



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultetet for realfag og teknologi
Jon Glenn Omholt Gjevestad

En kvalitetsundersøkelse av GNSS-systemene Galileo og BeiDou

A quality assessment of the GNSS systems Galileo and BeiDou

Ole Jørgen Halle

Geomatikk

Sammendrag

Denne oppgaven gir et innblikk i de to nye GNSS-systemene, Galileo og BeiDou, som i undersøkelsesperioden ikke var fullt operative. Vi skal se at de er bygd opp noe ulikt i forhold til det vi allerede kjenner til, GPS og GLONASS. Samtidig skal vi se at vi er på god vei til å oppnå en høyere nøyaktighet når vi legger til disse nye systemene. BeiDou er kjent for å ha andre typer satellittbaner som skal bidra til å gi en høyere nøyaktighet i Asia. Vi skal da se nærmere på hvor mye bedre nøyaktigheten blir i Asia i forhold til andre deler av verden med BeiDou.

For å se på nøyaktigheten og hvor mye bedre nøyaktighet vi kan oppnå ved bruk av Galileo og BeiDou, er det blitt utført en feltdel i Ås med kinematiske målinger knyttet til 23 kontrollpunkter som vi har faste koordinater til. For å se på nøyaktigheten rundt i verden benytter vi oss av statiske IGS-stasjoner som kontinuerlig logger data. Stasjonene som er brukt i oppgaven er fordelt jevnt rundt i verden. I prosesseringene skal vi bruke teknikker som SPS, PPP og DGNSS til å se på nøyaktigheten i form av RMS-verdier. Med nesten 300 prosesseringer skal vi se på alle mulige kombinasjoner av de ulike systemene for så å se etter styrker og svakheter i systemene.

Undersøkelsen har vist at alle systemene kan brukes alene, med unntak av BeiDou i andre deler av verden enn Asia, men at det er GPS gir oss den høyeste nøyaktigheten. Undersøkelsen viser at dersom vi legger til Galileo med GPS og GLONASS, vil nøyaktigheten øke med 37% med SPS og 31% med PPP i Ås. Dersom vi inkluderer BeiDou med GPS, GLONASS og Galileo øker nøyaktigheten med 6% med SPS, men minker med 51% ved PPP i Ås. Det er altså ikke anbefalt å bruke BeiDou i Norge enda. I Asia får vi 8% høyere nøyaktighet ved bruk av BeiDou i den samme testen mot dersom vi er i områder med dårlig BeiDou-dekning. Ved sammenlikninger skal vi se at bidraget til GLONASS er svakere enn de andre. QZSS er svært dårlig dersom vi inkluderer dette i prosessering i Norge. Nøyaktigheten minker med hele 600%, men i lokale områder i Asia viser undersøkelsen at vi får 5% høyere nøyaktighet ved å inkludere QZSS med de andre fire systemene.

Abstract

This thesis provides an insight into the two new GNSS systems, Galileo and BeiDou, which in the test period were not fully operational. We'll see that they are a bit different compared to what we already know, GPS and GLONASS. At the same time, we are going to see that we are well on our way to achieving a higher accuracy when we add these new systems. BeiDou is known for having other types of satellite orbits that will help provide a higher accuracy in Asia. We will then examine how much better the accuracy will be in Asia compared to other parts of the world with BeiDou.

To look at the accuracy and how much better accuracy we can achieve using Galileo and BeiDou, a field section has been carried out in Ås with kinematic measurements related to 23 checkpoints to which we have fixed coordinates. To look at the accuracy around the world, we are using static IGS-stations that continually log data. The stations used in the task are distributed evenly around the world. In the processing, we are going to use techniques such as SPS, PPP and DGNSS to look at the accuracy in terms of RMS values. With nearly 300 procession, we'll look at all possible combinations of the different systems and then look for strengths and weaknesses in these systems.

The survey has shown that all systems can be used alone, with the exception of BeiDou in other parts of the world than Asia, but that it is GPS that gives us the highest accuracy. The survey shows that if we add Galileo with GPS and GLONASS, the accuracy will increase by 37% with SPS and 31% with PPP in Ås. If we include BeiDou with GPS, GLONASS and Galileo increases accuracy by 6% with SPS, but decreases by 51% at PPP in Ås. It is therefore not recommended to use BeiDou in Norway yet. In Asia, we get 8% higher accuracy when using BeiDou in the same test against if we are in areas with poor BeiDou coverage. When comparing, we will see that the system GLONASS is weaker than the others. QZSS is very bad if we include this in processing in Norway. The accuracy decreases by 600%, but in local areas in Asia, the survey shows that we get 5% higher accuracy by including QZSS with the other four systems.

Forord

Jeg vil med dette avslutte mitt 5-årige studium i Geomatikk på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

Takk til min veileder Jon Glenn Omholt Gjevestad for gode innspill og bidrag i forbindelse med denne oppgaven. Takk til TerraTec As med Ingrid Johnsbråten i forbindelse med utlån og opplæring av utstyr og Dr. Narve Schipper Kjørvik for lisens og opplæring i programvaren TerraPos.

Takk for all hjelp og støtte av venner og familie i forbindelse med oppgaven.

Innhold

Sammendrag	ii
Abstract	iv
Forord.....	vi
Figurer	x
Tabeller	xii
1. Innledning.....	1
1.1. Historie om GNSS.....	1
1.2. Problemstilling	2
2 Teori	2
2.1. Systembeskrivelse.....	2
2.1.1. <i>Satellittbanene</i>	3
2.1.2. <i>Frekvenser</i>	6
2.2. Grunnprinsippet bak GNSS.....	6
2.3. Beregningsteknikker	8
2.3.1. <i>Singel differensiering</i>	10
2.3.2. <i>Dobbel differensiering</i>	11
2.3.3. <i>Trippel differensiering</i>	12
2.3.4. <i>CPOS</i>	14
2.4. Feilkilder	14
2.4.1. <i>Feilkilder i satellittene</i>	14
2.4.2. <i>Feilkilder i signalet</i>	15
2.4.3. <i>Feilkilder i mottaker</i>	15
2.5. Referansesystemer og referanserammer.....	16
2.5.1. <i>Høyder</i>	17
3. Datainnsamling og metode	18
3.1. Lokal analyse	18
3.1.1. <i>Beregningsgang</i>	21
3.1.2. <i>Resultatoppsett</i>	24
3.2. Global analyse.....	25
3.3. Presisjon og nøyaktighet	28
4. Resultater og kommentarer.....	29
4.1. Resultater fra Ås	30

4.2.	Globale resultater	49
4.3.	Oppsummering av avvikene	57
5.	Diskusjon og konklusjon	60
5.1.	Diskusjon	60
5.2.	Konklusjon.....	61
5.3.	Videre arbeid	63
	Bibliografi.....	64

Figurer

2.1: GPS sine 6 baner	3
2.2: Glonass sine 3 baner.....	3
2.3: Galileo sine 3 baner	4
2.4: BeiDou sine baner.....	4
2.5: QZSS sin bane	5
2.6: IRNSS sine baner.....	5
2.7: forklaring av faseflertydighet (N) i en fasemåling	8
2.8: DGNSS-figur.....	9
2.9: skisse av konseptet singel-differensiering	10
2.10: Skisse av konseptet dobbel differensiering.....	11
2.11: Skisse av konseptet trippel differensiering.....	13
2.12: Koordinater kan uttrykkes som geosentriske koordinater (X, Y, Z), geodetiske koordinater (φ, λ, H), eller kartplankoordinater (Nord, Øst).	16
2.13: Forklaring av høyder som brukes i GNSS-sammenheng.....	17
2.14: Ortometrisk høyde H, er den høyden vi bruker i dag, men den mest korrekte høyden ville vært $h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7$	17
3.1: Ruten over de 23 kontrollpunktene	18
3.2: Prosesseringsgang for lokal forskning med alle de ulike kombinasjonene vi skal se på.....	20
3.3: Kart over turen som er gått med lokasjonen til basestasjonen brukt til DGNSS	21
3.4: Utsnitt fra turen ved punkt 2 med ulike mottakere	23
3.5: Metode for beregning av nøyaktighet til mobil og aktivitetsklokke.....	23
3.6: De ulike kombinasjonene i resultatkapittelet.....	24
3.7: De ulike kombinasjonene når vi skal se på bidraget til Galileo og BeiDou	24
3.8: Kart over BeiDou sine satellittbaner og basestasjonene brukt i beregningene.....	25
3.9: Illustrasjon over alle satellitter som er observert i rinex-filene	27
3.10: Illustrasjon over alle satellittene som er blitt med i prosesseringene	27
3.11: Beskrivelse av presisjon og nøyaktighet	28
4.1: Hvert system alene lokalt, RMS _{3D}	30
4.2: To systemer sammen lokalt, RMS _{3D}	31
4.3: To systemer sammen lokalt uten GPS, RMS _{3D}	32
4.4: Tre systemer sammen lokalt, RMS _{3D}	33
4.5: Alle systemene sammen lokalt, RMS _{3D}	34
4.6: Bidraget til BeiDou lokalt, RMS _{3D}	35

4.7: Bidraget til Galileo lokalt, RMS _{3D}	36
4.8: Polarplott over sikten til punktene med gode og dårlige målinger.....	38
4.9: Bidraget til BeiDou lokalt med god og dårlig sikt, RMS _{3D}	40
4.10: Bidraget til Galileo lokalt med god og dårlig sikt, RMS _{3D}	41
4.11: Antall prosent med fix-løsning til alle kombinasjonene lokalt	43
4.12: Presisjonsstandardavvik på posisjonsberegningen med DGNS tur 2	43
4.13: Antall sekunder hvor vi har mistet fix-løsning.....	44
4.14: Klart over ruta og hvor vi har mistet fix-løsning.....	44
4.15: Bilde 1 til venstre og bilde 2 til høyre, tatt 02.05.2019	45
4.16: Bidraget til Galileo lokalt gjennom hele turen, gjennomsnittlig avvik 3D	46
4.17: Høydekurver til beregningene fra håndholdte GNSS-mottakere	47
4.18: Gjennomsnittlig avvik 3D til ulike beregningsteknikker	48
4.19: Hvert system alene globalt, RMS _{3D}	49
4.20: To systemer sammen globalt, RMS _{3D}	50
4.21: Tre systemer sammen globalt, RMS _{3D}	51
4.22: Alle systemene sammen globalt, RMS _{3D}	52
4.23: Bidraget til Galileo med dårlig BeiDou-dekning, RMS _{3D}	53
4.24: Bidraget til Galileo med god BeiDou-dekning.....	54
4.25: Bidraget til BeiDou med dårlig BeiDou-dekning, RMS _{3D}	55
4.26: Bidraget til BeiDou med god BeiDou-dekning, RMS _{3D}	56

