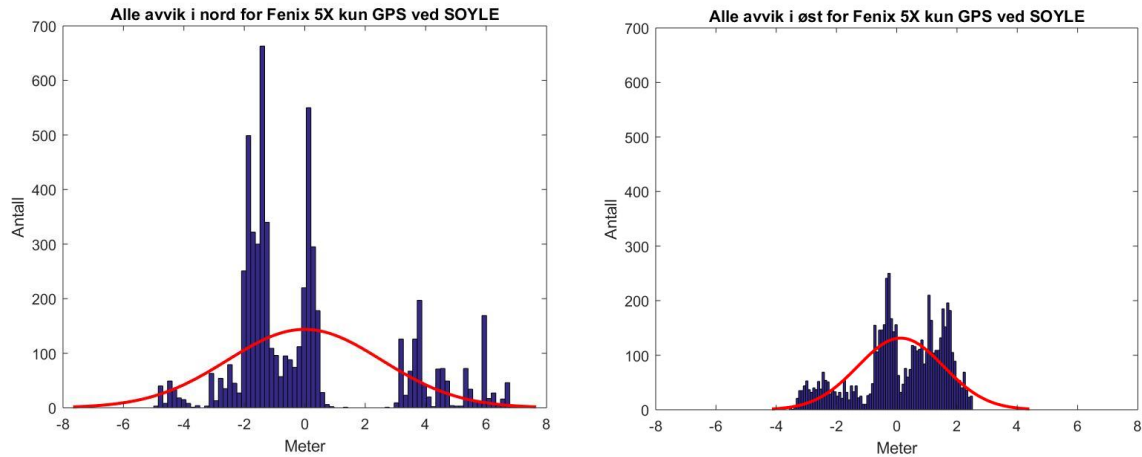
Beregnet testobservator: $T = 0.701$

Tabellverdi: $T_{0.05,7} = 1.895$

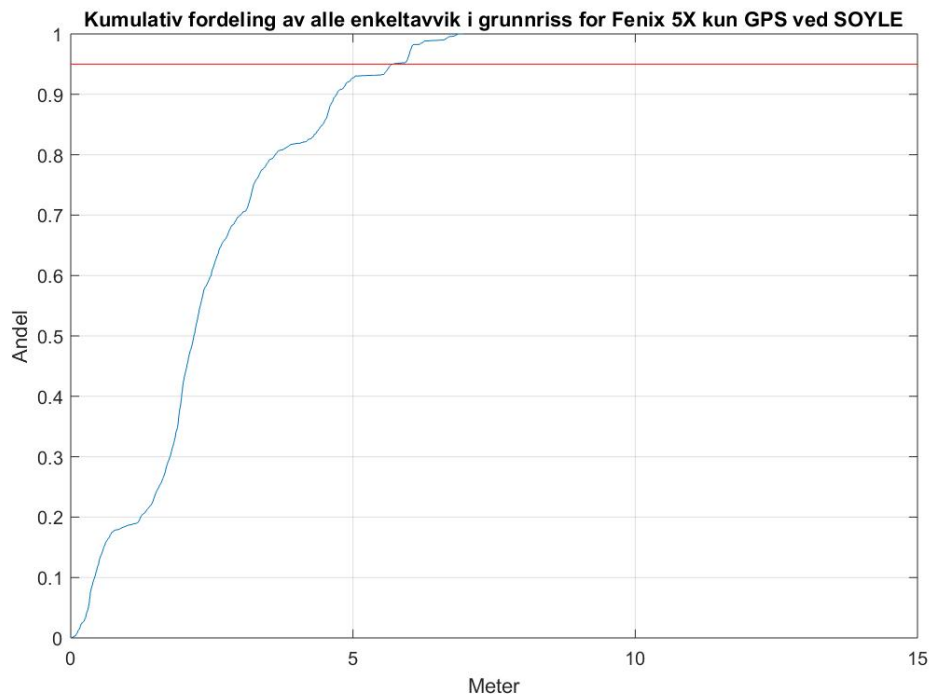
Nullhypotesen kan ikke forkastes ved 5% signifikansnivå

5.4 Forventet statistisk posisjonsnøyaktighet

5.4.1 Fenix 5X kun GPS



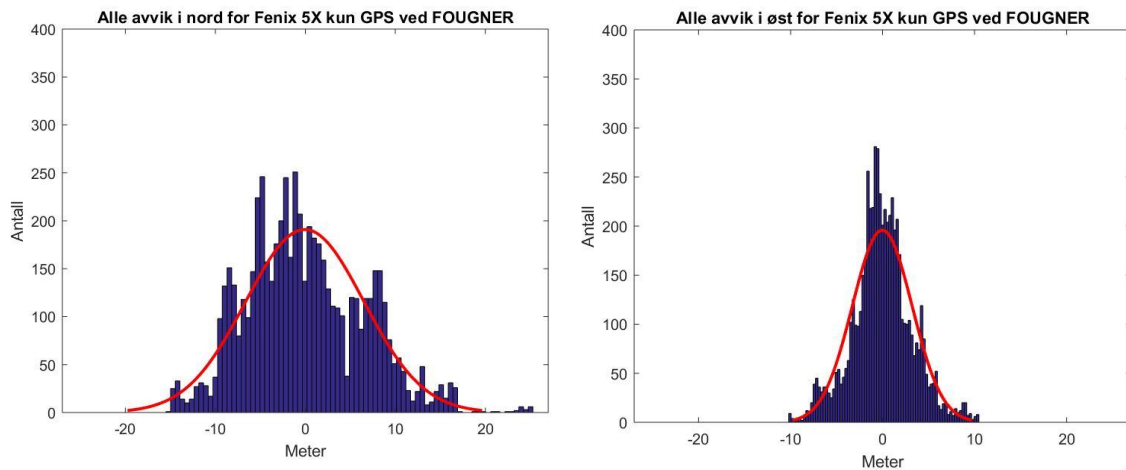
Figur 44: Fordelingen av alle enkeltavvik i nord og øst for Fenix 5X kun GPS ved testområdet SOYLE. Den horisontale akse angir meter og den vertikale akse angir antall enkeltavvik.



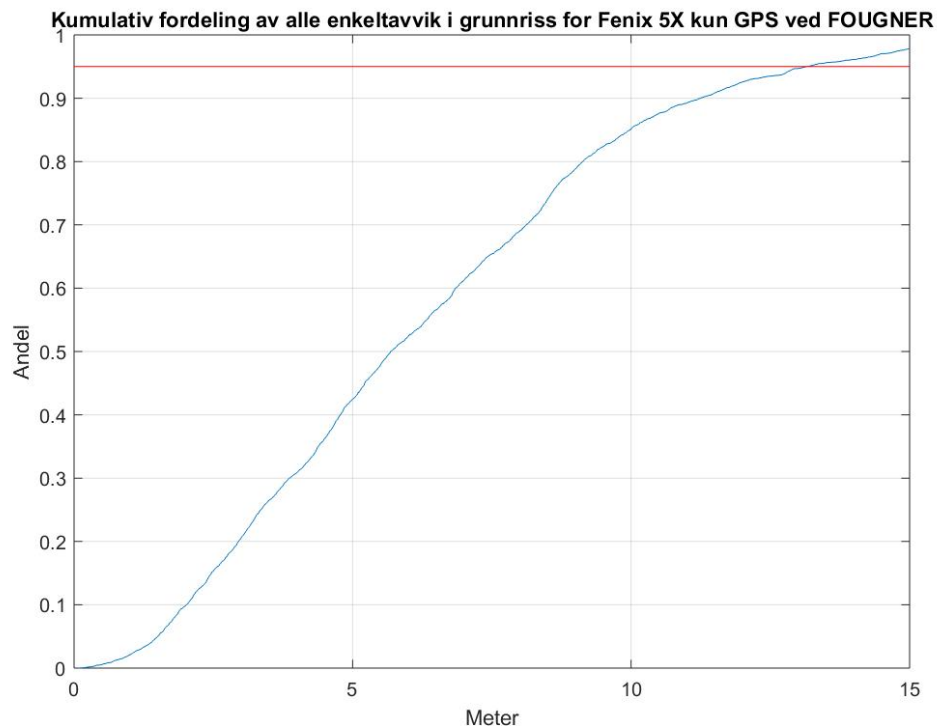
Figur 45: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X kun GPS ved testområdet SOYLE. Den horisontale akse angir meter og den vertikale akse angir andel av totalt antall enkeltavvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

Fra figur 44 kan det observeres en noe høyere forekomst av store enkeltavvik i nord-komponenten i forhold til øst-komponenten. Plottene er laget i programvaren MATLAB ved bruk av funksjonen «**histfit**». Funksjonen «**histfit**» plotter et histogram som viser fordelingen av de aktuelle dataene og tilpasser en normaltetthetsfunksjon til dataene, her vist som en rød graf (MathWorks D., 2018). Fra figur 45 fremgår det at alle enkeltavvikene i grunnriss for

Fenix 5X kun GPS ved testområdet SOYLE holder seg under 15 meter. Med enkeltavvik i grunnriss menes det den horisontale avstanden mellom punktobservasjonene og referansen, beregnet med Pythagoras-teoremet fra formel (7.1) fra avsnitt 2.7. Med 601 punktobservasjoner per målesesjon tilsvarer dette totalt 6010 enkeltavvik i grunnriss for hvert testområde.



Figur 46: Fordelingen av alle enkeltavvik i nord og øst for Fenix kun GPS ved testområdet FOUGNER. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir antall enkeltavvik.



Figur 47: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X kun GPS ved testområdet FOUGNER. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir andel av totalt antall enkeltavvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

Målesesjon	sN	sE	sP	aN	aE	aP
1	0.21	0.91	0.94	0.16	-0.57	0.59
2	1.24	1.19	1.72	-0.97	1.07	1.44
3	1.94	0.45	1.99	-1.89	-0.28	1.91
4	3.20	0.97	3.35	-2.60	0.90	2.75
5	1.15	1.62	1.99	-1.08	1.57	1.90
6	0.26	0.33	0.42	0.23	-0.27	0.35
7	1.63	2.53	3.01	-1.59	-2.44	2.91
8	5.53	1.15	5.65	5.48	0.93	5.56
9	3.61	1.75	4.01	3.60	-1.46	3.89
10	1.39	1.88	2.34	-1.39	1.86	2.32
ALLE	2.55	1.42	2.92	-0.01	0.13	0.13

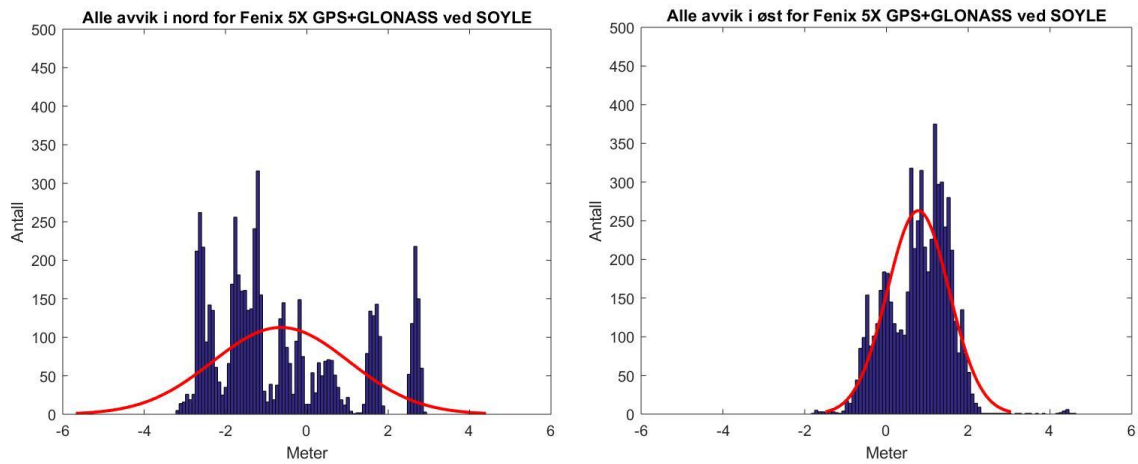
Tabell 23: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss for hver målesesjon for Fenix 5X kun GPS ved tesområdet SOYLE. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk punktavvik i grunnriss. Enhet er meter.

Målesesjon	sN	sE	sP	aN	aE	aP
11	6.26	5.36	8.24	-2.27	-0.11	2.27
12	6.03	3.13	6.79	-2.14	-0.45	2.19
13	4.71	3.48	5.86	1.08	-1.17	1.59
14	5.11	2.60	5.73	-2.56	-0.31	2.58
15	7.74	3.34	8.43	6.97	0.04	6.97
16	6.08	2.31	6.50	-3.51	0.62	3.57
17	6.43	3.00	7.09	-5.13	-1.13	5.25
18	4.23	1.65	4.54	0.92	-0.64	1.12
19	11.28	2.12	11.48	9.40	-0.02	9.40
20	4.90	3.89	6.26	-3.35	2.81	4.38
ALLE	6.57	3.24	7.32	-0.06	-0.04	0.07

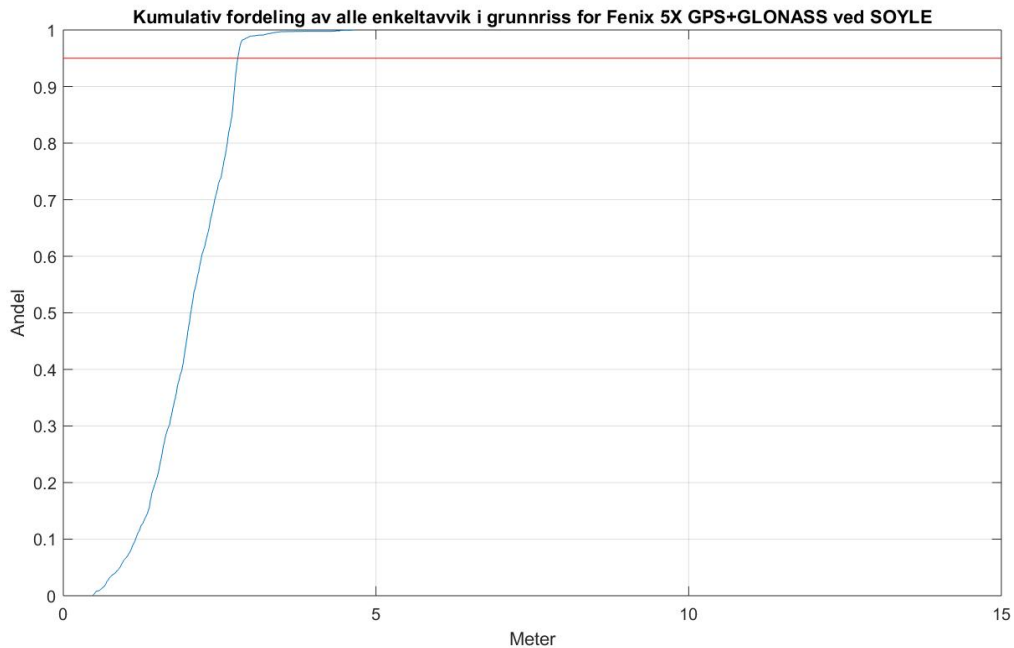
Tabell 24: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss for hver målesesjon for Fenix 5X kun GPS ved tesområdet FOUGNER. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk punktavvik i grunnriss. Enhet er meter.

Det kan observeres fra tabell 24 at de beregnede standardavvikene ser ut til å være jevnt over noe høyere enn de beregnede standardavvikene i tabell 23.

5.4.2 Fenix 5X GPS+GLONASS

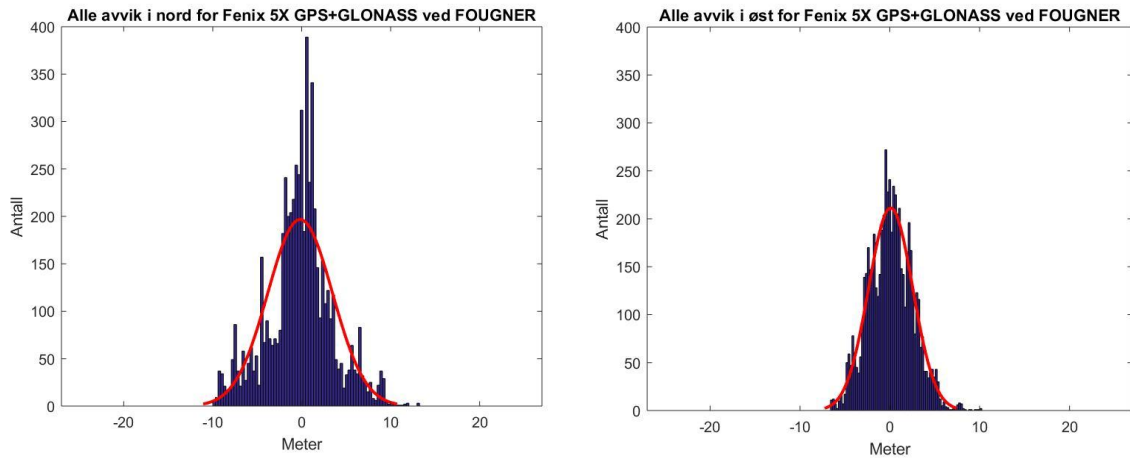


Figur 48: Fordelingen av alle enkeltavvik i nord og øst for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet SOYLE. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir antall enkeltavvik.

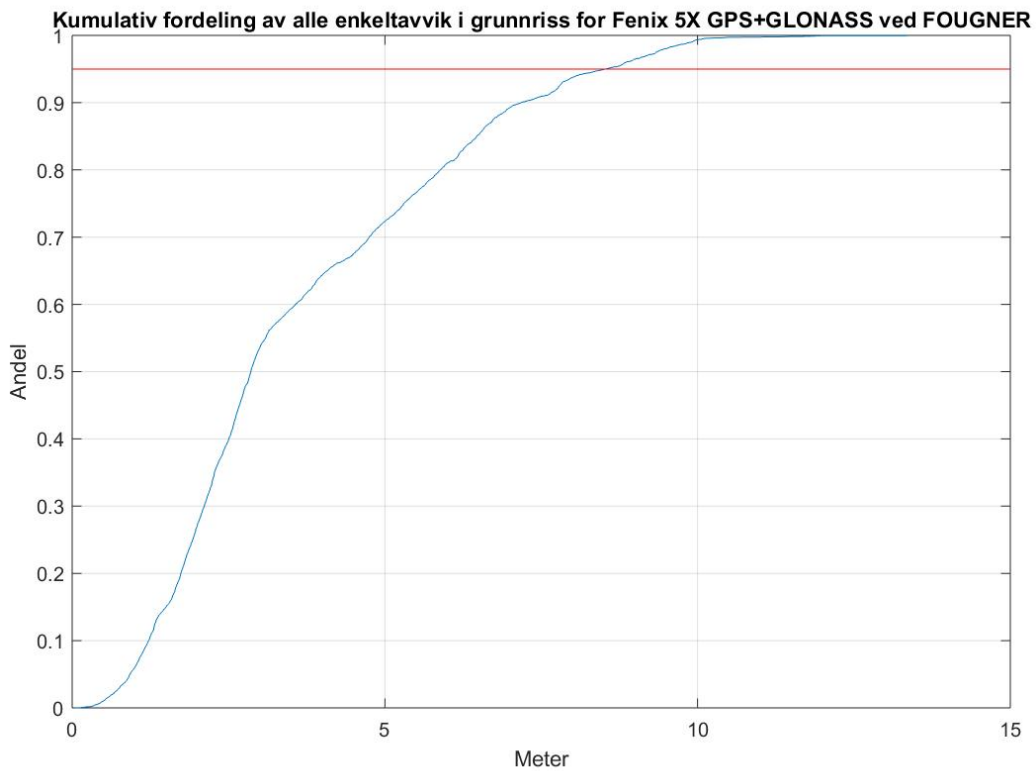


Figur 49: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet SOYLE. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir andel av totalt antall enkeltavvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

Fra figur 49 fremgår det at alle enkeltavvikene i grunnriss for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet SOYLE holder seg under 5 meter.



Figur 50: Fordelingen av alle enkeltavvik i nord og øst for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet FOUGNER. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir antall enkeltavvik.



Figur 51: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet FOUGNER. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir andel av totalt antall enkeltavvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

Fra figur 50 kan det observeres at forskjellen i fordelingene av enkeltavvikene i nord og øst for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet FOUGNER ikke er veldig stor. Det fremgår av figur 51 at nesten alle enkeltavvikene i grunnriss holder seg under 10 meter for Fenix 5X GPS+GLONASS ved testområdet FOUGNER.

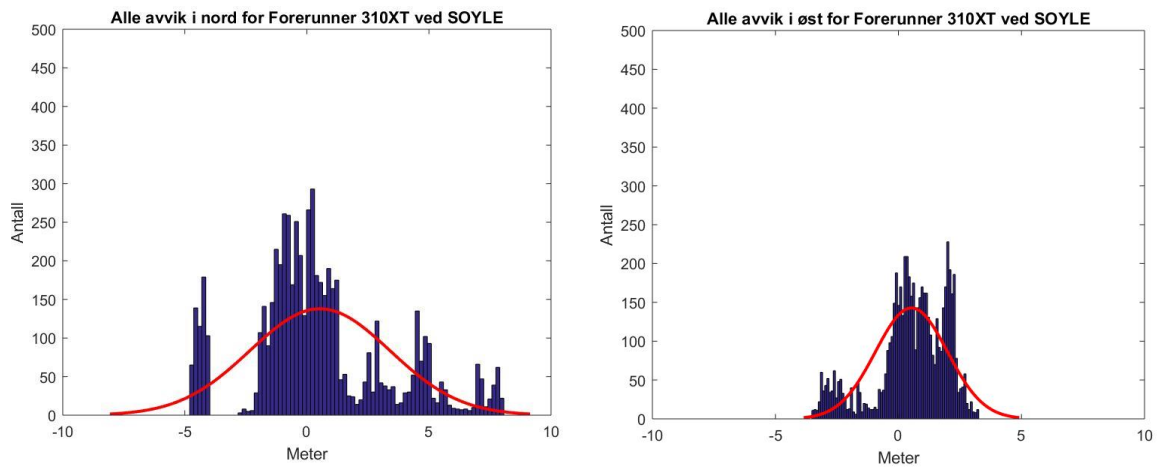
Målesesjon	sN	sE	sP	aN	aE	aP
1	1.98	1.10	2.27	-1.95	1.04	2.21
2	1.41	1.46	2.03	-1.40	1.43	2.00
3	2.61	0.41	2.64	-2.60	-0.24	2.61
4	1.27	1.22	1.77	-1.27	1.12	1.70
5	0.55	1.09	1.22	0.46	0.90	1.01
6	2.44	0.46	2.48	-2.43	-0.28	2.45
7	1.21	0.72	1.41	-1.06	0.37	1.12
8	2.67	0.65	2.75	2.67	0.63	2.75
9	1.65	1.28	2.08	1.64	1.25	2.07
10	0.60	1.67	1.77	-0.45	1.56	1.62
ALLE	1.80	1.08	2.10	-0.64	0.78	1.01

Tabell 25: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk i nord, øst og grunnriss for hver målesesjon for Fenix 5X GPS+GLONASS ved tesområdet SOYLE. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk punktavvik i grunnriss. Enhet er meter.

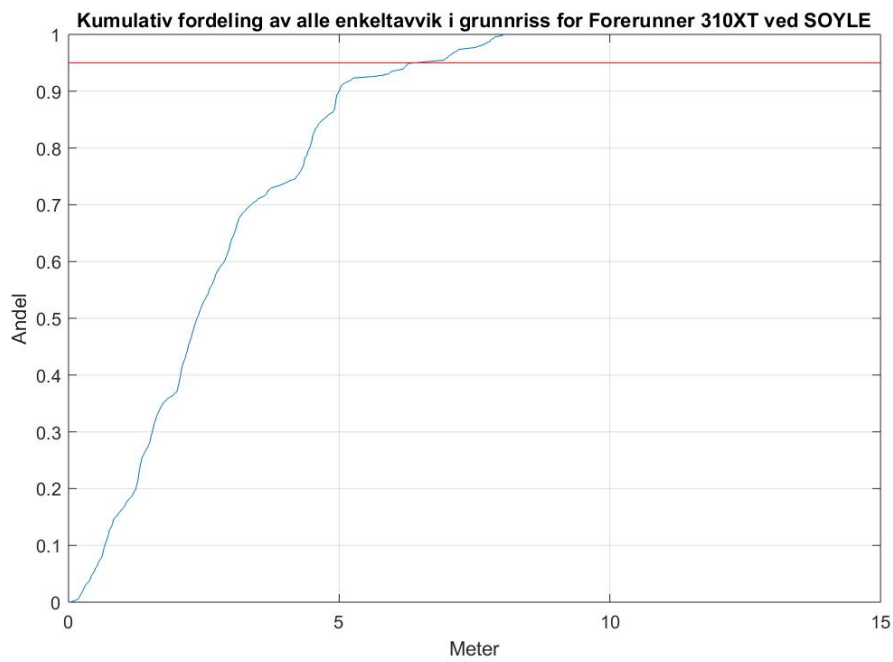
Målesesjon	sN	sE	sP	aN	aE	aP
11	4.74	3.09	5.66	0.41	1.50	1.56
12	3.62	2.55	4.42	2.20	0.27	2.21
13	6.83	2.07	7.14	-6.65	1.21	6.75
14	1.43	2.76	3.10	1.09	1.95	2.23
15	2.94	3.63	4.67	-1.21	-3.43	3.63
16	1.94	0.63	2.04	-1.66	0.36	1.70
17	2.05	2.07	2.91	-1.47	-0.41	1.53
18	0.90	1.70	1.92	0.15	-1.47	1.48
19	4.98	1.46	5.19	4.28	-0.19	4.28
20	2.40	3.07	3.90	1.09	1.20	1.62
ALLE	3.64	2.45	4.39	-0.18	0.10	0.21

Tabell 26: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk i nord, øst og grunnriss for hver målesesjon for Fenix 5X GPS+GLONASS ved tesområdet FOUGNER. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk punktavvik i grunnriss. Enhet er meter.