Tabeller

1.1: Generell Systemoversikt.....	2
1.2: Frekvensoversikt.....	6
3.1: Oversikt over utjevnedede koordinater på de 23 punktene.....	19
3.2: Mottakeroversikt over mottakere brukt i Ås	19
3.3: Oversikstabell over stasjonene	25
3.4: Fullstendig satellittoversikt over satellitter som er skutt opp i BeiDou	26
3.5: Statistiske resultater av eksemplene av presisjon og nøyaktighet	28
4.1: Antall satellitter med i prosesseringen i de ulike delene av verden.....	29
4.2: Hvert system alene lokalt, RMS grunnriss og høyde.....	30
4.3: To systemer sammen lokalt, RMS grunnriss og høyde	31
4.4: To systemer sammen lokalt uten GPS, RMS grunnriss og høyde.....	32
4.5: Tre systemer sammen lokalt, RMS grunnriss og høyde	33
4.6: Alle systemene sammen lokalt, RMS grunnriss og høyde	34
4.7: Alle avvikene med kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo med DGNSS	37
4.8: Nye RMS-verdier uten punkt 1 og 1, 4 og 15.....	37
4.9: Alle avvikene med kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo med PPP.....	38
4.10: Differanser mellom RMS-verdiene ved gode og dårlige målinger	42
4.11: Oversikt over avvikene fra håndholdte GNSS-mottakere, enhet meter	46
4.12: Hvert system alene globalt, RMS grunnriss og høyde	49
4.13: To systemer sammen globalt, RMS grunnriss og høyde	50
4.14: Tre systemer sammen globalt, RMS grunnriss og høyde.....	51
4.15: Alle systemene sammen globalt, RMS grunnriss og høyde	52
4.16: Oppsummering av alle RMS 3D verdiene lokalt i Ås.....	57
4.17: Oppsummering av alle RMS 3D verdiene lokalt i Ås med god og dårlig sikt	58
4.18: Oppsummering av alle RMS 3D verdiene globalt	59
5.1: Samlede resultater med økning i prosent fra en kombinasjon til en annen	61
5.2: Samlede resultater av nøyaktigheten til hvert system alene.....	62
5.3: Økningen i prosent mellom ulike kombinasjoner for å teste Galileo og BeiDou mot GPS og GLONASS.....	62

Kapittel 1

1. Innledning

I denne oppgaven skal vi se på de forskjellige GNSS-systemene GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou. GPS og GLONASS har i lang tid vært eksisterende systemer som har fungert ganske bra, men nå nærmer vi oss å ha to nye systemer; Galileo og BeiDou. Disse har som formål å hjelpe privatpersoner, samt bedrifter til å forbedre nøyaktigheten i posisjonsberegning.

1.1. Historie om GNSS

GNSS eller Global Navigation Satellite System er fellesbetegnelsen for satellittnavigasjon og posisjonering. Etter at Sovjetunionen i 1957 klarte å skyte en satellitt i bane rundt jorden, begynte Sovjetunionen å utvikle et navigasjonssystem. Allerede i 1967 ble den første navigasjonssatellitten til Sovjetunionen skutt opp, men da het systemet Tsiklon. Tsiklon var et lav-bane system der satellittene gikk i bane ca. 1000km over jordoverflaten. Frem til 1978 ble det skutt opp 28 Tsiklon-satellitter hvor det derfra gikk over til å heller bruke høy-bane-satellitter. Planleggingen av høy-bane-satellitter startet i 1976, og den første satellitten ble skutt opp i 1982, noe som var starten på det vi i dag kaller GLONASS. GLONASS ble fullt operativt i 1995 (Glonass-iac A, u.å.).

USA fulgte nøye med på hva Sovjetunionen drev på med, og i 1973 ble det klart at USA også skulle utvikle et eget system, GPS. Den første satellitten ble skutt opp i 1978, og allerede i 1993 var systemet fullt operativt (NASA A, 2017). Siden Sovjetunionen ble oppløst i 1991 ble GLONASS svært lite prioritert grunnet økonomi. I 2001 var det kun syv operative GLONASS-satellitter. Fra 2002 til 2011 ble systemet bygget opp igjen. I tiden disse systemene ble utviklet og laget, var hensikten å kunne navigere missiler slik at de skulle kunne treffe hvor som helst i verden fra deres eget land.

Så sent som i 1999 ble det klart at EU ønsket å lage deres eget satellittsystem kalt Galileo (European-Commission. u.å.), etter frykt for at USA kunne skru deres system av for offentligheten dersom en ny verdenskrig skulle oppstå. I en avis-artikkel fra dagbladet sa EUs transportkommissær Jacques Barrot at GPS-systemet har svakheter med dårlig signal i skog og trange gater, og at Galileo skal være bedre enn GPS og sammen med GPS skal offentligheten oppleve en nøyaktighet på en meter. Systemet skal stå ferdig i 2013, sa han (Barrot, 2007). Nå i 2019 opplever vi at systemet fortsatt ikke er operativt, men det loves å være fullt operativt i 2020.

Kina begynte tidlig å lage et eget system som skulle hjelpe sammen med GPS. Planleggingen begynte i 1983, men ikke før i år 2000 ble de to planlagte satellittene skutt opp. Systemet ble operativt i 2003. Tre år senere, i 2006, ble det klart at de ville bygge ut systemet med hele 35 satellitter i tre ulike baner. Fem stykker i geostasjonær bane (GEO), 27 i middels høy bane (MEO) og tre stykker i inklinert geostasjonær bane (IGSO). Systemet skal stå ferdig i 2020 (Glonass-iac B, u.å.).

1.2. Problemstilling

Det vi skal se på i denne oppgaven er nøyaktigheten til systemene Galileo og BeiDou, alene og sammen med GPS og GLONASS. Både EU og Kina sier at systemene de utvikler skal være bedre enn GPS, men vil de klare det etter all erfaring USA har hatt gjennom tiden? BeiDou er et lokalt og globalt system som gjør at denne oppgaven også ser på nøyaktigheten fra ulike steder i verden.

Hovedproblemstillingene denne oppgaven har tatt utgangspunktet i er:

- Hva betyr bidraget til Galileo og BeiDou lokalt og globalt?
- Hvor høy nøyaktighet har systemene alene?
- Vil Galileo og BeiDou klare å gi bedre resultater enn GPS og GLONASS?

Kapittel 2

2 Teori

Før vi begynner å sammenlikne systemene skal vi gå nærmere inn på hvordan systemene er satt opp og hvordan systemene fungerer.

2.1. Systembeskrivelse

Når vi snakker eller leser om systemene er det vanlig å dele informasjonen om systemene i tre deler (Øvstedal, O. 2017):

- Romsegment; den generelle oversikten over systemene.
- Kontrollsegment; infrastrukturen på bakken.
- Brukersegment; mottakerinformasjon.

Systemene gjør i prinsippet akkurat det samme, men er satt opp litt ulikt når vi ser på romsegmentene til de ulike (NASA B, 2014; Glonass-iac, A. u.å.; ESA, A, 2011; Glonass-iac, B. u.å.;).

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Antall satellitter	24	24	30	35
Antall baneplan	6	3	3	3*
Omløpstid	11t 58 min	11t 16min	14t 15 min	12t 53 min*
Banehøyde	20200 km	19100 km	23222 km	21500km*
Inklinasjonsvinkel	55°	64,8°	56°	55°*

Tabell 1.1: Generell Systemoversikt

*Gjelder kun for MEO-satellittene i BeiDou systemet

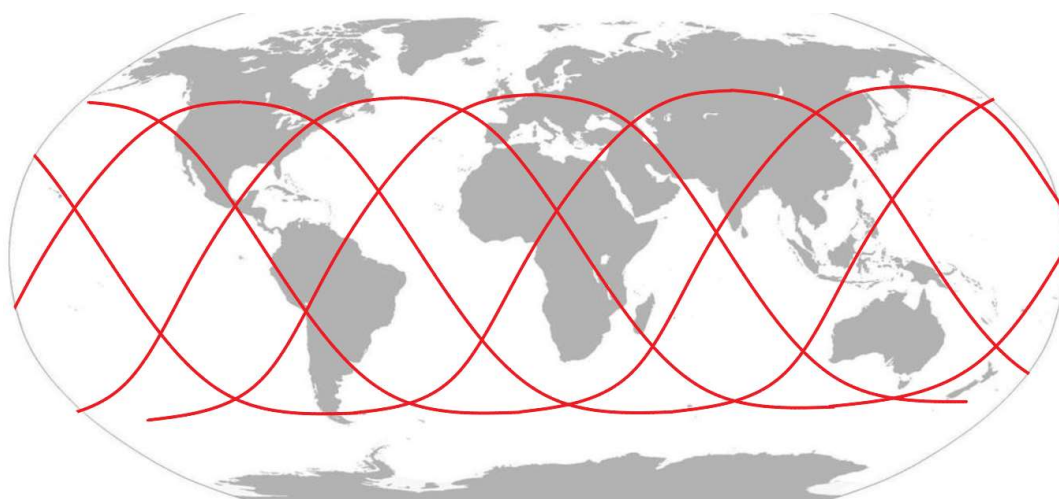
Per 06.05.2019 er det 22 operative Galileo-satellitter og 33 BeiDou-satellitter (ESA, F, 2019; Glonass-iac C, 2019).

Inklinasjonsvinkel er vinkelen satellittene har mellom banen til satellitten og ekvator når satellitten står normalt over ekvator. En inklinaingsvinkel på 0° vil gå langs med ekvator, og en inklinaingsvinkel på 90° vil satellittene gå over polene.

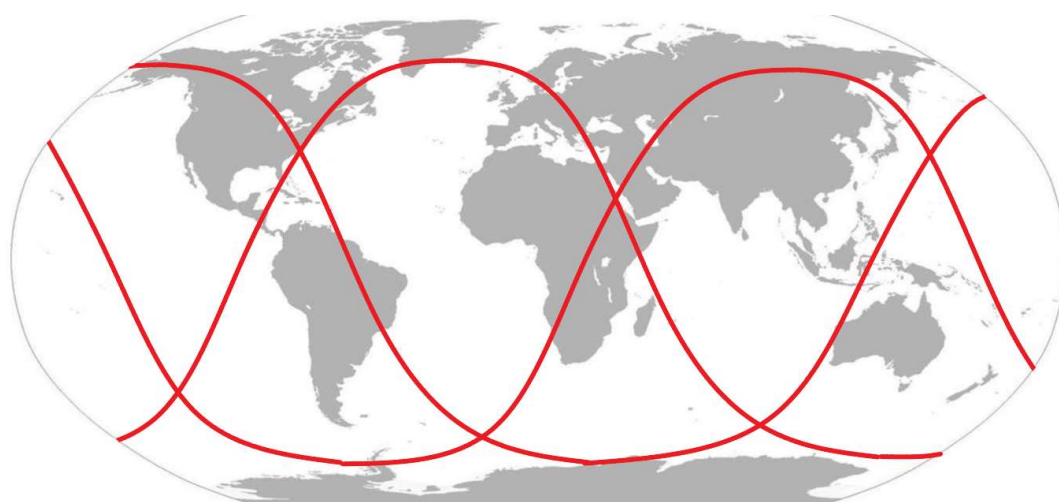
Styrken til GPS er den totale globale dekningen. GPS begynte utviklingen senere enn GLONASS, men har siden systemet ble fullt operativt vært verdensledende innen teknologien. GLONASS sitt system har en stor styrke i rekkevidde i nord og sør, hovedsakelig for å få bedre dekning i hele Russland. Galileo sin styrke er å ha veldig presise klokker i satellittene, atomklokker. BeiDou har utviklet et system med veldig spesielle baner.