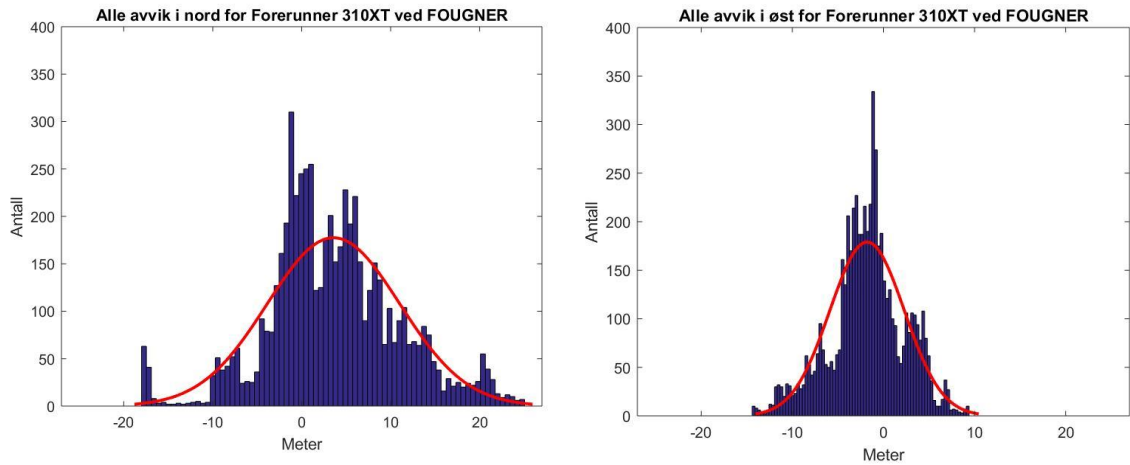
5.4.3 Forerunner 310XT



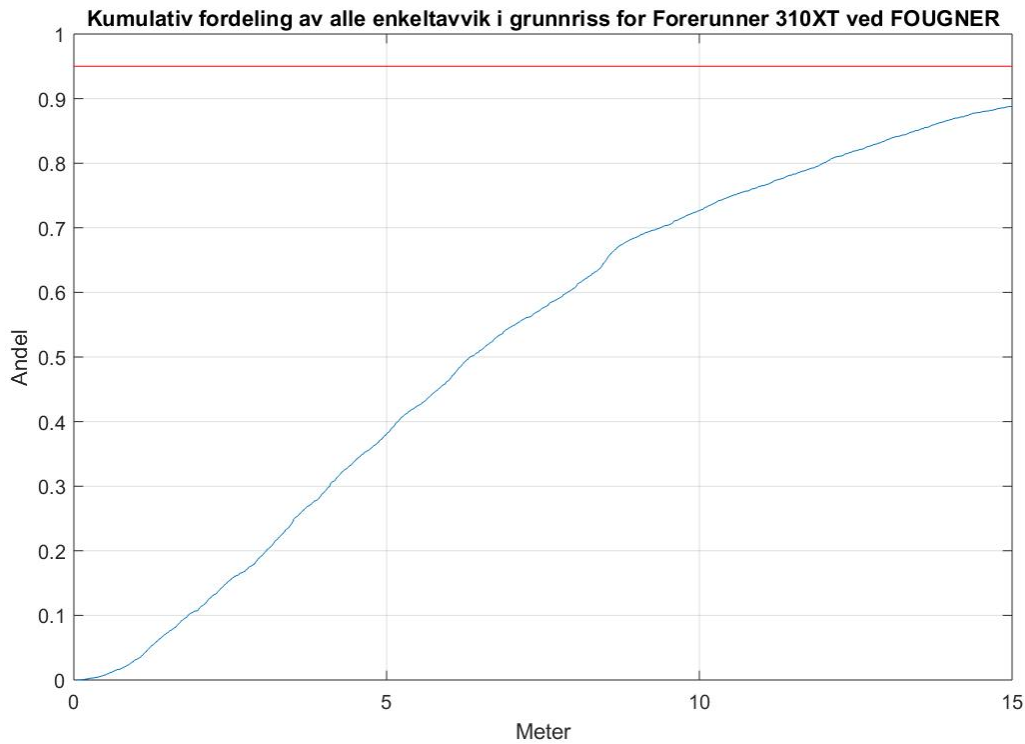
Figur 52: Fordelingen av alle enkeltavvik i nord og øst for Forerunner 310XT ved testområdet SOYLE. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir antall enkeltavvik.



Figur 53: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Forerunner 310XT ved testområdet SOYLE. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir andel av totalt antall enkeltavvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.



Figur 54: Fordelingen av alle enkeltavvik i nord og øst for Forerunner 310XT ved testområdet FOUGNER. Den horisontale akse angir meter og den vertikale akse angir antall enkeltavvik.



Figur 55: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Forerunner 310XT ved testområdet FOUGNER. Den horisontale akse angir meter og den vertikale akse angir andel av totalt antall enkeltavvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

Fra figur 55 kan det observeres at i underkant av 90% av alle enkeltavvikene i grunnriss for Forerunner 310XT ved testområdet FOUGNER holder seg under 15 meter. I figur 54 kan det se ut til å være forekomster av enkeltavvik på over 20 meter.

Målesesjon	sN	sE	sP	aN	aE	aP
1	0.64	0.46	0.79	-0.01	0.36	0.36
2	1.48	2.08	2.55	-1.34	2.08	2.47
3	0.62	2.72	2.79	-0.13	-2.70	2.70
4	1.17	1.21	1.69	0.65	0.45	0.79
5	1.29	0.85	1.55	-1.27	0.80	1.50
6	0.62	2.04	2.13	0.20	2.01	2.02
7	1.71	0.99	1.97	1.40	0.40	1.46
8	4.02	0.69	4.08	3.90	0.41	3.96
9	6.38	1.52	6.55	6.27	0.09	6.27
10	4.36	1.42	4.59	-4.36	1.39	4.58
ALLE	2.92	1.55	3.31	0.53	0.53	0.75

Tabell 27: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss for hver målesesjon for Forerunner 310XT ved tesområdet SOYLE. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk avvik i grunnriss. Enhet er meter.

Målesesjon	sN	sE	sP	aN	aE	aP
11	7.96	4.82	9.31	5.76	-4.21	7.13
12	8.82	5.84	10.58	7.24	-1.95	7.50
13	10.91	7.72	13.37	8.98	-5.76	10.67
14	3.11	4.17	5.20	0.40	3.47	3.49
15	8.31	2.27	8.62	5.26	-1.58	5.49
16	10.13	3.08	10.59	5.43	-2.56	6.00
17	11.13	2.76	11.47	8.09	0.27	8.09
18	2.12	3.57	4.15	-1.43	-3.40	3.69
19	4.73	4.65	6.63	1.02	-2.65	2.84
20	9.55	2.87	9.97	-5.03	0.40	5.05
ALLE	8.27	4.46	9.39	3.57	-1.80	4.00

Tabell 28: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik i nord, øst og grunnriss for hver målesesjon for Forerunner 310XT ved tesområdet FOUGNER. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk punktavvik i grunnriss. Enhet er meter.

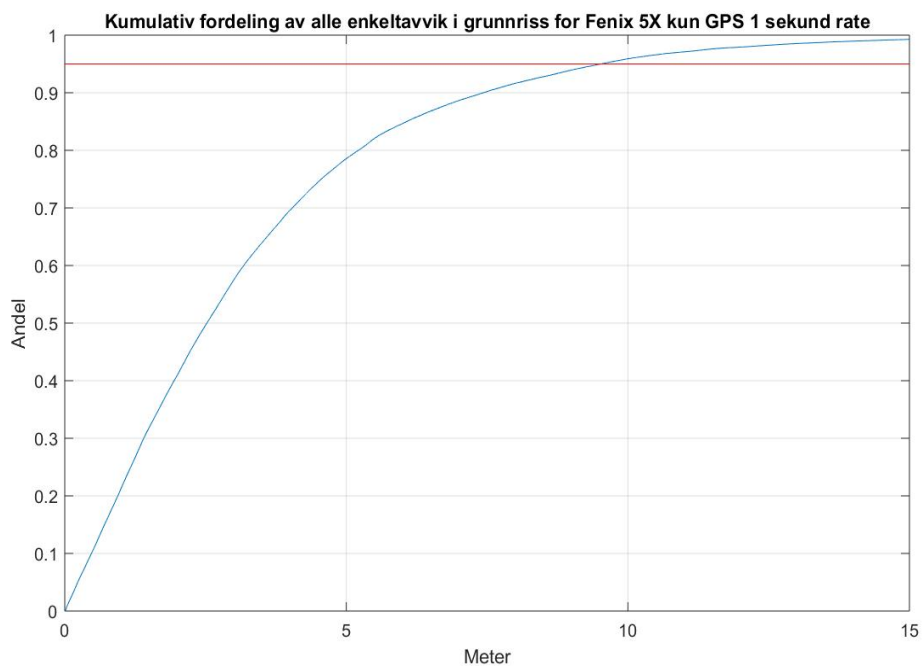
Fra tabell 28 kan det observeres betydelige forskjeller mellom de beregnede standardavvikene i nord og i øst, som for eksempel i målesesjonene 16 og 17. I den samme tabellen kan det også observeres systematiske avvik opptil nesten 9 meter i nord-komponenten.

5.5 Forventet kinematisk posisjonsnøyaktighet

5.5.1 Fenix 5X kun GPS - 1 sekund rate

Dato	sN	sE	sP	aN	aE	aP
12.10.17	3.0	3.6	4.7	0.7	-0.7	1.0
28.10.17	2.8	4.2	5.0	-0.9	-0.1	0.9
08.11.17	2.2	2.3	3.2	0.9	-1.1	1.4
12.11.17	0.7	1.8	2.0	0.1	0.3	0.3
17.03.18	3.4	2.6	4.3	-0.1	-1.4	1.4
18.03.18	1.5	2.4	2.8	-0.2	1.2	1.2
19.03.18	0.9	2.1	2.2	-0.7	0.0	0.7
25.03.18	4.0	5.8	7.0	-0.4	1.4	1.5
02.04.18	1.5	2.9	3.2	0.3	-1.0	1.0
06.04.18	2.7	3.8	4.7	0.1	-0.7	0.7
09.04.18	2.6	4.4	5.1	0.0	1.3	1.3
15.04.18	2.6	4.4	5.1	0.2	-1.5	1.5
ALLE	2.5	3.5	4.3	0.0	-0.2	0.2

Tabell 29: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss ved ulike datoer for testobjektet Fenix 5X kun GPS med datarate på ett sekund. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk avvik i grunnriss. Enhet er meter.

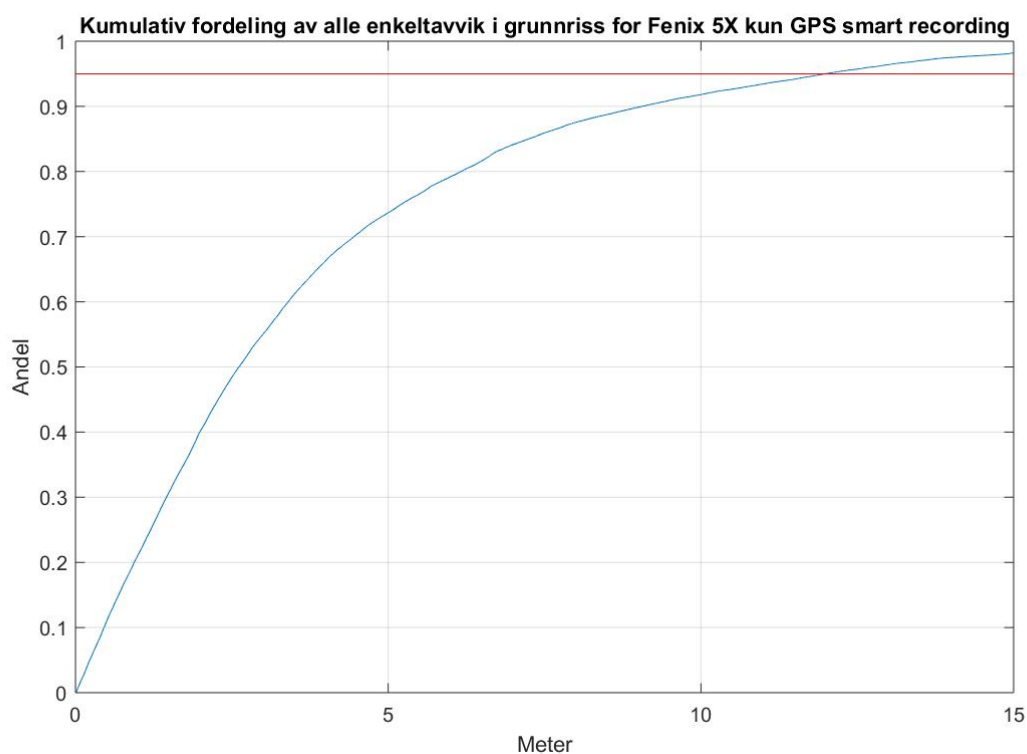


Figur 56: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X kun GPS- 1 sekund rate. Den horisontaleaksen angir meter og den vertikaleaksen angir andel av totalt antall avvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

5.5.2 Fenix 5X kun GPS - smart recording

Dato	sN	sE	sP	aN	aE	aP
17.03.18	2.0	1.9	2.8	-0.1	-1.2	1.2
18.03.18	1.6	2.8	3.2	-0.2	1.4	1.4
19.03.18	0.7	1.7	1.8	-0.4	-0.2	0.4
25.03.18	3.2	4.4	5.5	-0.5	2.0	2.0
02.04.18	1.2	2.4	2.7	0.3	-0.7	0.7
06.04.18	3.7	5.0	6.2	-0.8	-0.7	1.1
09.04.18	4.1	6.0	7.2	-0.2	2.0	2.0
15.04.18	3.9	6.6	7.7	0.0	2.8	2.8
ALLE	2.8	4.3	5.1	-0.2	0.7	0.7

Tabell 30: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss ved ulike datoer for testobjektet Fenix 5X kun GPS - smart recording. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk avvik i grunnriss. Enhet er meter.

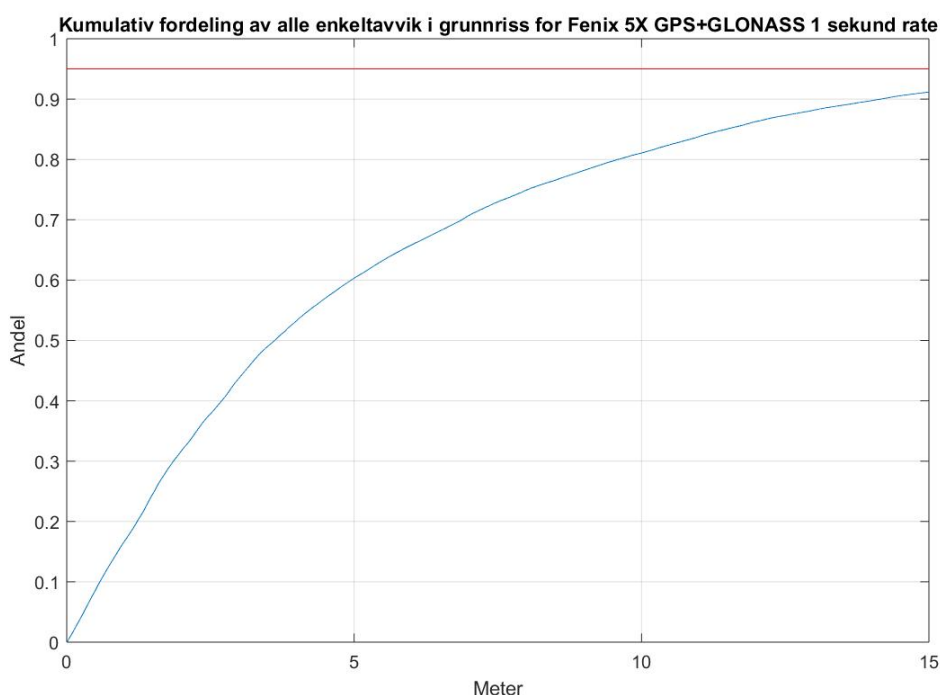


Figur 57: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X kun GPS- smart recording. Den horisontale aksene angir meter og den vertikale aksene angir andel av totalt antall avvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

5.5.3 Fenix 5X GPS+GLONASS – 1 sekund rate

Dato	sN	sE	sP	aN	aE	aP
27.08.17	4.7	8.6	9.8	-0.2	0.8	0.8
07.09.17	4.6	7.5	8.8	-0.3	1.3	1.3
08.09.17	7.6	10.3	12.8	-0.1	0.8	0.8
14.09.17	4.3	6.4	7.7	-0.5	-0.4	0.6
20.09.17	4.3	6.7	8.0	1.7	-2.7	3.2
29.10.17	4.3	12.5	13.2	1.2	2.4	2.6
11.11.17	1.6	2.1	2.6	-0.5	0.9	1.0
14.11.17	1.1	2.3	2.6	0.3	0.2	0.4
ALLE	4.5	7.8	9.0	0.2	0.4	0.5

Tabell 31: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss ved ulike datoer for testobjektet Fenix 5X GPS+GLONASS med 1 sekund rate. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk avvik i grunnriss. Enhet er meter.



Figur 58: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Fenix 5X GPS+GLONASS - 1 sekund rate. Den horisontale akselen angir meter og den vertikale akselen angir andel av totalt antall avvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

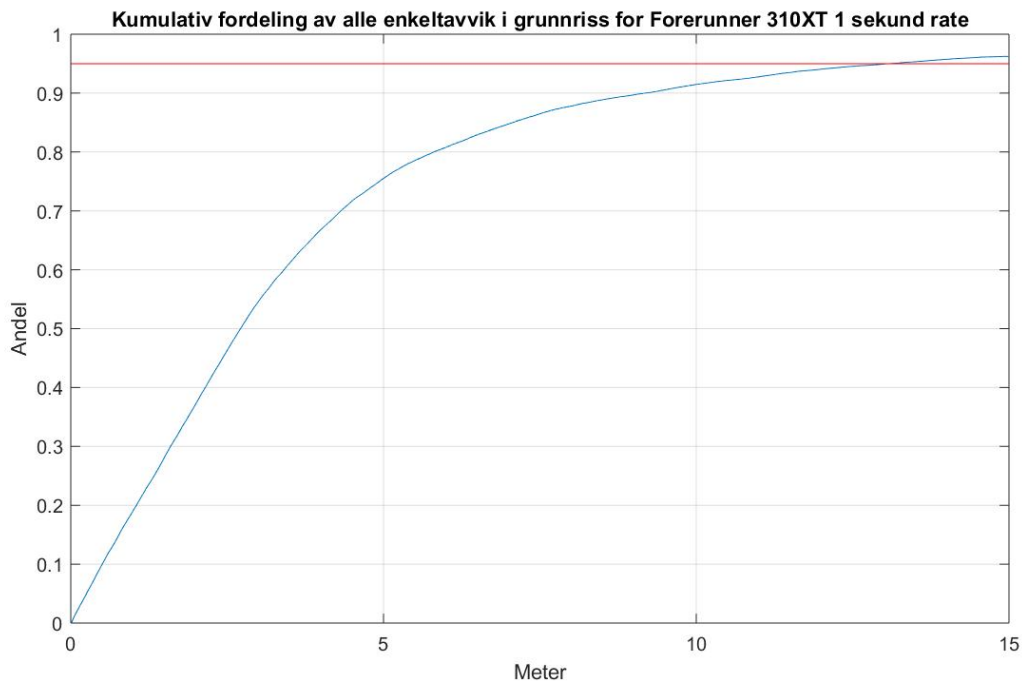
I tabell 31 kan det observeres forholdsvis høye beregnede standardavvik i grunnriss for datoene 08.09.17 og 29.10.17. På datoen 08.09.17 var det registrert høy ionosfæreaktivitet, men den samme tendensen kan ikke observeres for samme datoen for Forerunner 310XT i

tabell 32. Det fremgår av figur 58 at i overkant av 90% av alle enkeltavvikene i grunnriss ligger under 15 meter.

5.5.4 Forerunner 310XT – 1 sekund rate

Dato	sN	sE	sP	aN	aE	aP
25.08.17	1.9	3.9	4.3	0.3	-1.3	1.4
27.08.17	6.8	10.5	12.5	2.4	-1.3	2.7
29.08.17	6.6	9.9	11.9	2.0	-1.1	2.3
08.09.17	2.7	3.3	4.3	0.5	-0.2	0.6
20.09.17	6.2	8.1	10.2	2.9	-3.0	4.2
28.10.17	2.2	2.7	3.5	0.2	0.2	0.3
29.10.17	3.4	4.1	5.4	2.0	-0.3	2.0
08.11.17	1.8	2.1	2.8	0.3	0.2	0.4
11.11.17	3.7	5.9	7.0	0.4	0.1	0.4
14.11.17	1.0	1.6	1.9	0.7	0.0	0.7
ALLE	4.2	6.0	7.3	1.2	-0.7	1.4

Tabell 32: Beregnet posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik og systematisk avvik i nord, øst og grunnriss ved ulike datoer for testobjektet Forerunner 310XT med 1 sekund rate. sN angir standardavvik i nord, sE angir standardavvik i øst og sP angir standardavvik i grunnriss. aN angir systematisk avvik i nord, aE angir systematisk avvik i øst og aP angir systematisk avvik i grunnriss. Enhet er meter.



Figur 59: Kumulativ fordeling av alle enkeltavvik i grunnriss for Forerunner 310XT - 1 sekund rate. Den horisontale akselen angir meter og den vertikale akselen angir andel av totalt antall avvik. Den blå linjen viser den kumulative fordelingen og den røde linjen angir en 95% andel.

6 Diskusjon og konklusjon

6.1 Diskusjon

Fra resultatene i kapittel 5 er det verdt å merke seg at for alle testobjekter i både den statiske og kinematiske delen av oppgaven har 95% av enkeltavvikene i grunnriss holdt seg under 15 meter, med unntak av Forerunner 310XT ved FOUGNER i den statiske delen, og Fenix 5X GPS+GLONASS i den kinematiske delen. Her er det viktig å poengtere at denne oppgaven kun har tatt for seg nøyaktighet i grunnriss, og ved inkludering av høydekomponenten ville man forvente høyere tall for den beregnede posisjonsnøyaktigheten. Grunnen til at høydekomponenten har blitt utelatt i denne oppgaven var at det ikke var mulig å finne ut hvilket høydesystem som ble benyttet av testobjektene. Fra resultatene som vises i tabellene i kapittel 5 er det også verdt å merke seg at de beregnede standardavvikene viser en tendens til variasjon fra målesesjon til målesesjon. I flere målesesjoner i både den statiske delen og i kinematiske delen av oppgaven kan det observeres lavere standardavvik i grunnriss enn 5 meter og høyere standardavvik i grunnriss enn 10 meter. Dette kan også sees fra den beregnede kinematiske posisjonsnøyaktigheten til Fenix 5X GPS+GLONASS der standardavviket i grunnriss i noen målesesjoner overstiger 10 meter, men det er vanskelig å si noe om årsaken til dette. På generell basis kan det se ut til at de beregnede standardavvikene for målesesjonene under lukket kronetak på testområdet FOUGNER er noe høyere enn de beregnede standardavvikene for målesesjonene under åpen himmel på testområdet SOYLE. Videre kan det også poengteres at i den statiske delen er de beregnede standardavvikene stort sett større i nord-komponenten enn i øst-komponenten for begge testområder.

Resultatene fra de statistiske testene må vurderes med forsiktighet, i og med at de baseres på et sett med forutsetninger som ikke alltid kan antas å være oppfylt. For den paret T-testen ligger det til grunn at hvert observasjonspaar er statistisk uavhengig av de andre parene, og at alle differansene er tilnærmet normalfordelte (Løvås, 2013). I oppgaven ble det antatt at de gjennomsnittlige posisjonsfeilene fra hver målesesjon var uavhengige av hverandre. Fra tidligere er det vist at målesesjonene 1 og 11, 2 og 12, 3 og 13, osv. har funnet sted på samme dag, dog på forskjellige testområder og tidspunkt. I tillegg har mange av målesesjonene funnet sted på etterfølgende dager, slik at antakelsen om fullstendig uavhengighet mellom målesesjonene derfor kan være noe svak. Antakelsen om normalfordeling av differansene kan også svekke gyldigheten av testene siden antall observasjoner er mindre enn 30 (Løvås, 2013). På en annen side påpeker Løvås, (2013) at en paret T-test vil gi mer pålitelige testresultater enn ved en uparet T-test, noe som i hovedsak er begrunnet med at en paret T-test er testmetoden som vil gi høyest T-verdi, og som derfor vil gjøre det lettere å detektere forskjeller (Løvås, 2013). Dette forutsetter dog at det inngår mange observasjoner i testene. Med mange observasjoner menes det vanligvis over 30

(Løvås, 2013), men dersom man antar at 20 observasjoner er tilstrekkelig kan dette resonnementet styrke troverdigheten til det parrede testopplegget (Løvås, 2013) som er gjennomført i denne oppgaven. Det er igjen viktig å påpeke at de parrede T-testene har brukt gjennomsnittlig posisjonsfeil, og ikke posisjonsnøyaktigheten i form av standardavvik som observasjoner. De påfølgende konklusjonene fra de parrede T-testene vil derfor baseres på gjennomsnittlige posisjonsfeil.