2.1.1. Satellittbanene

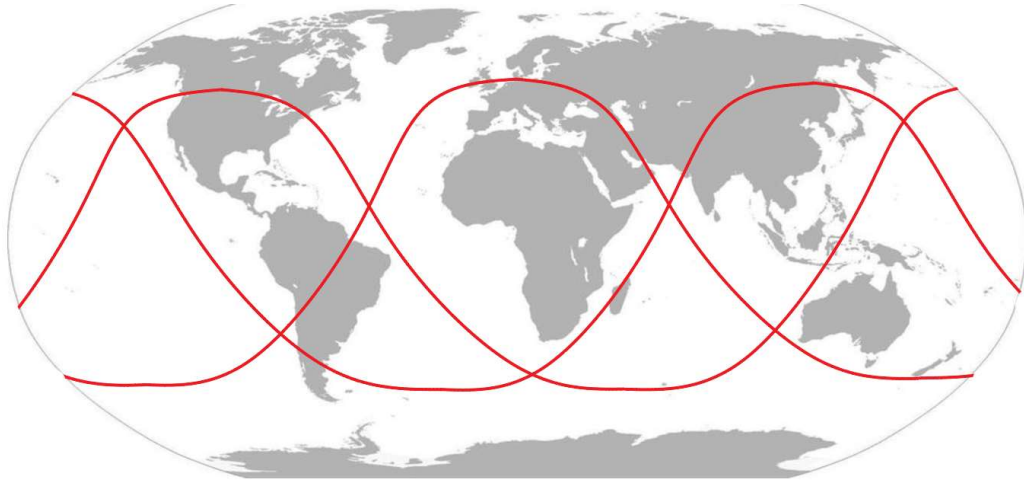
Under ser vi er fremstilling av hvordan de ulike banene til systemene har:



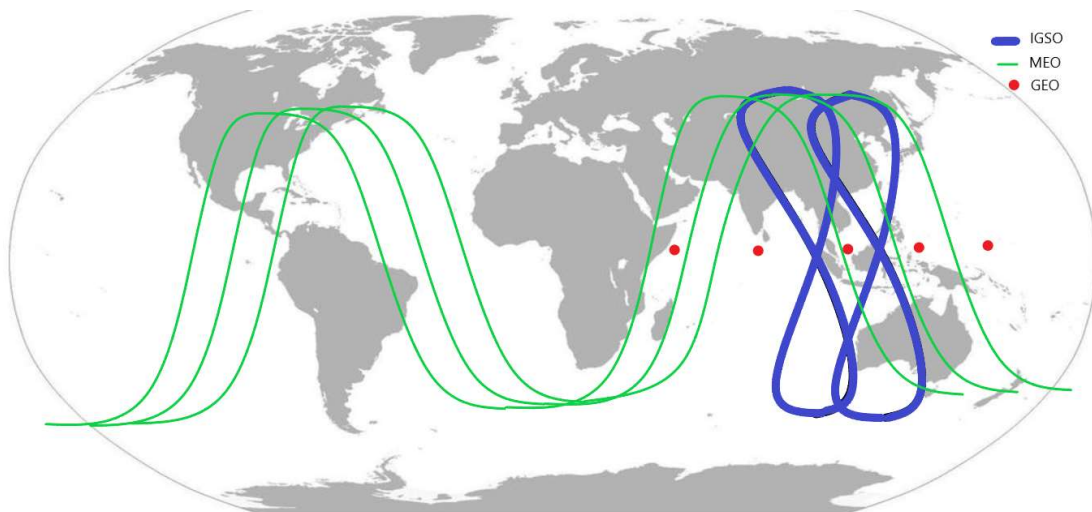
Figur 2.1: GPS sine 6 baner



Figur 2.2: GLONASS sine 3 baner



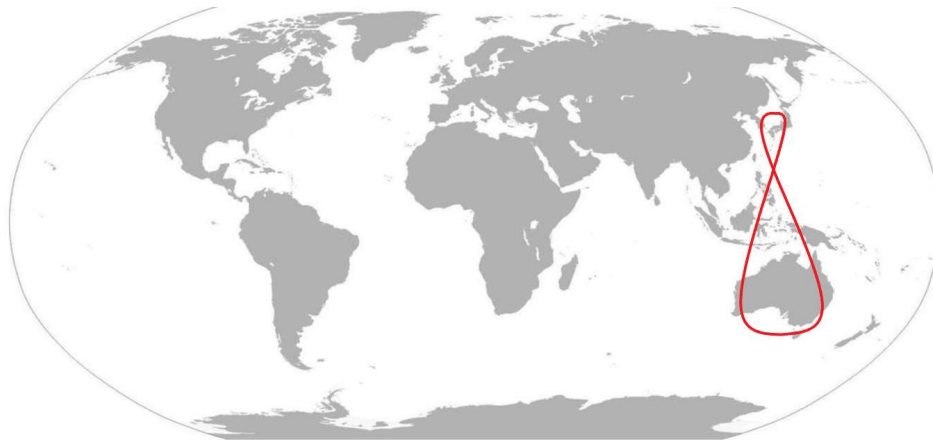
Figur 2.3: Galileo sine 3 baner



Figur 2.4: BeiDou sine baner

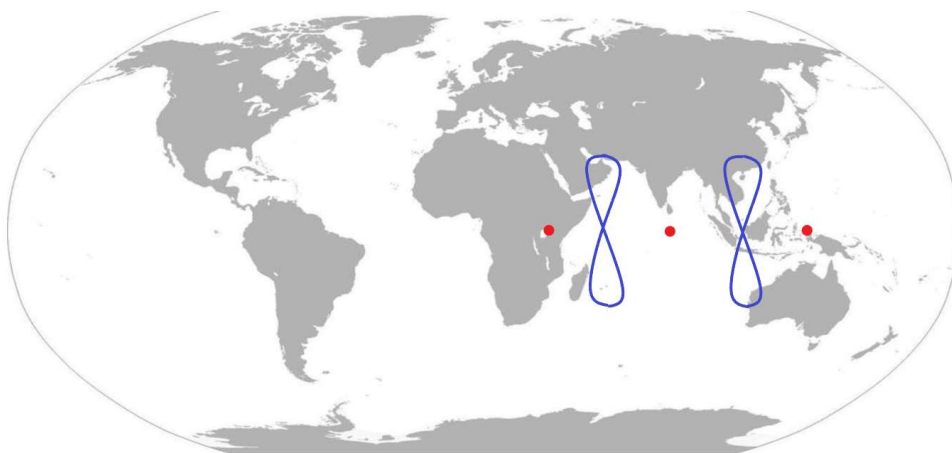
Ser vi på figur 2.4 av BeiDou sine baner, ser vi tre MEO-baner (*Medium Earth Orbit*), to IGSO-baner (*Inclined Geosynchronous Orbit*) og fem geostasjonære satellitter (GEO). IGSO-banene er en blanding av GEO-banene og MEO-banene. De er satellitter med samme høyde som de geostasjonære, men de har en inklinasjonsvinkel som gjør at de går i et liknende åttetallsformet bane.

Foreløpig har vi sett på de fire hovedsystemene. Det finnes også to regionale systemer som er blitt laget for å få bedre dekning i små deler av verden. Her har vi det japanske systemet QZSS (Quazi-Zenit Satellite System) og det indiske systemet IRNSS/NavIC (Indian Regional Navigation Satellite System) (Cabinet Office. u.å.; EoPortal. u.å.).



Figur 2.5: QZSS sin bane

QZSS ble fullt operativt i 2018 og har fire satellitter i en IGSO-bane. Like etter at det ble fullt operativt ble det klart at de ønsket å utvide systemet med tre nye satellitter innen 2023.



Figur 2.6: IRNSS sine baner

IRNSS ble også fullt operativt i 2018 og består av fire satellitter fordelt i to IGSO-baner og tre satellitter i geostasjonær bane.

2.1.2. Frekvenser

For å benytte seg av flere og ulike beregningsmetoder av posisjon sender satellittene ut flere signaler. Alle systemene sender ut flere signaler på ulike frekvenser for å skille dem (ESA, B, 2014; Glonass-iac, A. u.å.; ESA, C, 2019; Glonass-iac, B. u.å.).

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Bånd: Frekvens	L1: 1575.420	L1OF: 1602.000	E1: 1575.420	B1: 1575.420
	L2: 1227.600	L2OF: 1246.000	E5: 1278.750	B2: 1191.790
	L5: 1176.450	L1OC: 1600.000	E6: 1191.795	B3: 1268.520
		L2OC: 1248.000		
L3OC: 1202.000				

Tabell 1.2: Frekvensoversikt, enhet er mHz

Ser vi på signalene til GPS, Galileo og BeiDou og de tre nederste til GLONASS, L1OC, L2OC og L3OC, ser vi at frekvensene på hvert bånd er relativt like. Her benyttes en teknikk som heter CDMA (Code Division Multiple Access). Det er en kode som klarer å skille flere signaler som går på samme frekvens, slik at vi klarer å skille de ulike systemene på signalene. GLONASS har siden oppstart av deres system benyttet seg av en annen teknikk FDMA (Frequency Division Multiple Access). Her sender hver satellitt signalene sine på ulike frekvenser. Over tid har GLONASS gått mer og mer over til CDMA, men de henger fortsatt litt igjen med frekvensene L1OF og L2OF som går på FDMA (ESA, D, 2018).

2.2. Grunnprinsippet bak GNSS

Global Navigation Satellite System er en fellesbetegnelse for alle posisjoneringssystemer. GNSS blir stadig mer brukt, og vi er svært avhengige av å få en mer nøyaktig posisjonering. Men hvordan kan det ha seg slik at satellitter flere tusen kilometer unna klarer å kartlegge hvor en mottaker befinner seg på jordoverflaten?

Navigasjonssystemer baserer seg på avstandsmåling og estimeringsteknikker. Når Galileo og BeiDou er på plass, skal det være mulig å få inn signaler fra over 35 satellitter samtidig. Det betyr over 35 avstandsmålinger som skal bidra til å beregne posisjon vår. Det som gjør posisjoneringen vanskelig, er at det å beregne avstandene fra hver satellitt til mottakeren. Det er to måter å måle avstandene på:

- Kode
- Fase

Et eksempel på en mottaker som benytter seg av kode-måling, er mobilen vår. Mottakere som regner ut avstanden med fase-måling er gjerne svært dyre mottakere og blir som regel kun brukt av bedrifter.