Ellers er det viktig å ta i betraktning potensielle svakheter i metodene som er benyttet i beregningen av de aktuelle kvalitetsmålene. For den kinematiske delen gjelder dette i hovedsak rutinene for datainnsamlingen, i tillegg til selve kriteriumet for den romlige koblingen basert på nærmeste naboavstand. Med svakheter i rutinene for datainnsamlingen i den kinematiske delen menes det at den beregnede referanselinjen ikke refererer seg til en fysisk oppmerket og veldefinert linje, men til senterlinjen av den aktuelle stien som ble brukt. Senterlinjen av stien er ikke nødvendigvis en veldefinert deltall i terrenget og det ble forsøkt å ivareta dette i beregningene ved å anta en forholdsvis høy sentreringsusikkerhet i både nord og øst-komponentene, under en antagelse om at datainnsamlingen til enhver tid har funnet sted innenfor stibredde. Fortsatt kan det ikke utelukkes at sentreringsusikkerheten tidsvis kan ha vært høyere enn den antatte verdien på 1.0 meter, spesielt under vanskelige siktforhold. Videre er det også viktig å ta i betraktning at den romlige koblingen i beregningen av den kinematiske posisjonsnøyaktigheten kan gi et optimistisk estimat på nøyaktigheten, i og med at selve kriteriumet for den romlige koblingen baserer seg på å finne nærmeste nabopunkt på referanselinjen (Tveite & Langaas, 1999). Dette ble også påpekt i Tveite & Langaas, (1999). I Kaartinen et al., (2015) ble enkeltavvikene mellom fasiten og punktobservasjonene fra testobjektene regnet ut ved å subtrahere posisjoner som var logget på samme tidspunkt (Kaartinen, et al., 2015), og det kunne dermed tenkes at sentreringsusikkerheten reduseres siden IMU/GNSS-instrumenter og testobjekter ville ha befunnet seg på tilnærmet samme sted. Årsaken til at samme prosedyre ikke ble fulgt i denne oppgaven var i hovedsak på grunn av problemer med drift i instrumentene under datainnsamlingen med det IMU/GNSS-kombinerte systemet, slik at noen av de beregnede referanselinjene kunne bli upålitelige. For å oppnå høyest mulig grad av kontroll ble det derfor besluttet å måle den samme stien flere ganger, og deretter gjennomføre grovfeilsøk i form av en multippel t-test for å detektere og luke ut (Gjevestad, 2018) eventuelle feil i de resulterende punktene.

I den statistiske delen av oppgaven er svakhetene i hovedsak forbundet med rutinene for datainnsamlingen og grunnlaget for valg av testområdene. Som det ble fastsatt i avsnitt 4.1.4.3.1 ble det etter beste evne forsøkt å starte de statistiske målesesjonene samtidig, men i og med at det var kun én person sto for datainnsamlingen var det fysisk umulig å starte dataloggingen på tre testobjekter på samme tid. Det kan ikke utelukkes at dette kan ha hatt innvirkning på resultatene, da testobjekter som starter datalogging tidlig kan ha fått et «forsprang» foran andre testobjekter som starter senere. Fortsatt må det tas i betraktning at

dette forspranget ikke utgjorde mer enn et par sekunder. Når det gjelder valget av de ulike statistiske testområdene ble det besluttet å velge disse ut i fra antatt gode måleforhold under åpen himmel, og antatt dårlige måleforhold under lukket kronetak (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005) (Wing, 2008) (Andersen, Clarkin, Winterberger, & Strunk, 2009). Dette valget kan sies å være basert på en subjektiv vurdering. Av den grunn kan det være vanskelig å generalisere resultatene fra de ulike testområdene i særlig grad, da noen kan anse «åpen himmel» som bare delvis åpen himmel eller «lukket kronetak» som bare delvis lukket kronetak. Fortsatt er prinsippet om testing av diverse GNSS-teknologi under ulike antatt gode og dårlige måleforhold noe som ser ut til å være etablert i litteraturen, som i Wing et al., (2005), Wing, (2008), Andersen et al., (2009), Kaartinen et al., (2015) og Han et al., (2015). I forbindelse med denne oppgaven ble det valgt å bruke ulike testområder med en hensikt om å danne et mer helhetlig og representativt bilde av ytelsen i form av horisontal posisjonsnøyaktighet til de aktuelle GNSS-mottakerne.

En annet mangelfullt element i denne oppgaven er at det kun ble tatt utgangspunkt i den statistiske posisjonsnøyaktigheten i sammenlikningen av modeller og i undersøkelsen av bidraget fra GLONASS i Fenix 5X. På generell basis er det plausibelt å anta at løpeklokker av naturlige årsaker stort sett brukes i bevegelse, og i den forstand ville en sammenlikning av den kinematiske posisjonsnøyaktigheten til de ulike testobjektene ha vært mer interessant. Årsakene til at det ble valgt å gjøre dette i den statistiske delen beror på en antagelse om at den kinematiske referanselinjen var vanskeligere å bestemme med høyere nøyaktighet enn de statistiske fastpunktene, først og fremst på grunn av høy sentreringsusikkerhet. Dette kunne ha gjort det vanskelig å detektere eventuelle små forskjeller i ytelsene i testobjektene. I tillegg ble ikke et ekstra testobjekt av typen Fenix 5X tilgjengelig før vinteren 2018, et tidspunkt da mye av den kinematiske datainnsamlingen allerede hadde funnet sted.

6.2 Konklusjon

For å besvare problemstillingene fastsatt i avsnitt 1.2 må resultatene fra kapittel 5 vurderes i sammenheng med disse. Videre følger en oppsummering av resultatene for hvert av forsøkene fastsatt i kapittel 3, og deretter en konklusjon for problemstillingene fastsatt i avsnitt 1.2.

Sammenlikning av modeller: Det fremgår av tabell 13 i avsnitt 5.1.1 at de beregnede standardavvikene basert på alle målesesjoner for testobjektet Fenix 5X kun GPS er noe lavere enn det beregnede standardavviket for testobjektet Forerunner 310XT. Dette gjelder for begge testområder. Den parede T-testen fra avsnitt 5.1.2 klarte ikke å forkaste nullhypotesen om at den forventede, gjennomsnittlige posisjonsfeilen til Forerunner 310XT er lik den forventede, gjennomsnittlige posisjonsfeilen til Fenix 5X kun GPS ved 5% signifikansnivå. Pitman's T-testen fra avsnitt 5.1.3 klarte ikke å forkaste nullhypotesen om at

variansen til Fenix 5X kun GPS er den samme som Forerunner 310XT ved 5% signifikansnivå. Dette gjelder både for nord-komponenten og øst-komponenten. Konklusjon: Den beregnede posisjonsnøyaktigheten til Fenix 5X var bedre enn Forerunner 310XT, men det var ikke mulig å finne en signifikant forskjell i horisontal posisjonsnøyaktighet mellom de to modellene.

Bidrag fra GLONASS i Fenix 5X: Det fremgår av tabell 17 i avsnitt 5.2.1 at det beregnede standardavviket basert på alle målesesjoner på de to testområdene for testobjektet Fenix 5X GPS+GLONASS var lavere enn det beregnede standardavviket basert på alle målesesjoner på de to testområdene for testobjektet Fenix 5X kun GPS. Den parede T-testen i avsnitt 5.2.2 klarte å forkaste nullhypotesen om at posisjonsfeilen for Fenix 5X kun GPS er den samme som Fenix 5X GPS+GLONASS ved 5% signifikansnivå. Pitman's T-testen i avsnitt 5.2.3 klarte også å forkaste nullhypotesen om at variansene til Fenix 5X kun GPS og Fenix 5X GPS+GLONASS er like ved 5% signifikansnivå. Dette gjelder både for nord-komponenten og øst-komponenten. Konklusjon: Ut i fra resultatene kan det være antydninger til at bruk av GPS+GLONASS kontra kun GPS i modellen Fenix 5X gir en bedre horisontal posisjonsnøyaktighet.

Effekt av sampling-rate på posisjonsnøyaktighet: Fra tabell 21 i avsnitt 5.3.1 fremgår det at det beregnede standardavviket for Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate er noe lavere enn det beregnede standardavviket for Fenix 5X kun GPS – smart recording. Det er viktig å påpeke igjen at disse estimatene er beregnet på grunnlag av data fra samme målesesjoner, det vil si fra datoene 17.03.18, 18.03.18, 19.03.18, 25.03.18, 02.04.18, 06.04.18, 09.04.18 og 15.04.18. Den parede T-testen i avsnitt 5.3.2 klarte ikke å forkaste nullhypotesen om at den gjennomsnittlige, vektete posisjonsfeilen ved bruk av smart recording er den samme som ved bruk av 1-sekund rate ved 5% signifikansnivå. Konklusjon: Ut i fra resultatene er det lite som tyder på at bruk av smart recording kontra 1-sekund rate i Fenix 5X reduserer den kinematiske horisontale posisjonsnøyaktigheten i særlig grad.

Forventet posisjonsnøyaktighet under ulike måleforhold for ulike modeller med ulike innstillinger:

- **Statisk posisjonsnøyaktighet Fenix 5X kun GPS:** Det fremgår av tabell 23 og tabell 24 i avsnitt 5.4.1 at punktstandardavviket i grunnriss basert på alle målesesjoner for testobjektet Fenix 5X kun GPS ble beregnet til å være 2.92 meter under åpen himmel på SOYLE og 7.32 meter under lukket kronetak på FOUNGNER. I figur 45 og figur 47 vises det at 95% av enkeltavvikene i grunnriss har holdt seg innenfor 15 meter på begge testområdene.
- **Statisk posisjonsnøyaktighet Fenix 5X GPS+GLONASS:** Det fremgår av tabell 25 og tabell 26 i avsnitt 5.4.2 at punktstandardavviket i grunnriss basert på alle målesesjoner for testobjektet Fenix 5X GPS+GLONASS ble beregnet til 2.10 meter

under åpen himmel på SOYLE og 4.39 meter under lukket kronetak på FOUNER. I figur 49 og figur 51 vises det at 95% av enkeltavvikene i grunnriss har holdt seg innenfor 15 meter på begge testområdene.

- **Statisk posisjonsnøyaktighet Forerunner 310XT:** Det fremgår av tabell 27 og tabell 28 i avsnitt 5.4.3 at punktstandardavviket i grunnriss basert på alle målesesjoner for testobjektet Forerunner 310XT ble beregnet til å være 3.31 meter under åpen himmel på SOYLE og 9.39 meter under lukket kronetak på FOUNER. I figur 53 vises det at 95% av enkeltavvikene i grunnriss har holdt seg innenfor 15 meter på testområdet SOYLE. I figur 55 vises det at omtrent 90% av enkeltavvikene har holdt seg innenfor 15 meter på testområdet FOUNER.
- **Kinematisk posisjonsnøyaktighet Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate:** Det fremgår av tabell 29 i avsnitt 5.5.1 at punktstandardavviket i grunnriss basert på totalt 12 kinematiske målesesjoner som tok sted høsten 2017 og våren 2018 ble beregnet til å være 4.3 meter i grunnriss. I figur 56 vises det at 95% av alle enkeltavvik i grunnriss holder seg under 15 meter.
- **Kinematisk posisjonsnøyaktighet Fenix 5X kun GPS – smart recording:** Det fremgår av tabell 30 i avsnitt 5.5.2 at punktstandardavviket i grunnriss basert på totalt 8 kinematiske målesesjoner som tok sted våren 2018 ble beregnet til å være 5.1 meter. I figur 57 vises det at 95% av alle enkeltavvik i grunnriss holder seg under 15 meter.
- **Kinematisk posisjonsnøyaktighet Fenix 5X GPS+GLONASS – 1 sekund rate:** Det fremgår av tabell 31 i avsnitt 5.5.3 at punktstandardavviket i grunnriss basert på 8 kinematiske målesesjoner som tok sted høsten 2017 ble beregnet til å være 9.0 meter. I figur 58 vises det at i overkant av 90% av alle enkeltavvikene i grunnriss holder seg under 15 meter.
- **Kinematisk posisjonsnøyaktighet for Forerunner 310XT – 1 sekund rate:** Det fremgår av tabell 32 i avsnitt 5.5.4 at punktstandardavviket i grunnriss basert på 10 kinematiske målesesjoner som tok sted høsten 2017 ble beregnet til å være 7.3 meter. I figur 59 vises det at 95% av alle enkeltavvikene i grunnriss holder seg under 15 meter.

Konklusjon: Som tidligere nevnt oppgir ikke Garmin et konkret kvalitetsmål på posisjonsnøyaktigheten på sine nettsider, men dersom man legger til grunn standardavvik eller enkeltavvik i grunnriss som kvalitetsmål, ser resultatene stort sett ut til å samsvare med de oppgitte nøyaktighetsspesifikasjonene gitt som innenfor 5-10 meter generelt og innenfor 15 meter 95% av tiden (Garmin A., 2018) (Garmin A., 2017)

De beregnede standardavvikene i denne oppgaven vil som nevnt i avsnitt 2.1 basere seg på tilnærmet lik formel som RMSE, og resultater fra tidligere undersøkelser som har basert seg på dette kvalitetsmålet kan dermed sammenliknes. I Wing et al., (2005) ble RMSE i grunnriss multiplisert med faktor 1.7308 for å danne et 95% konfidensintervall. De resulterende

konfidensintervallene i grunnriss basert på flere målesesjoner for hver av de ulike GPS-mottakerne varierte fra 2.0 meter til 34.6 meter under åpen himmel, og fra 5.5 meter til 21.6 meter under lukket kronetak (Wing, Eklund, & Kellogg, 2005). I og med at disse tallene er beregnet fra RMSE i grunnriss og multiplisert med faktor 1.7308, må man ved en sammenlikning anta noe lavere tall. I Andersen et al., (2009) ble den resulterende posisjonsnøyaktigheten i form av RMSE beregnet til 3-7 meter basert på målinger under ulike typer skog. Til sammenlikning er det i denne oppgaven beregnet en forventet statistisk posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik i grunnriss basert på 10 målesesjoner på 2.10 meter, 2.92 meter og 3.31 meter under åpen himmel på SOYLE, og 4.39 meter, 7.32 meter og 9.39 meter under lukket kronetak på FOUGNER. Kaartinen et al., (2015) beregnet den kinematiske posisjonsnøyaktigheten i grunnriss for et sett med én-frekvente mottakere, blant annet en Garmin-mottaker, i form av RMSE til 4.2 – 9.3 meter basert på to målesesjoner. Til sammenlikning er det i denne oppgaven beregnet en forventet kinematisk posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik i grunnriss basert på flere målesesjoner til 4.3 meter, 5.1 meter, 7.3 meter og 9.0 meter. Ut i fra dette kan resultatene fra denne oppgaven se ut til å være i samsvar med resultater fra tidligere studier.

6.2.1 Hovedkonklusjon

I forhold til problemstillingene fastsatt i avsnitt 1.2 kan følgende konklusjoner trekkes:

- Hvilken av modellene Forerunner 310XT og Fenix 5X gir best posisjonsnøyaktighet? Resultatene fra denne oppgaven viser at den beregnede posisjonsnøyaktigheten til Fenix 5X bedre, men det kunne ikke avdekkes en signifikant forskjell i posisjonsnøyaktigheten mellom Forerunner 310XT og Fenix 5X.
- Bidrar GLONASS-konstellasjonen til posisjonsnøyaktigheten i modellen Fenix 5X? Ut ifra de beregnede statistiske posisjonsnøyaktighetene og de statistiske testene er det gode antydninger til at inkludering av GLONASS-konstellasjonen gir en bedre posisjonsnøyaktighet i Fenix 5X.
- Forverres posisjonsnøyaktigheten ved bruk av «smart recording» i Fenix 5X? Den beregnede posisjonsnøyaktigheten ved bruk av «smart recording» var noe dårligere enn ved bruk av 1-sekund rate i Fenix 5X, men det kunne ikke avdekkes en signifikant forskjell. Resultatene tyder derfor på at posisjonsnøyaktigheten ikke forverres ved bruk av «smart recording» i Fenix 5X.
- Hvilken statistisk og kinematisk posisjonsnøyaktighet kan forventes under ulike måleforhold for de ulike modellene med ulike innstillinger? Resultatene i denne oppgaven viser en forventet statistisk posisjonsnøyaktighet i form av standardavvik i grunnriss på 2.10 meter for Fenix 5X GPS+GLONASS, 2.92 meter for

Fenix 5X kun GPS og 3.31 meter for Forerunner 310XT under åpen himmel. Under lukket kronetak ble den forventede statiske posisjonsnøyaktigheten beregnet til 4.39 meter for Fenix 5X GPS+GLONASS, 7.32 meter for Fenix 5X kun GPS og 9.39 meter for Forerunner 310XT. Den forventede kinematiske posisjonsnøyaktigheten i form av standardavvik i grunnriss ble beregnet til 4.3 meter for Fenix 5X kun GPS – 1 sekund rate, 5.1 meter for Fenix 5X kun GPS – smart recording, 9.0 meter for Fenix 5X GPS+GLONASS – 1 sekund rate, og 7.3 meter for Forerunner 310XT – 1 sekund rate.

6.3 Videre arbeid

I sammenheng med de elementene som har blitt påpekt i dette avsnittet foreslås følgende videre arbeid:

- Optimalisering og videreutvikling av programmet for utjevning av linjer.
- Inkludere høydekomponenten i beregningene av posisjonsnøyaktighet.
- Teste et større og mer variert utvalg av GNSS-mottakere, for eksempel GNSS-mottakere i mobiltelefoner. Definere en tydeligere referanselinje i terrenget slik at sentreringsusikkerheten i referansen kan reduseres mest mulig.
- Undersøke effekten av «smart recording» kontra ett sekund datarate på avstandsnøyaktigheten i håndholdte GNSS-enheter.

7 Bibliografi

- Andersen, H.-E., Clarkin, T., Winterberger, K., & Strunk, J. (2009, Juli). An Accuracy Assessment of Positions Obtained Using Survey- and Recreational-Grade Global Positioning System Receivers across a range of Forest Conditions within the Tanana Valley of Interior Alaska. *Western journal of applied forestry, Vol. 24, Issue 3*, ss. 128-136.
- Andersen, Ø. (2003). *Orientering i stereoinstrumentet*. Ås: Institutt for kartfag, NLH.
- Crook, C. (2016). *QGIS - For Users - Plugins - Vector Field Renderer*. Hentet fra QGIS Plugins Python Repository: <https://plugins.qgis.org/plugins/VectorFieldRenderer/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Garmin. (2013, Januar). *Forerunner 310XT Owner's Manual - Data recording*. Hentet fra webområde for Garmin brukermanualer: https://static.garmincdn.com/pumac/Forerunner310XT_OM_EN.pdf. Sist besøkt 08.05.2018.
- Garmin A. (2017). *Garmin - About GPS*. Hentet fra webområde for Garmin: <http://www8.garmin.com/aboutGPS/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Garmin A. (2018). *Garmin - Support - GPS accuracy*. Hentet fra webområde for Garmin Support: <https://support.garmin.com/faqSearch/en-US/faq/content/aZc8RezeAb9LjCDpJplTY7>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Garmin B. (2017). *Garmin - About GPS - Glossary - Accuracy*. Hentet fra webområde for Garmin: <http://www8.garmin.com/aboutGPS/glossary.html>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Garmin B. (2018). *Garmin - Support - Frequency, Code, and Band Information for Garmin GPS Satellite Reception*. Hentet fra webområde for Garmin: <https://support.garmin.com/faqSearch/en-GB/faq/content/4K3mHZFAIJ3YhUMxA8HYm8>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Garmin C. (2018). *Fenix 5X - System settings - Data recording*. Hentet fra webområde for Garmin: <https://www8.garmin.com/manuals/webhelp/fenix5x/EN-US/GUID-1500E73F-F386-49AF-A542-25D4B1655A08.html>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Garmin D. (2018). *Fenix 5X - Activities and App Settings - GPS*. Hentet fra webområde for Garmin: <https://www8.garmin.com/manuals/webhelp/fenix5x/EN-US/GUID-E03FFCFD-15AD-401E-A15D-715629C6DBF0.html>. Sist besøkt 08.05.2018.
- Garmin E. (2018). *Garmin - Forerunner 310XT - Spesifikasjoner - Sensorer*. Hentet fra webområde for Garmin: <https://buy.garmin.com/nb-NO/NO/p/27335#specs>. Sist besøkt 12.05.2018.
- GDAL/OGR contributors. (2018). *The GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Hentet fra The Open Source Geospatial Foundation: http://www.gdal.org/drv_csv.html. Sist besøkt 06.05.2018.
- Ghilani, C. D. (2010). *Adjustment Computations - Spatial Data Analysis 5th edition*. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Gjevstad, J. G. (2018, April 16). Notat: Kvalitetskontroll basert på multippel t-test. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. Artech House.

- Han, H., Wang, J., Wang, J., & Tan, X. (2015, April 14). Performance Analysis on Carrier Phase-Based Tightly-Coupled GPS/BDS/INS Integration in GNSS Degraded and Denied Environments. *Sensors 2015, Vol. 15, Issue 4*, ss. 8685-8711.
- Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical geodesy*. Graz: SpringerWienNewYork.
- Kaartinen, H., Hyyppä, J., Vastaranta, M., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Pyörälä, J., Liang, X., Liu, J., Wang, Y., Kaijaluoto, R., Melkas, T., Holopainen, M., Hyyppä, H. (2015, September 16). Accuracy of Kinematic Positioning Using Global Satellite Navigation Systems under Forest Canopies. *Forests 2015, Vol. 6, Issue 9*, ss. 3218-3236.
- Kapusta, P. (2015, Juni). *QGIS - For Users- Plugins - Points2One*. Hentet fra QGIS Python Plugins Repository: <http://plugins.qgis.org/plugins/points2one/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Kartverket A. (2017, Desember). Produktspesifikasjon: Tur- og friluftsruter. Norge: Kartverket. Hentet fra webområde for SOSI Geonorge: http://sosi.geonorge.no/Produktspesifikasjoner/Produktspesifikasjon_Kartverket_TurFriluftsruter_20171210.pdf. Sist besøkt 11.05.2018.
- Kartverket A. (2018). *Geonorge - Kartkatalogen - Tur- og friluftsruter*. Hentet fra webområde for Geonorge: <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/uuid/d1422d17-6d95-4ef1-96ab-8af31744dd63>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Kartverket B. (2017, Oktober 20). *Forsiden - Geodataarbeid - Temadata - Nasjonal database for tur- og friluftsruter*. Hentet fra webområde for Kartverket: <https://kartverket.no/geodataarbeid/temadata/nasjonal-database-for-tur--og-friluftsruter/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Kartverket B. (2018). *Geonorge - Aktuelt - Om Geonorge*. Hentet fra webområde for Geonorge: <https://www.geonorge.no/aktuelt/om-geonorge/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Kartverket C. (2018). *Metadatakatalog - Georef*. Hentet fra webområde for metadata om kartdata: <https://metadata.kartverket.no/metadata/georef.jsp?fylke=02&komm=0214&georef=ABCD&Submit1=G%E5+til+kommune>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Kartverket D. (2018). *Norgeskart.no*. Hentet fra webområde for Norgeskart - en nettbasert karttjeneste: <http://www.norgeskart.no>. Sist besøkt 13.05.2018.
- Kristiansen, O. (2017). *Kompendium: Posisjonering med GNSS- Teori og anvendelser*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Lipe, R. (2018). *gpsbabel.org*. Hentet fra webområde for GPSTabel - en gratis programvare for overføring og konvertering av GPS data: <https://www.gpsbabel.org/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2010). *Geographic Information Systems & Science, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Løvås, G. G. (2013). *Statistikk for universiteter og høyskoler 3.utgave*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Macho, W. (2017). *QGIS - For Users - Plugins - QChainage*. Hentet fra webområde for QGIS Plugins: <https://plugins.qgis.org/plugins/qchainage/>. Sist besøkt 06.05.2018.
- MathWorks A. (2018). *MathWorks - Documentation - Variance*. Hentet fra weområde for MATLAB dokumentasjon: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/var.html>. Sist besøkt 06.05.2018.

- MathWorks B. (2018). *MathWorks - Documentation - Correlation coefficients*. Hentet fra webområde for MATLAB dokumentasjon: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html>. Sist besøkt 06.05.2018.
- MathWorks C. (2018). *MathWorks - Documentation - csvread*. Hentet fra webområde for MATLAB dokumentasjon: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/csvread.html>. Sist besøkt 06.05.2018.
- MathWorks D. (2018). *MathWorks - Documentation - histfit*. Hentet fra webområde for MATLAB dokumentasjon: <https://se.mathworks.com/help/stats/histfit.html#btg7cdm>. Sist besøkt 06.05.2018.
- McNamara, J. (2008). *GPS For Dummies*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Norkart. (2005, August 12). KOF Spesifikasjon Versjon 2.00. Norkart.
- Norkart A. (u.d.). GISLINE Brukermanual - Koordinater og observasjoner-menyen - Generelt om observasjoner - Lese satellittvektorer fra KOF til OREG. GISLINE Plattform versjon 6.0.0. Norkart.
- Norkart B. (u.d.). GISLINE Brukermanual - Test av observasjoner - Multipel t-test. GISLINE Plattform versjon 6.0.0. Norkart.
- Norkart C. (u.d.). GISLINE Brukermanual - Utjevning og analyse - Grunnlagstest. GISLINE Plattform versjon 6.0.0. Norkart.
- O'Sullivan, D., & Unwin, D. J. (2010). *Geographic Information Analysis second edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- QGIS A. (2018). *QGIS User Guide - General Tools - Measuring*. Hentet fra Documentation for QGIS 2.18: https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/introduction/general_tools.html#measuring. Sist besøkt 06.05.2018.
- QGIS B. (2018). *QGIS User Guide - Managing Data Source - Exploring Data Formats and Fields - Delimited Text Files*. Hentet fra Documentation for QGIS 2.18: https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/managing_data_source/supported_data.html#delimited-text-files. Sist besøkt 06.05.2018.
- QGIS C. (2018). *QGIS User Guide - Processing providers and algorithms*. Hentet fra Documentation for QGIS 2.18: https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/processing_algs/gdalogr/index.html. Sist besøkt 06.05.2018.
- QGIS D. (2018). *QGIS User Guide - QGIS Processing Framework - Geoprocessing tools*. Hentet fra Documentation for QGIS 2.18: https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/processing/vector_menu.html. Sist besøkt 09.05.2018.
- Schaefer, M., & Woodyer, T. (2015, Juni). Assessing absolute and relative accuracy of recreation-grade and mobile phone GNSS devices: a method for informing device choice. *Area, 2015, Vol. 47, Issue 2*, ss. 185-196.
- Schneider, A. (2018). *gpsvisualizer.com - About GPSV*. Hentet fra Webområde for GPS Visualizer: Do-It-Yourself Mapping: <http://www.gpsvisualizer.com/about.html>. Sist besøkt 06.05.2018.