Når vi åpner en kartapplikasjon på telefonen vår, starter telefonen med å få signaler fra satellittene. Fra hver enkelt satellitt sendes det ut en kode. Denne koden inneholder klokkeslettet da signalet ble sendt ut fra satellitten og efemeridedata som vi bruker for å beregne satellittens posisjon i det gitte klokkeslettet. Når signalet blir mottatt i telefonen blir et annet klokkestett notert, tar vi da differansen av de to klokkeslettene får vi tiden signalet brukte fra satellitten til mottakeren. Siden vi vet at en frekvens reiser med lysets

hastighet, kan vi enkelt regne ut avstanden på signalet. Derfor er presise klokker, svært viktig i en posisjonsberegning.

Bruker vi litt dyrere mottakere som kan måle avstanden på fasen, regnes avstanden fra satellitten til mottakeren direkte på signalet. Signalene fra satellittene er kjente frekvenser, hvor avstanden blir beregnet ut ifra antall bølger som blir sendt på frekvensen når vi fra før vet bølgelengden. Denne metoden er svært nøyaktig.

Når vi har fått inn satellittkoordinater og avstander i et spesifikt klokkeslett, begynner estimeringsteknikkene. Typisk brukes et kalmanfilter som vekter målingene, ved at de målingene som er mer presise enn andre, skal telle mer. Dette er en iterativ prosess som begynner med at vi tipper hvor vi befinner oss. Da har vi noen foreløpige koordinater om hvor vi befinner oss. Vi kan da regne ut en geometrisk avstand basert på koordinatene til satellittene og koordinatene til mottakeren vår:

$$Avstand = \sqrt{(X_s - X_m)^2 + (Y_s - Y_m)^2 + (Z_s - Z_m)^2} \quad (2,1)$$

$s = \text{satellitt}$

$m = \text{mottaker}$

Denne avstanden blir testet mot den målte avstanden fra alle satellittene. Dersom den målte avstanden er ganske lik den geometriske avstanden fra en satellitt, skal posisjonen korrigeres minst vekk fra denne. Er den geometriske avstanden langt unna det samme som den målte fra en annen satellitt, blir posisjonen «dratt» mer mot denne satellitten for å få den målte avstanden og den geometriske avstanden mer lik hverandre.

For å sette opp en enklere oversikt over parameterne som er med i beregningene av kode og fase målingene, setter man opp observasjonslikningene:

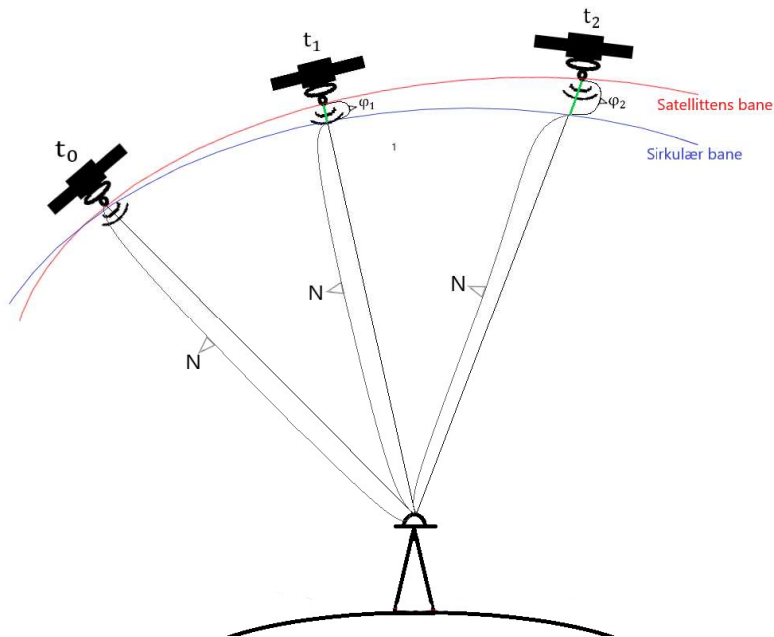
$$R_r^s = \rho_r^s + c\Delta\delta_r^s \quad (2,2)$$

$$\varphi_r^s = \frac{1}{\lambda^j} \rho_r^s + \Delta\delta_r^s + N^s \quad (2,3)$$

$s = \text{satellite}$

$r = \text{reciver}$

Formel (2,2) er kode-observasjonslikningen og formel (2,3) er fase-observasjonslikningen med observasjonene som er mellom mottaker og satellittene. Parameteren ρ er i begge likningene den geometriske avstanden som vist i formel (2,1) og $\Delta\delta_r^s$ er klokkeforskjellen i mottaker og satellitt. I fase-observasjonslikningen har vi en ekstra parameter, N, dette er faseflertydigheten. Når mottakeren skrur på og mottar signaler beregnes det ved første måling (tiden t_0) hvor mange hele bølger som blir sendt mellom mottakeren og hver av satellittene. Dette er et heltall som blir låst helt til signalet blir brutt. Fasemålingene som blir gjort er da endringen mellom satellitten og faseflertydigheten N, se figur 2,7 (Øvstedal, O, 2017).



Figur 2.7: forklaring av faseflertydighet (N)

Slik vi kjenner nøyaktigheten i dag med GPS og GLONASS, får vi en nøyaktighet på tre til fem meter med kode-måling. Med Galileo loves det en nøyaktighet på under én meter. Ved fasemåling kan vi ved spesielle teknikker få en nøyaktighet helt ned på centimeters nivå.

2.3. Beregningsteknikker

Kode- og fase-målingene brukes statisk og kinematisk. Statisk måling skjer når en mottaker står i ro, mens kinematisk måling er når mottakeren er i bevegelse. For kinematisk beregning finnes det teknikker for å oppnå høy nøyaktighet mens man måler, RTK (Real Time Kinematic). I Norge bruker vi et system utviklet av kartverket, CPOS. Innenfor dekningsområdet kan vi oppnå nøyaktighet på rundt én centimeter i sanntid. For høyere nøyaktighet på resultatet, logges det rådata fra satellittene for så å utføre prosessering i etterkant. I denne oppgaven blir det brukt tre etterprosesserings-teknikker, SPS, PPP og DGNS (ESA, E, 2015).

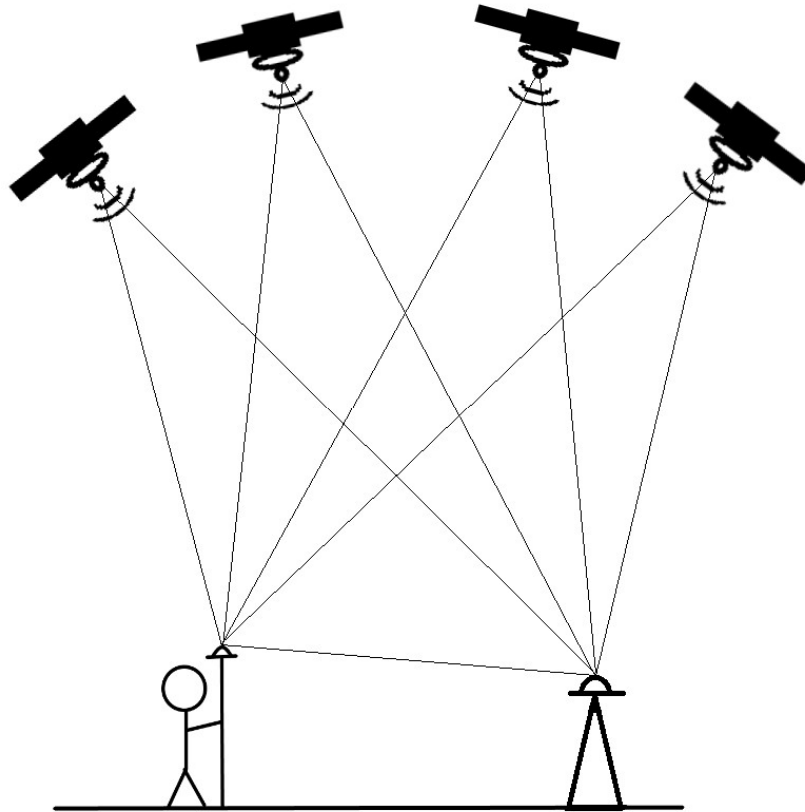
Den første etterprosesseringen vi skal gå inn på er SPS (Standard Point Service). Dette er en teknikk som beregner posisjon kun på koden. For prosessering med faseobservasjonene brukes teknikken PPP (Precise Point Positioning).

I etterprosesseringen tilfører vi tre filer som enkelt lastes ned fra IGS-databasene. Filene er data om satellittene fra bakkestasjoner som logger kontinuerlig slik at vi får mer presise data om satellittene i den perioden vi målte:

- Presise banedata
- Klokkekorreksjonsdata
- Jordrotasjonskorreksjon

Med disse parameterne i beregningen blir dette den mest presise metoden dersom vi skal finne posisjonen til en enkelt mottaker alene.

For å oppnå den høyeste nøyaktigheten benyttes teknikken DGNS (Differensiell GNSS). I en etterprosessering med DGNS, benyttes en ekstra mottaker som står i ro mens du er ute og måler kinematisk.



Figur 2.8: DGNS-figur

Avstandene mellom satellittene og mottakerne er svært store, men avstanden mellom en bakkestasjon og der vi står er veldig liten i forhold, noe som gjør posisjonsberegningen mer nøyaktig. Bakkestasjonene er også satt opp annerledes siden den allerede står på et punkt med faste koordinater. I stedet for å beregne mottakerens posisjon, brukes bakkemottakeren til å beregne satellittenes posisjon. Navnet differensiering bygger seg på at vi regner differanser mellom enten mottakeren vi har (rover) og den statiske bakkemottakeren (base), eller mellom mottakerne og satellittene. Dette fører til at vi matematisk slipper å beregne alle de ukjente som er med i observasjonslikningen. Etter en dobbeltdifferensiering slipper vi å estimere klokkefeilen mellom mottaker og satellittene. Vi kan da vekte mer på estimeringen av faseflertydigheten. I starten forsøkes det å beregne på desimalene til heltallet til faseflertydigheten, da er vi i en tilstand kalt «Float». Når vi har funnet de korrekte faseflertydighetene til de ulike satellittene, kan vi se bort ifra å estimere denne. Da er vi i en tilstand kalt «fix». Her ser vi en nøyaktighet på rundt én centimeter ved RTK-målinger og nærmere millimeter nøyaktighet ved etterprosessering. Siden vi skal se på resultater med DGNS-målinger, skal vi nå se nærmere på hva dette er matematisk (Hoffmann-Wellenhof, L., 2008).