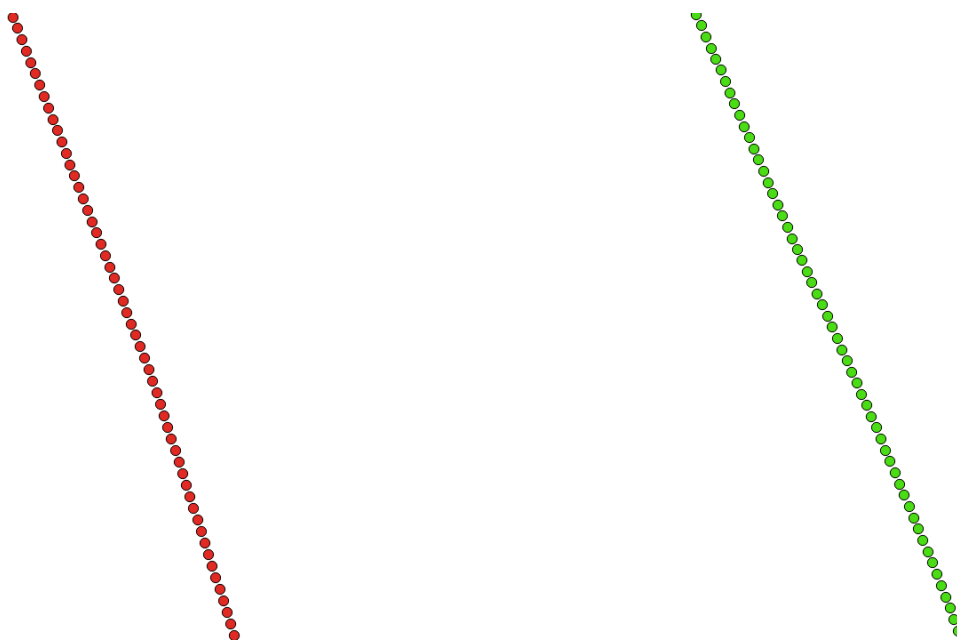
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy 2nd Edition*. Hannover: Walter de Gruyter GmbH&Co. KG.
- Skogseth, T., & Norberg, D. (2014). *Grunnleggende landmåling*. Gyldendal.
- Statens Kartverk. (2013, Februar). Produktspesifikasjon for ortofoto i Norge - versjon 4.5. Hønefoss, Norge: Statens Kartverk. Hentet fra webområde for Geonorge- det nasjonale nettstedet for kartdata:
https://register.geonorge.no/data/documents/produktspesifikasjoner_Digitale%20ortofoto_v5_ortofoto-spesifikasjon-v4_5-2013_.pdf. Sist besøkt 11.05.2018.
- Statens kartverk. (2015, Januar). Standarder Geografisk Informasjon - Geodatakvalitet, Versjon 1.0 - 2015. Hønefoss, Norge: Statens kartverk. Hentet fra webområde for Kartverket:
<https://www.kartverket.no/globalassets/standard/bransjestandarder-utover-sosi/geodatakvalitet.pdf>. Sist besøkt 11.05.2018.
- TerraTec AS. (2013, Oktober). *Tjenester - TerraPos - Downloads - Brochure, October 2013*. Hentet fra webområde for TerraTec AS:
https://www.terratec.no/filarkiv/File/TP2_brochure_oct2013.pdf. Sist besøkt 06.05.2018.
- TerraTec AS. (u.d.). TerraPOS User Manual version 2.4.90 - Chapter 6: Geodetic Reference Frames and Transformations. TerraTec AS.
- TerraTec AS. (2018). *Tjenester - TerraPos*. Hentet fra webområde for Terratec AS:
https://www.terratec.no/terrapos/cms/125/72/hent_artikkel/46. Sist besøkt 06.05.2018.
- Topografix. (2004, August 9). *Topografix.com - GPX 1.1 Schema*. Hentet fra webområde for GPX: the GPS Exchange Format: <http://www.topografix.com/GPX/1/1/gpx.xsd>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Torge, W., & Müller, J. (2012). *Geodesy 4th edition*. Hannover: De Gruyter.
- Tveite, H. (2014). *NNJoin 1.2.2 documentation*. Hentet fra webområde for NNJoin:
<http://arken.nmbu.no/~havatv/gis/qgisplugins/NNJoin/#>. Sist besøkt 06.05.2018.
- Tveite, H., & Langaas, S. (1999). An Accuracy Assessment Method for Geographical Line Data Sets Based on Buffering. *International Journal of Geographical Information Science, Vol. 13, Issue 1*, ss. 27-47.
- Wing, M. G. (2008, June 1). Consumer-Grade Global Positioning Systems(GPS) Receiver Performance. *Journal of Forestry, Vol. 106, Issue 4*, ss. 185-190.
- Wing, M. G., Eklund, A., & Kellogg, L. D. (2005, June). Consumer-Grade Global Positioning System(GPS) Accuracy and Reliability. *Journal of Forestry, Vol. 103, Issue 4*, ss. 169-173.
- Wuensch, K. L. (2016, Juni). *Pitman's T: Comparing Variances of Correlated Samples*. Hentet fra webområde for East Carolina University, Department of Psychology, Karl L. Wuensch: core.ecu.edu/psyc/wuenschk/StatHelp/Pitman.docx. Sist besøkt 06.05.2018.
- Øvstedal, O. (2017). *GMGD211_Summere_Trekanter_17. Forelesningsnotat fra GMGD211: Feltkurs i geomatikk*. Ås, Akershus, Norge: Geomatikk - Realtek - NMBU.

Appendiks A

Romlig kobling med «NNJoin»

Her beskrives en generell fremgangsmåte for en romlig kobling av to punktdatasett ved hjelp av plugin «NNJoin» i programvaren QGIS 2.18.3. «NNJoin» er en plugin skrevet av Håvard Tveite, NMBU, som kan koble to vektordatasett basert på nærmeste naboavstand (Tveite, 2014). For punktdatasett går algoritmen gjennom punkt for punkt i «Input layer» og identifiserer nærmeste nabopunkt i «Join layer» (Tveite, 2014). Videre følger en trinnvis fremgangsmåte på bruk av denne algoritmen på to punktdatasett:

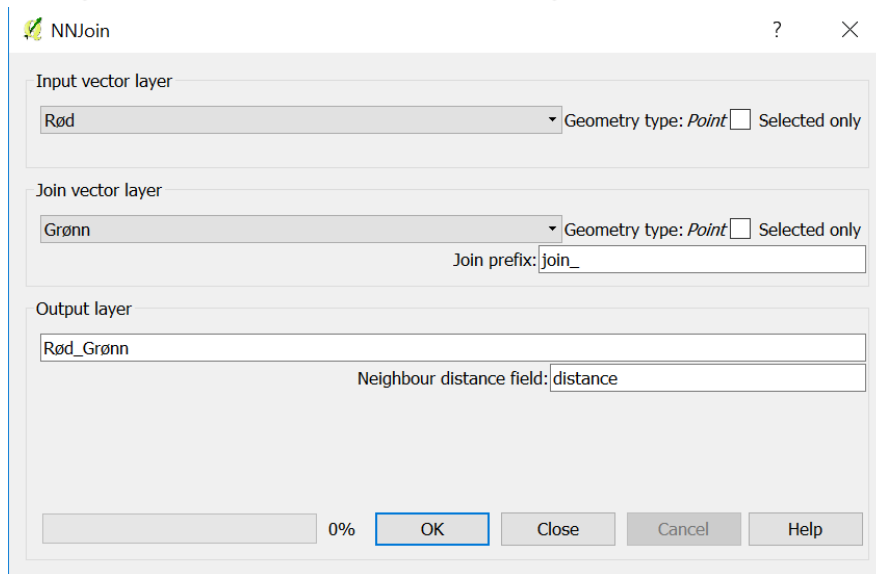
1. Programvaren QGIS har mulighet til å lese tekstfiler med punktobservasjoner der to separate kolonner inneholder hver sin koordinat (QGIS B., 2018) .Dersom punktene ligger i tekstfiler *benyttes Layer → Add Layer → Add Delimited Text Layer..* for å importere de aktuelle punktdatasettene. Det velges å bruke referansesystem EPSG:25832, ETRS89/ UTM zone 32N for begge punktdatasettene.



Figur 60: De aktuelle punktdatasettene som er importert i QGIS og skal romlig kobles ved hjelp av "NNJoin".

Figur 60 viser de aktuelle punktdatasettene som skal kobles.

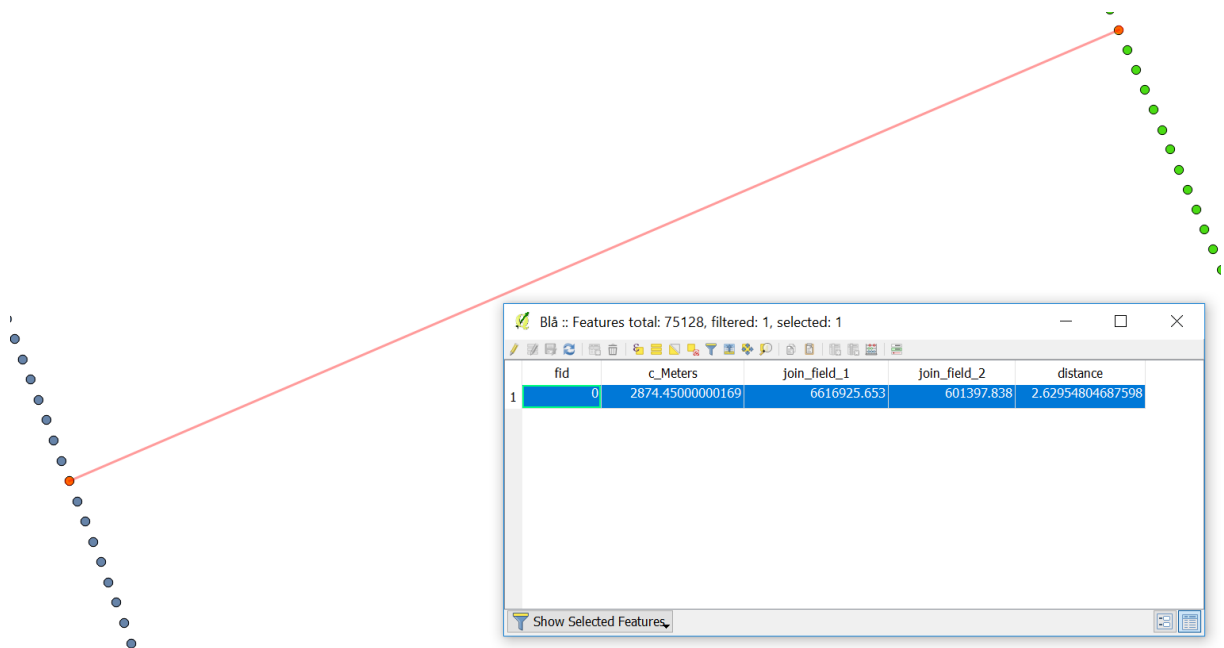
2. Plugin «NNJoin» åpnes i QGIS. Dersom det røde punktdatasettet skal kobles med det grønne punktdatasettet, velges det røde punktdatasettet som «Input vector layer» og det grønne punktdatasettet som «Join vector layer».



Figur 61: Grafisk brukergrensesnitt for "NNJoin" der det røde punktdatasettet skal romlig kobles med det grønne punktdatasettet.

Figur 61 viser det grafiske brukergrensesnittet for «NNJoin» der det røde punktdatasettet skal romlig kobles med det grønne punktdatasettet.