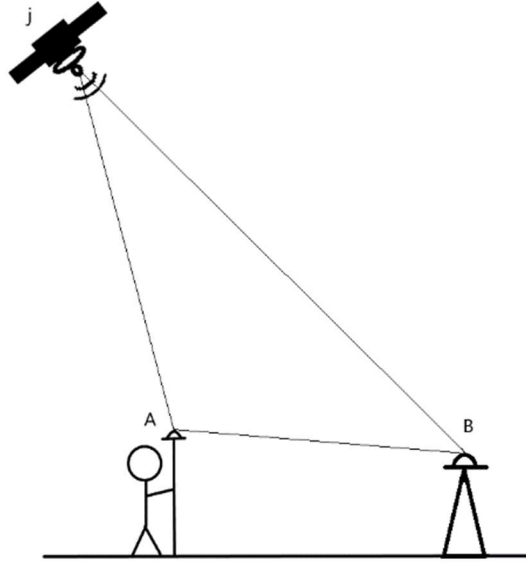
Differensiering med GNSS deler vi opp i tre faser, singel-, dobbel- og trippel-differensiering. Først ser vi på singel-differensiering.

2.3.1. Singel differensiering

Fra formel 2.3 har vi tidligere sett at observasjonslikningen for fase er:

$$\varphi_r^s = \frac{1}{\lambda^j} \rho_r^s + \Delta\delta_r^s + N^s \quad (2,4)$$

$$\Delta\delta_r^s = f^j \delta_A - f^j \delta^s$$



Figur 2.9: skisse av konseptet singel-differensiering

Hovedmålet med differensiell måling er å få presise koordinater til mottaker A. Mottaker B er en fast basestasjon med kjente koordinater. I dette tilfellet skal vi se hva som skjer i en enkelt satellitt, mens i en reel måling skjer dette i alle målingene mellom alle satellittene som er involvert. Det første vi gjør er å sette opp observasjonslikningen for både rover (mottaker A) og base (mottaker B):

$$\varphi_A^j + f^j \delta^s = \frac{1}{\lambda^j} \rho_A^j + f^j \delta_A + N_A^j \quad (2,5)$$

$$\varphi_B^j + f^j \delta^s = \frac{1}{\lambda^j} \rho_B^j + f^j \delta_B + N_B^j$$

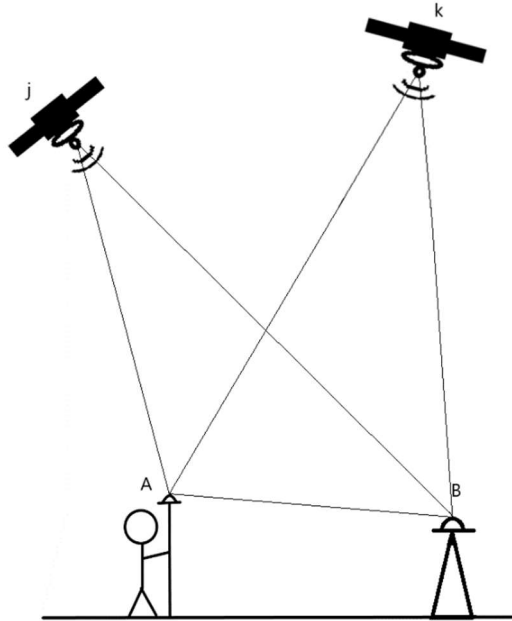
Det som skjer ved en differensiering, er at vi trekker φ_B^j fra φ_A^j . Da forsvinner klokkekorreksjonen i satellitten $f^j \delta^s$.

$$\varphi_B^j - \varphi_A^j = \left(\frac{1}{\lambda^j} \rho_B^j - \frac{1}{\lambda^j} \rho_A^j \right) + (\delta_B - \delta_A) + (N_B^j - N_A^j) + (f^j \delta^s - f^j \delta^s) \quad (2,6)$$

$$\varphi_{AB}^j = \frac{1}{\lambda^j} \rho_{AB}^j + f^j \delta_{AB} + N_{AB}^j$$

2.3.2. Dobbel differensiering

Ved en dobbelt-differensiering bruker vi formel (2.6) til differensiering, nå mellom satellittene.



Figur 2.10: Skisse av konseptet dobbel-differensiering

Ved en dobbel-differensiering har vi to ulike muligheter. Satellitter sender signalene sine på like og ulike frekvenser. Så vi ser først på tilfelle hvor frekvensene er like.

Tilfelle 1, $f = f^j = f^k$ (da er også $\lambda = \lambda^j = \lambda^k$):

Vi bruker sluttformelen i singel-differensiering 2.6, men med to satellitter, j og k, med lik frekvens:

$$\varphi_{AB}^j = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j + f \delta_{AB} + N_{AB}^j \quad (2,7)$$

$$\varphi_{AB}^k = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k + f \delta_{AB} + N_{AB}^k$$

I dette tilfelle er frekvensene like, så klokkefeilen i mottakerne $f \delta_{BA}$, forsvinner.

$$\varphi_{AB}^j - \varphi_{AB}^k = \frac{1}{\lambda} (\rho_{AB}^j - \rho_{AB}^k) + (N_{AB}^j - N_{AB}^k) + (f \delta_{AB} - f \delta_{AB}) \quad (2,8)$$

$$\varphi_{AB}^{jk} = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk} + N_{AB}^{jk}$$

Likningen har nå blitt relativt liten, men vi må ikke glemme innholdet:

$$\varphi_{AB}^{jk} = \varphi_B^k - \varphi_B^j - \varphi_A^k + \varphi_A^j \quad (2,9)$$

$$\rho_{AB}^{jk} = \rho_B^k - \rho_B^j - \rho_A^k + \rho_A^j$$

$$N_{AB}^{jk} = N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j$$

Tilfelle 2, $f^j \neq f^k$:

Vi er nå nødt til å begynne helt på nytt med singel-differensiering hvor frekvensene nå er ulike, men vi er nødt til å forandre litt på likning (2.5) ved å multiplisere hele systemet med λ . Differensieringen i 2.12 skjer også med satellitt k , men vi ser kun på tilfelle i satellitt j :

$$\begin{aligned} \left[\varphi_A^j + f^j \delta^s = \frac{1}{\lambda^j} \rho_A^j + f^j \delta_A + N_A^j \right] \cdot \lambda^j \\ \left[\varphi_B^j + f^j \delta^s = \frac{1}{\lambda^j} \rho_B^j + f^j \delta_B + N_B^j \right] \cdot \lambda^j \end{aligned} \quad (2,10)$$

Da forandres noen av leddene, som fører til at vi kan se bort ifra ulike frekvenser:

$$\begin{aligned} \varphi^s \lambda &= \tilde{\varphi}^s \\ f^j \lambda^j &= c \end{aligned} \quad (2,11)$$

Først gjør vi da en singel-differensiering:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_B^j - \tilde{\varphi}_A^j &= \rho_B^j - \rho_A^j + c(\delta_B - \delta_A) + \lambda^j(N_B^j - N_A^j) \\ \tilde{\varphi}_{AB}^j &= \rho_{AB}^j + c\delta_{AB} + \lambda^j N_{AB}^j \end{aligned} \quad (2,12)$$

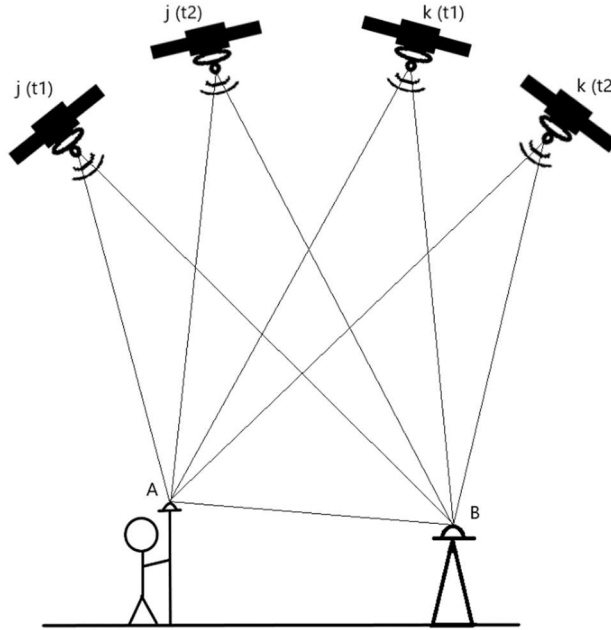
For så å gjøre en dobbel-differensiering, da også med det samme tilfelle i 2.12 med satellitt k . Her ser vi at vi får samme utfall som når frekvensene er like som når de er ulike, klokkefeilen forsvinner.

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{AB}^k - \tilde{\varphi}_{AB}^j &= (\rho_{AB}^k - \rho_{AB}^j) + (\lambda^k N_{AB}^k - \lambda^j N_{AB}^j) + (c\delta_{AB} - c\delta_{AB}) \\ \tilde{\varphi}_{AB}^{jk} &= \rho_{AB}^{jk} + N_{AB}^{jk}(\lambda^k - \lambda^j) \end{aligned} \quad (2,13)$$

Vi ser at likningen er ganske lik likning (2.8), da frekvensene var like. Når klokkefeilen er blitt eliminert blir det benyttet teknikker for beregning av faseflertydigheten hvor vi oppnår tilstandene «Float» og «Fix», som vi hørte om tidligere.

2.3.3. Trippel differensiering

Til nå har vi sett på differensiering mellom mottakerne (singel-differensiering) og differensiering mellom satellittene (dobbel-differensiering). Det siste steget er en differensiering mellom epokene, i vårt eksempel mellom t_1 og t_2 .



Figur 2.11: Skisse av konseptet trippel-differensiering

Ved trippel-differanser bruker vi kun likning (2.8) hvor frekvensene er like. Det går an å gjøre en differensiering med likning (2.13) der frekvensene er ulike, men vi mister for mye som gjør at nøyaktigheten ikke blir så mye bedre enn ved dobbelt-differensiering. Vi starter med å sette opp de to likningene som skal differensieres.

$$\varphi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_1) + N_{AB}^{jk} \quad (2,14)$$

$$\varphi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_2) + N_{AB}^{jk}$$

Når vi trekker disse fra hverandre ser vi at fase-flertydigheten N forsvinner:

$$\varphi_{AB}^{jk}(t_2) - \varphi_{AB}^{jk}(t_1) = \left[\frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_2) - \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_1) \right] + (N_{AB}^{jk} - N_{AB}^{jk}) \quad (2,15)$$

$$\varphi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_{12})$$

Nå har vi eliminert både klokkefeilen og faseflertydigheten i likningen.

$$\begin{aligned} \varphi_{AB}^{jk}(t_{12}) = & + \varphi_B^k(t_2) - \varphi_B^j(t_2) - \varphi_A^k(t_2) + \varphi_A^j(t_2) \\ & - \varphi_B^k(t_1) + \varphi_B^j(t_1) + \varphi_A^k(t_1) - \varphi_A^j(t_1) \end{aligned} \quad (2,16)$$

$$\begin{aligned} \rho_{AB}^{jk}(t_{12}) = & + \rho_B^k(t_2) - \rho_B^j(t_2) - \rho_A^k(t_2) + \rho_A^j(t_2) \\ & + \rho_B^k(t_1) - \rho_B^j(t_1) - \rho_A^k(t_1) + \rho_A^j(t_1) \end{aligned} \quad (2,17)$$

2.3.4. CPOS

CPOS er en norsk tjeneste som tilbyr fix-løsning i sanntid. Her blir det beregnet en virtuell referansestasjon på bakgrunn av data fra permanente geodetiske stasjoner og mottakerens posisjon. Mottakeren vil oppfatte dataen som om det er en basestasjon i nærheten. Innenfor gode dekningsområder kan vi oppleve en nøyaktighet på 8mm i grunnriss og 17mm i høyde (Kartverket, D, 2019).

2.4. Feilkilder

Feilkilder er ulike parametere som forstyrrer signalet eller gjør en endring i de ulike målingene som gjør at vi får feil svar. Veldig spesifikt er det korreksjoner vi må legge til eller fjerne for at avstandene mellom satellittene og mottaker blir riktig. I grunnprinsippet i hvordan GNSS fungerer, har vi til nå hørt om geometrisk avstand, klokkefeilkorreksjon og faseflertydighet av observasjoner som må beregnes og estimeres fra observasjonslikningen, formel (2.3). For en enkel fremstilling av alle feilkildene som er med i beregningsgangen utvider vi observasjonslikningen:

$$\varphi_r^s + N = \rho_r^s + \Delta\delta_r^s - \Delta I_{on} + \Delta T_{ro} + \Delta MP + \Delta PCO + \Delta PCV + \Delta\Phi + \varepsilon \quad (2,18)$$

ρ_r^s - Geometrisk avstand

$\Delta\delta_r^s$ - Klokkefeilkorreksjon

ΔI_{on} - Ionosfæriske korreksjoner

ΔT_{ro} - Troposfæriske korreksjoner

ΔMP - Multipath

ΔPCO - Antenne offset

ΔPCV - Antenne variasjon

$\Delta\Phi$ - Wind-up

ε - Støy

Feilkilder kan deles inn i tre grupper:

- Feilkilder i satellittene
- Feilkilder i signalet
- Feilkilder i mottaker

2.4.1. Feilkilder i satellittene

Den største feilkilden vi får fra satellittene er at det er feil i selve koden vi får. Det vi da kan oppleve som feil er banedataen som vi mottar. Er den feil, beregner vi feil posisjon av satellitten. Klokkene i satellittene er svært presise, men langt bak i desimalene til sekundet, finner vi ofte en liten feil. Er klokkefeilen stor har det en stor innvirkning i posisjonsberegningen av satellitten, siden satellittene i MEO-bane har en hastighet på ca. fire km/s. En siste feil i satellittene er Wind-up. Når satellitten går i bane, er satellitten avhengig av at solcellepanelene alltid er rettet mot solen, samtidig skal antennen alltid peke

mot jordens sentrum. Rotasjonen forårsaker en variasjon i fasen som mottakeren tolker som en liten endring i avstanden. Feilen den gir er ganske liten, så det er kun en nødvendig korreksjon før å oppnå høyest mulig nøyaktighet (ESA, G, 2014).

2.4.2. Feilkilder i signalet

Der vi finner størst avvik i beregningen er i signalet mellom satellitten og mottakeren. Her er det atmosfæriske effekter og multipath som kan gi store avvik på avstandsberegningene. Når signalet går gjennom atmosfæren er det elektroner, gasser og vanndamp som forsinker signalet. Atmosfæren deler vi da inn i to deler, ionosfæren og troposfæren.

Ionosfæren er den største delen av atmosfæren og er bestående av masse elektroner som blir dannet av strålingen fra solen. Ser vi bort ifra feilkildene i ionosfæren, kan vi oppleve en feil mellom fem til femti meter på avstanden mellom satellitten og mottakeren. Antall elektroner per kvadratmeter er forskjellige på de ulike stedene rundt i atmosfæren og det forandrer seg også over tid. Dersom vi bruker en en-frekvent mottaker så kan ikke denne korreksjonen regnes på i sanntid, men en tilnærmet korreksjon blir sendt med i koden fra satellitten. Har man en to-frekvent eller tre-frekvent mottaker finnes det differensielle teknikker som gjør at vi slipper å beregne korreksjonen. Dette kalles ionosfærefri kombinasjon. Det går også an å beregne antall elektroner per kvadratmeter ved en metode som kalles TEC (Total Electron Content) (Center, S. W. C, u.å.).

Troposfæren er en litt liten del av atmosfæren og ligger relativt nærme jordoverflaten. Her opplever vi at gass og vanndamp forsinker signalet. Forsinkelsen av gassene blir beregnet ved trykkmålinger på jordoverflaten, mens vanndampen kan beregnes ut ifra luftfuktigheten. Ser vi bort ifra forsinkelsen opplever vi en feil på mellom to og tjuefem meter. Dersom man benytter seg av etterprosessering, så er det bakkestasjoner rundt om i hele verden som måler ionosfære- og troposfære-korreksjonen til enhver tid (ESA, H, 20.

Vi kaller det for multipath når signalet går via en ting eller gjenstand før den kommer til mottakeren. Svært ofte oppleves det dersom man måler i nærheten av høye bygninger. Det finnes ingen konkret måte å unngå eller fikse multipath på, annet enn å unngå høye bygninger eller høye gjenstander. Man opplever at nøyaktigheten på målingene ikke blir så høy. Utføres det kinematiske målinger, blir det fort rettet opp i, men dersom man utfører en statisk måling, kan dette være en kilde til store avvik.

2.4.3. Feilkilder i mottaker

Som nevnt tidligere er den største feilen til mottakeren, klokkefeil. Men i mottakeren har vi antenne- offset og variasjon og instrumentfeil. Instrumentfeil kan være alt fra en skeiv antenne til menneskelig feil. Ett eksempel er at man skal måle et punkt på bakken og bruker en to meter høy stang, men skriver null meter som instrumenthøyde.

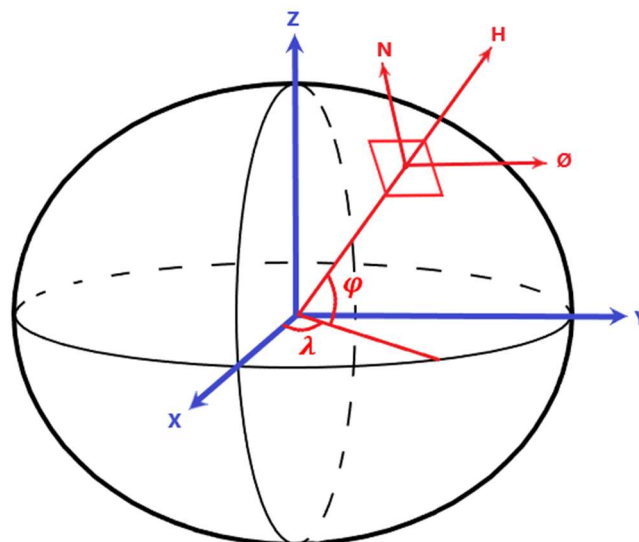
Antenne- offset og variasjon er to svært små korreksjoner, men det har en liten virkning dersom man skal oppleve den høyeste nøyaktighet. Antenne-offset er dersom det har skjedd en forskyvning i fasesenteret i antennen. Antenne-variasjon er avstanden fra lokket til antennen til fasesenteret til mottakeren. Alle merker og modeller av antenner er bygd opp forskjellig, men disse korreksjonene til alle fasemottakere som blir brukt, kan lastes ned fra internett. Ofte får man denne informasjonen rett fra dataen man får ut av mottakeren også (Trimble, u.å.).

2.5.Referansesystemer og referanserammer

Når vi er ute og måler med GNSS, trenger vi å referere dataen vi får ut til noe. Oppmålinger skjer gjerne ved at noe skal bygges, kontrolleres eller annet. Da trenger man å referere koordinatene til det som er planlagt, til det som blir målt opp. På jorden vår er det svært vanskelig å gjøre oppmålinger og referere til noe, grunnet at jorden er konstant i bevegelse og endring. På grunn av at jorden roterer, månens trekraft og andre astronomiske krefter, trenger vi å måle disse endringene for å lage et system man kan referere koordinatsystemer til. I dag er det mest nøyaktige referansesystemet ITRS (International Terrestrial Reference System). ITRS jobber med å lage de mest nøyaktige rammene for hvordan jordens globale endringer er. Ved hjelp av ulike teknikker, blir jordens endringer kartlagt. Den nyeste referanserammen fra ITRS er ITRF14. ITRF14 er en realisering av hvordan jorda var 1. januar 2014. Dette er foreløpig den beste realiseringen av hvordan kloden vår ser ut. I ITRF14 blir koordinatene uttrykt som geosentriske koordinater (X, Y, Z), se figur 2.12. (Kartverket, A. 2018; Seeber, G. 2003).

I Norge er hele landet dekket av fastmerker som hele tiden blir brukt til ulike landmålingsoppdrag eller liknende. For å slippe og oppdatere alle koordinatene hele tiden etter nyere referanserammer, er disse blitt låst til en lokal referanseramme EUREF89. EUREF89 er en felles lokal ramme for Europa for hvordan jordoverflaten så ut 1. januar 1989. EUREF89 uttrykker sine koordinater som kartplankoordinater, Nord- og Øst-koordinater, se figur 2.12. For å definere høyder har vi i Norge et eget høydesystem, som definerer høyden til koordinatene, NN2000 (Kartverket, A. 2018; Kartverket, B, 2018)

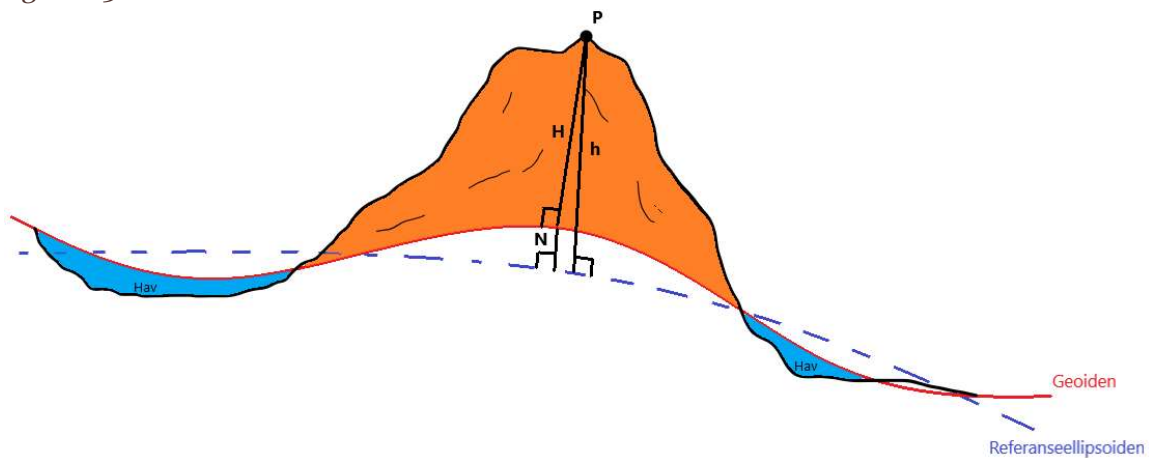
Tar vi opp telefonen eller andre håndholdte GNSS-mottakere, kommer koordinatene ofte ut som bredde- og lengde-grader, (φ , λ , h). Høyden blir definert som ellipsoidisk høyde, høyden over referanseellipsoiden. Hvordan man definerer koordinater er ganske valgfritt. Alle de forskjellige måtene å definere koordinatene på, kan konverteres om hverandre svært enkelt (Kartverket, C, 2009).



Figur 2.12: Koordinater kan uttrykkes som geosentriske koordinater (X, Y, Z), geodetiske koordinater (φ , λ , H), eller kartplankoordinater (Nord, Øst).

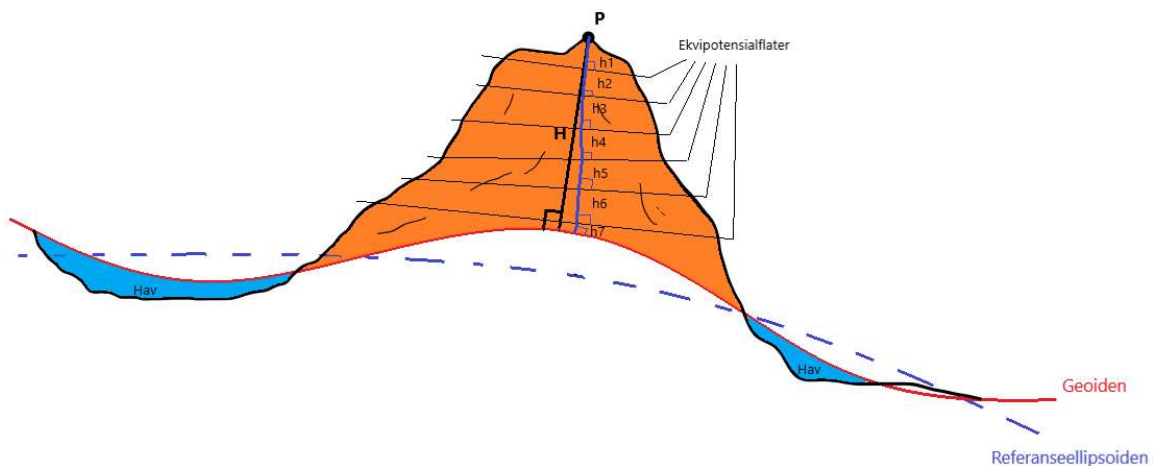
2.5.1. Høyder

Når vi senere skal sammenlikne systemer mot hverandre, er høydene definert i geoidmodellen NN2000. Dette er fysiske innmålinger av landet vårt med høyder knyttet til koordinater, definert som høyde over havet. Reiser vi langs kysten i Norge ser vi at forskjellen mellom flo og fjære kan være ganske stor og er forskjellige rundt i landet. Er det da så lurt å definere høyder som «høyde over havet»? Dette er den enkleste måten å fysisk referere en høyde til noe. Når man snakker om «høyde over havet», blir den flaten vi definerer havet, geoiden. Geoiden er jordas overflate dersom jorda var dekket av vann, som er i konstant endring rundt om på kloden vår. Referanseellipsoiden er den delen vi refererer til når vi måler. Når vi måler får vi ut ellipsoidisk høyde h , men når vi konverterer til NN2000 får vi ortometrisk høyde, H . Høyden mellom H og h blir definert som geoidehøyden, N , se figur 2.13.



Figur 2.13: Forklaring av høyder som brukes i GNSS-sammenheng

Høyder er noe av det vanskeligste å måle grunnet at tyngdefeltet er forskjellige inne i massene. Den korrekte høyden over et definert punkt er avstanden som går langs loddlinjen gjennom massene. Den avstanden går ikke «rett» gjennom massene. Deler vi opp massene i et fjell kan vi se at tyngdefeltet er forskjellig, og retningen til det vi kaller tyngdekraften er ulik. Den korrekte høyden er hvis vi summerer opp alle de ulike høydene over de forskjellige tyngdeflatene som vi kaller ekvipotensialflater, se figur 2.14. Det finnes ingen metoder for å beregne høyder på denne måten, men det ville vært den mest korrekte (Ophaug, V, 2018).



Figur 2.14: Ortometrisk høyde H , er den høyden vi bruker i dag, men den mest korrekte høyden ville vært $h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7$

Kapittel 3

3. Datainnsamling og metode

I denne delen av oppgaven skal vi se nærmere på hvordan vi skal se på nøyaktigheten til bidraget til Galileo og BeiDou. Selve datainnsamlingen kan deles i to deler, en litt større del av hvordan dekningen er i Ås og en litt mindre del av hvordan dekningen er ulike steder rundt i verden. I Ås skal vi se på hvordan bidraget er under ulike forhold, mens i den globale delen skal vi se på nøyaktigheten til de forskjellige systemene ut ifra basestasjoner som står statisk rundt i verden. Datainnsamlingen i Ås er fra 27.11.2018.

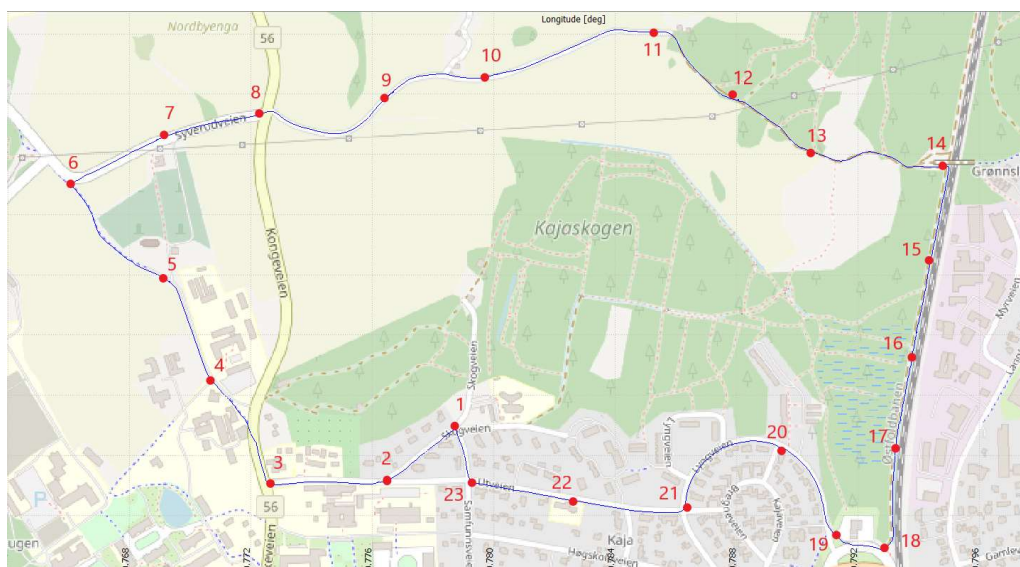
3.1. Lokal analyse

Den lokale analysen bygger seg videre fra et tidligere emne, GMGD320, Satellittgeodesi analyse. På en fem kilometer lang rute ble det opprettet 23 punkter med ulike utfordringer i forhold til sikt. CPOS ble benyttet for å måle opp disse punktene. Med seks til åtte oppmålinger i hvert punkt har punktene blitt utjevnet i GIS-line, for så å utføre observasjonstest, ytre- og indre- pålitelighetstester for å fjerne observasjoner som gir resultatet et for stort avvik.

- En observasjonstest gir oss et innblikk i hvor stor virkning og hvor store avvik hver enkelt måling har i punktene. Dersom en enkelt måling overstiger en testverdi som vi selv velger, kan vi enkelt filtrere ut dårlige målinger.
- En indre pålitelighetstest avgjør hvor godt observasjonene gjensidig kontrollerer hverandre, mens en ytre pålitelighetstest sier oss hvor stor skade gjør den største gjenværende grovfeil på resultatet.

Disse punktene og koordinatene for punktene er blitt benyttet i denne oppgaven også.

Under ser vi ruten med alle de 23 punktene som er blitt benyttet:



Figur 3.1: Ruten over de 23 kontrollpunktene. Kart er hentet fra OpenStreetMap.org

Punkt	Nord	Øst	Høyde	sN	sØ	sH
1	6615832.785	600197.253	104.184	0.006	0.005	0.004
2	6615726.121	600056.671	103.758	0.005	0.005	0.004
3	6615721.539	599849.613	103.949	0.005	0.005	0.004
4	6615871.353	599776.761	107.040	0.003	0.003	0.002
5	6616086.799	599659.167	105.956	0.005	0.004	0.003
6	6616260.875	599474.245	97.174	0.005	0.005	0.004
7	6616347.144	599628.472	97.584	0.005	0.004	0.003
8	6616398.862	599813.985	89.247	0.005	0.004	0.003
9	6616432.338	600047.158	92.977	0.004	0.003	0.003
10	6616487.558	600257.512	95.969	0.006	0.005	0.004
11	6616572.161	600550.875	103.512	0.004	0.003	0.003
12	6616452.029	600705.447	109.430	0.005	0.004	0.004
13	6616365.805	600825.291	105.725	0.007	0.006	0.005
14	6616337.930	601098.965	96.693	0.005	0.005	0.004
15	6616160.984	601071.218	94.850	0.006	0.007	0.005
16	6616030.709	601047.460	94.077	0.006	0.007	0.004
17	6615866.806	601023.294	94.014	0.005	0.005	0.004
18	6615627.211	600991.442	95.509	0.005	0.005	0.004
19	6615649.910	600908.168	95.337	0.004	0.004	0.003
20	6615807.047	600804.651	97.605	0.004	0.004	0.003
21	6615693.052	600627.101	101.369	0.005	0.005	0.004
22	6615700.759	600421.898	103.751	0.004	0.004	0.003
23	6615729.166	600231.260	101.492	0.004	0.004	0.003

Tabell 3.1: Oversikt over utjevned koordinater på de 23 punktene

For innsamling av data i Ås		
Mottakertype	Serienummer	kommentar
Toocon HiPer SR	1064-16438	For innmåling av kontrollpunktene med CPOS
Toocon HiPer SR	1064-16730	For innmåling av kontrollpunktene med CPOS
Trimble R10	5611457211	Kinematisk innmåling av kontrollpunktene
iPhone X		Kinematisk innmåling av ruten
Garmin Vivoactive HR		Kinematisk innmåling av ruten
Trimble NETR9	5000113987	Basestasjon til differensielle beregninger

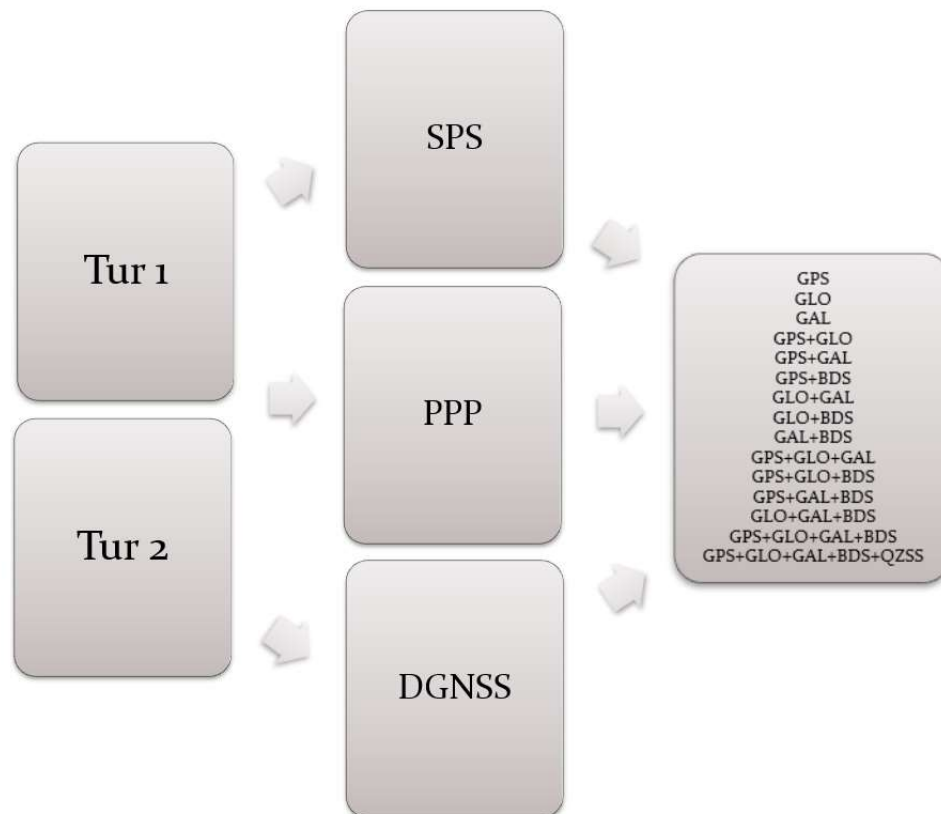
Tabell 3.2: Mottakeroversikt over mottakere brukt i Ås

Feltdelen som har blitt gjort til denne oppgaven er to kinematiske målinger. En tidlig på morgenen og en senere på ettermiddagen, for å få en annen dekning enn det som er på morgenen. Målingene med Trimble R10 har foregått ved at mottakeren har logget med en datarate på ett sekund også har jeg har målt over hvert punkt i ti sekunder og notert tidspunktet. Punkt 1 har blitt målt to ganger, en ved start og en ved slutt, så vi har testmålinger til 24 punkter.

Fra Trimble-mottakeren får jeg ut to rinex 3.03 filer. Til etterprosessering, bruker jeg i denne oppgaven programvaren Terrapos. Terrapos er en programvare som er utviklet av firmaet Terratec AS. Fordelen med Terrapos i forhold til mange andre programvarer, som for eksempel RTKlib og gLab som er gratis programvarer, er at programvaren er veldig automatisert. Når rinex-filen er importert, vet Terrapos hvilken dag det gjelder. Banedata, klokkekorreksjonsdata og jordrotasjonsdata kan lastes ned enkelt ved ett tastetrykk istedenfor å hente det ut fra internett og importere det manuelt. For differensielle

beregninger, har jeg brukt basestasjonen AASC fra kartverkets tjeneste Etpos i Ås like ved testområdet, se figur 3.3. Etpos er en betalingstjeneste fra kartverket hvor man kan få GNSS observasjoner fra permanente basestasjoner som står rundt i hele Norge (Kartverket, E, 2018).

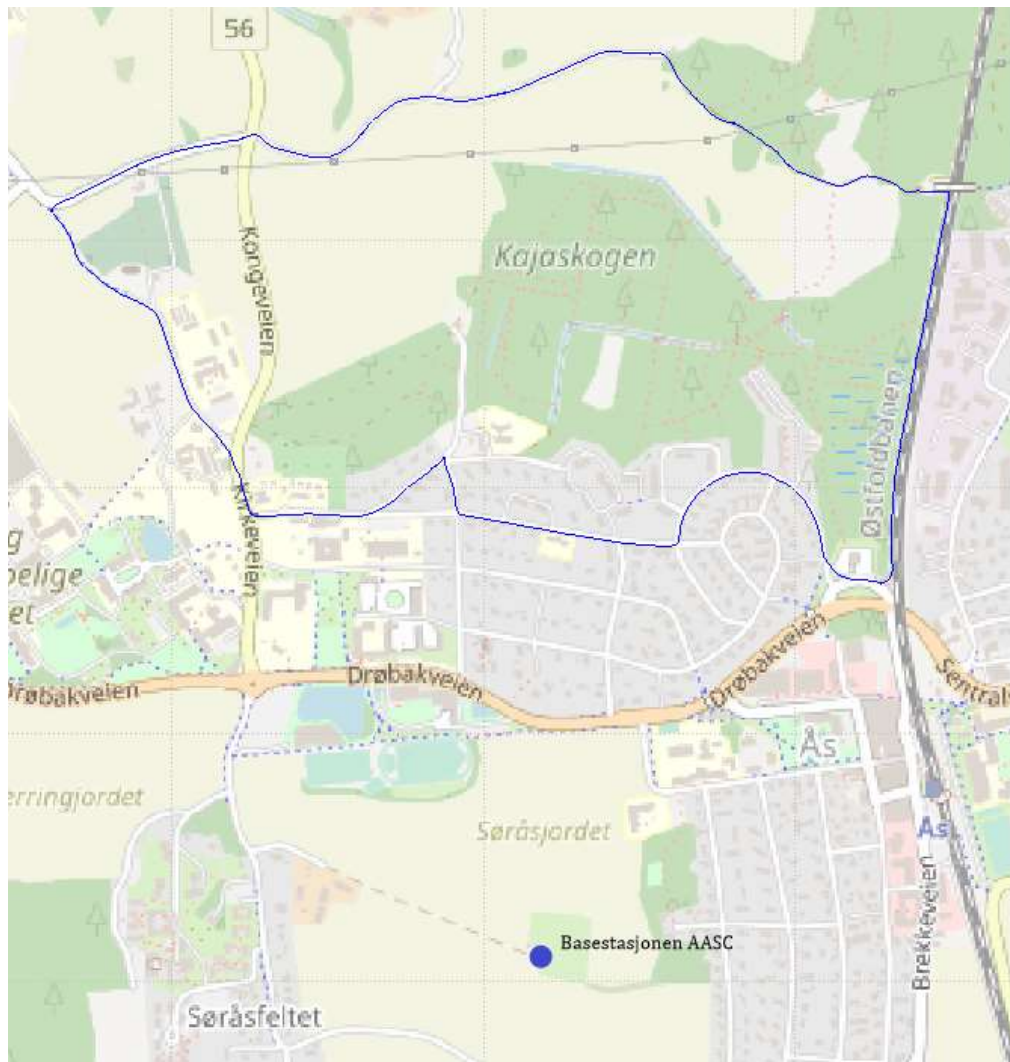
Begge turene blir prosessert hver for seg med SPS, PPP og DGNSS med kode- og fase-observasjoner. For å se på nøyaktigheten til de ulike systemene skal vi prosessere hvert system alene, to og to systemer sammen, tre og tre systemer sammen, alle fire sammen og helt til slutt, se på hvordan det blir med QZSS med alle systemene. Alle disse kombinasjonene i begge turene og alle tre beregningsteknikkene skal vi se nærmere på.



Figur 3.2: Prosesseringsgang for behandling av dataen fra Ås med alle de ulike kombinasjonene vi skal se på

Når prosesseringen er fullført er vi nødt til å eksportere koordinatene ut i samme format og samme referansesystem som fastkoordinatene jeg skal teste kombinasjonene mot. Når formatet er riktig får jeg ut en resultatfil fra hver enkelt kombinasjon med koordinatene, ToW (Time of Week) og antall satellitter for hvert eneste sekund i tidsrommet det er blitt målt på. Jeg har målt med ti sekunder i hvert punkt, så jeg må plukke ut de ti koordinatene i hver av de 24 punktene. Her har jeg brukt MatLab, hvor jeg tar inn hver resultatfil og en egen fil med tidspunktene for når jeg sto over hvert punkt som plukker ut de ti koordinatene i hvert punkt.

Med iPhone og Garmin-klokken er dataen som blir logget, sanntid-koordinater. Når vi laster ned dataen, er det eneste som trengs en konvertering av dataformatet for å enklere lese inn koordinatene i MatLab. Her brukes programvaren GPSbabel som er en gratis programvare for konvertering.



Figur 3.3: Kart over turen som er gått med lokasjonen til basestasjonen brukt til DGNS. Kart er fra OpenStreetMap.org

3.1.1. Beregningsgang

For å beskrive hvordan jeg har beregnet koordinatene ut ifra de ti målingene i hvert punkt med Trimble-mottakeren, skal vi se på hva som skjer i ett enkelt punkt. For å unngå målinger med støy, dersom det er støy, og for å legge sammen koordinatene til ett koordinat med høyest mulig presisjon, blir kun fem av koordinatene brukt.

Det første som skjer er at jeg har regnet ut gjennomsnittet av de ti koordinatene:

$$\begin{aligned} \overline{Nord} &= \frac{\sum Nord_i}{10} \\ \overline{\Øst} &= \frac{\sum \Øst_i}{10} \\ \overline{Høyde} &= \frac{\sum Høyde_i}{10} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Hver av de ti koordinatene blir trukket fra gjennomsnittet, de ti avvikene i nord, øst og høyde blir lagt sammen til et felles avvik som jeg her kaller Avvik_{3D}:

$$\begin{aligned} N &= \overline{Nord} - Nord_i \\ \emptyset &= \overline{\emptyset st} - \emptyset st_i \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} H &= \overline{H\emptyset yde} - H\emptyset yde_i \\ Avvik_{3D} &= \sqrt{N^2 + \emptyset^2 + H^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Da har vi en liste med ti avvik (