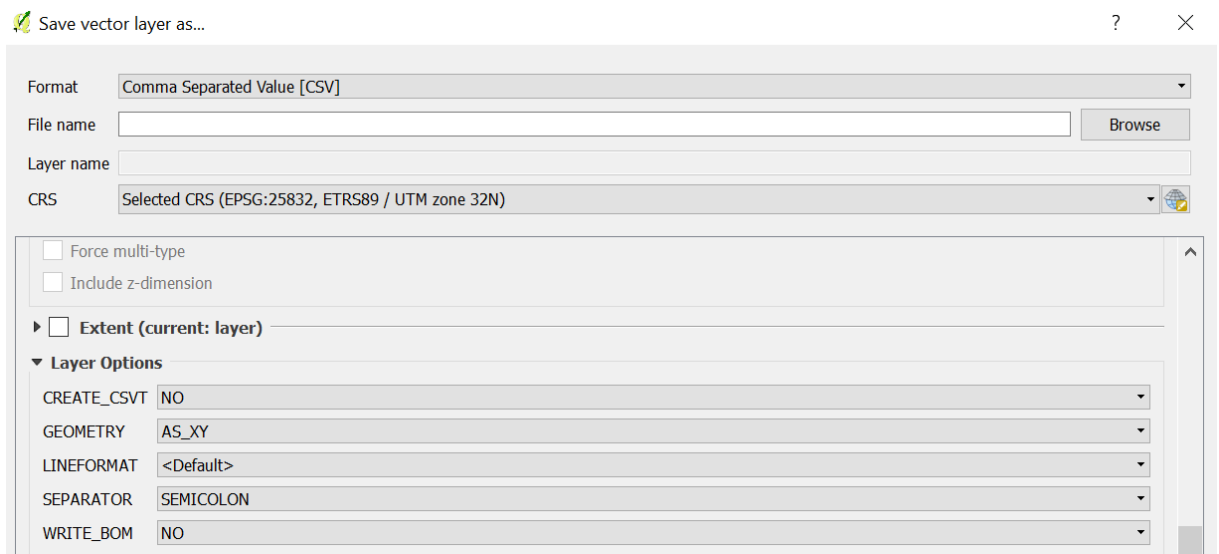
3. Resultatet av den romlige koblingen er et nytt punktdatasett med den samme geometrien som «Input vector layer», dvs. det røde punktdatasettet, men med attributter fra begge punktdatasettene, i tillegg til avstandene til punktene som er koblet (Tveite, 2014). Figur 62 viser resultatet av den romlige koblingen mellom de røde punktene og grønne punktene. Ved bruk av *Open Attribute Table* kan attributtene sammen med nærmeste naboavstand mellom de koblede punktene vises i tabellform.



Figur 62: Resultatet av den romlige koblingen mellom røde punkt og grønne punkt, vist som blå punkt.

I figur 62 vises et eksempel på to punkt i de to punktdatasettene som er romlig koblet basert på nærmeste naboavstand. Den røde linjen angir hvilke punkt som er koblet sammen. I figuren vises også tabellen til det nye, blå punktdatasettet med de nye kolonnene «join_field_1», «join_field_2» og «distance», som henholdsvis angir koordinatene til det nærmeste nabopunktet i det grønne punktdatasettet og avstanden til dette punktet.

4. Det nye koblede punktdatasettet lagres som en fil på CSV-format med punktgeometri i XY-komponenter med *Save As...*



Figur 63: Lagring av det nye koblede punktdatasettet.

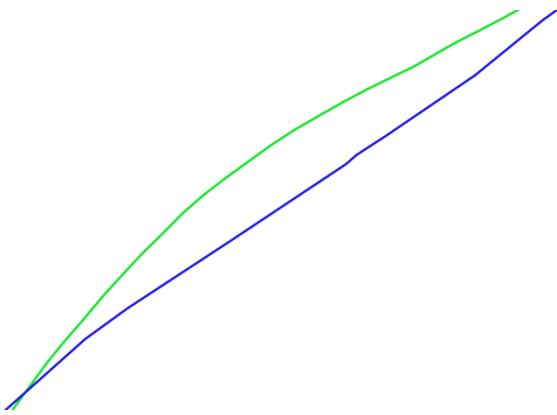
Figur 63 viser det grafiske brukergrensesnittet for lagring av det nye koblede punktdatasettet. Ved lagring brukes GDAL/OGR. GDAL – «Geospatial Data Abstraction Library» er et konverteringsbibliotek for raster- og vekordataformater som benyttes av QGIS (QGIS C., 2018). Under «Layer Options» er det mulig å eksportere punktgeometri som X og Y- komponenter. I den eksporterte CSV-filen legges det til nye kolonner med de aktuelle geometrikomponentene (GDAL/OGR contributors, 2018), dvs. koordinatene til punktene gitt i det valgte koordinatsystemet, nærmere bestemt EPSG:25832, ETRS89/UTM zone 32N.

Appendiks B

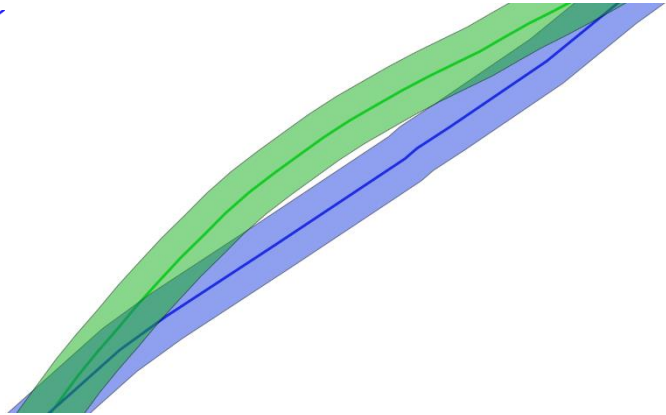
BOS-metoden

Her beskrives fremgangsmåten for implementasjon av BOS-metoden i programvaren QGIS 2.18.3 for beregning av gjennomsnittlig forskyvning av en linje X av ukjent kvalitet relativt til en linje Q av kjent kvalitet (Tveite & Langaas, 1999). Metoden tar i bruk funksjoner som er tilgjengelig i de fleste GIS-programvarer (Tveite & Langaas, 1999). Videre følger en trinnvis beskrivelse av fremgangsmåten som brukt i denne oppgaven:

1. Med funksjonen *Vector* → *Geoprocessing Tools* → *Fixed distance buffer* (QGIS D., 2018) velges en bufferstørrelse i rundt begge linjene X og Q.



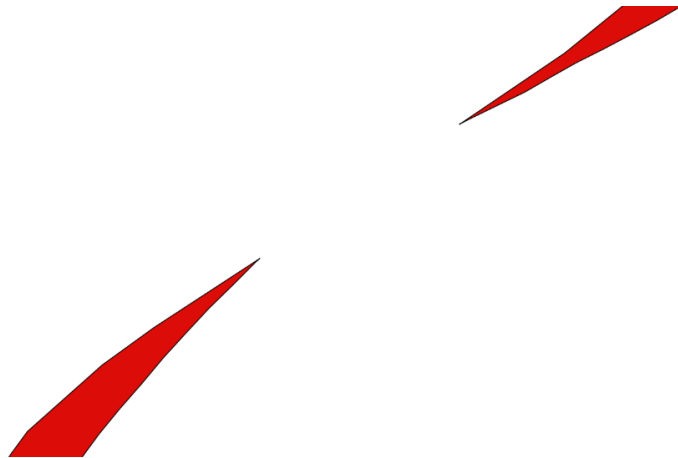
Figur 64: Linjene X og Q før bufferoperasjonen.



Figur 65: Polygonene XB og QB etter bufferoperasjonen.

Figur 64 illustrerer linjene før bufferoperasjonen og figur 65 illustrerer polygonene XB og QB som resultat av bufferoperasjonen.

2. Med funksjonen *Vector* → *Geoprocessing Tools* → *Intersection* (QGIS D., 2018) gjøres en overlay for å finne områder av polygonene XB og QB som overlapper.



Figur 66: Overlappende områder av XB og QB.

Figur 66 viser resultatet av funksjonen og de overlappende områdene mellom de to polygonene. Det resulterende polygonet kalles XBQB.

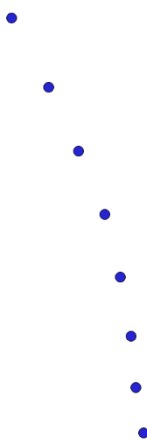
3. Med funksjonen *Open Field Calculator* → *Geometry* → *\$area* (QGIS A., 2018) beregnes arealene av de aktuelle polygonene XB, QB og XBQB. For å finne arealet utenfor polygonen XB og innenfor polygonen QB subtraheres arealet av XBQB fra arealet av QB. De beregnede arealene settes så inn i formel fra metodebeskrivelsen av BOS-metoden for beregning av gjennomsnittlig forskyvning av linjen X i forhold til linjen Q for bufferstørrelsen i .
4. Trinn 1, 2 og 3 gjentas fram til den gjennomsnittlige forskyvningen er beregnet for alle bufferstørrelser i .

Appendiks C

Sampling av nye punkt langs en linje

Her beskrives fremgangsmåten som er brukt for sampling av nye punkt langs en linje ved bruk av programvaren QGIS 2.18.3. Videre følger en trinnvis beskrivelse av fremgangsmåten:

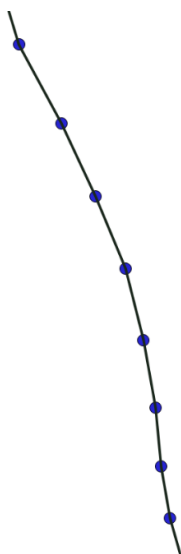
1. Programvaren QGIS har mulighet til å lese tekstfiler med punktobservasjoner der to separate kolonner inneholder hver sin koordinat (QGIS B., 2018). Dersom punktene ligger i en tekstfil, velges *Layer* → *Add Layer* → *Add Delimited Text Layer*. Det velges å benytte referansesystem EPSG:25832, ETRS89/ UTM zone 32N for det aktuelle punktdatasettet.



Figur 67: Importerte punktobservasjoner i QGIS.

Figur 67 viser et eksempel på punkter som er importert.

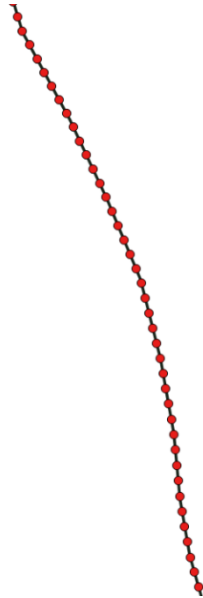
2. Ved bruk av plugin «Points2One» kobles punktene sammen til en linje (Kapusta, 2015).



Figur 68: De importerte punktene koblet sammen med linjer.

Figur 68 viser de importerte punktene som er koblet sammen med rette linjestykker. Til sammen danner de en sammenhengende linje gjennom alle de importerte punktene.

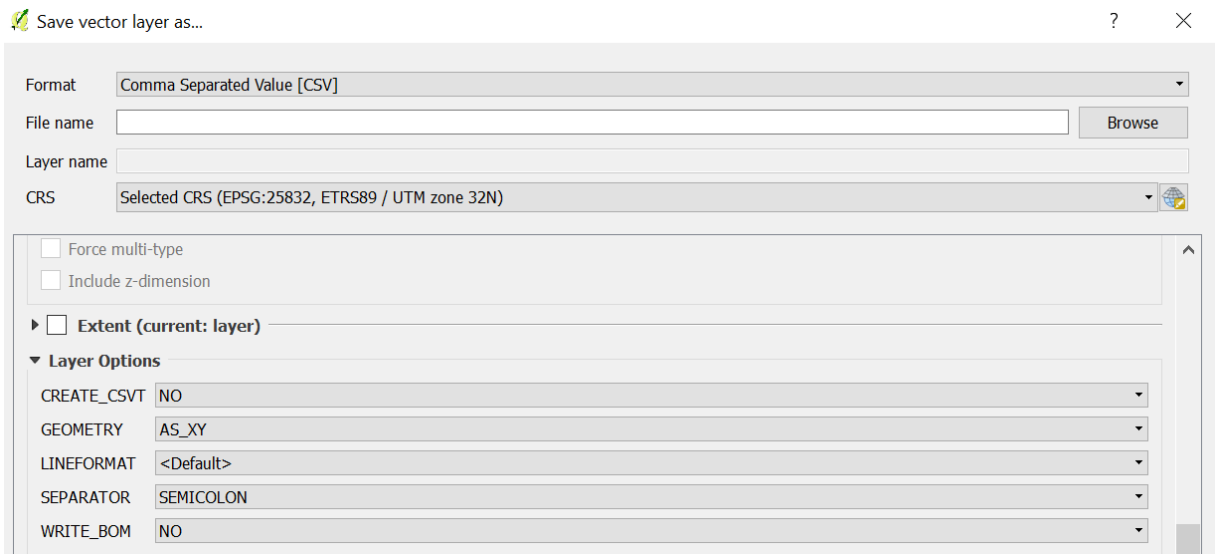
3. Ved bruk av plugin «QChainage» dannes et nytt punktdatasett der punktene har en spesifisert separasjonsavstand langs den sammenhengende linjen (Macho, 2017).



Figur 69: De nye, samlede punktene med en spesifisert avstand mellom punktene langs linjen.

Figur 69 viser de nye, samlede punktene langs den sammenhengende linjen som røde punkt.

4. Det nye samlede punktdatasettet lagres som en fil på CSV-format med punktgeometri i XY-komponenter med *Save As...*



Figur 70: Lagring av det nye koblede punktdatasettet.

Figur 70 viser det grafiske brukergrensesnittet for lagring av det nye koblede punktdatasettet. Ved lagring brukes GDAL/OGR. GDAL – «Geospatial Data Abstraction Library» er et konverteringsbibliotek for raster- og vekordataformater som benyttes av QGIS (QGIS C., 2018). Under «Layer Options» er det mulig å eksportere punktgeometri som X og Y- komponenter. I den eksporterte CSV-filen legges det til nye kolonner med de aktuelle geometrikomponentene (GDAL/OGR contributors, 2018), dvs. koordinatene til de samlede punktene gitt i det valgte koordinatsystemet, altså EPSG:25832, ETRS89/UTM zone 32N.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway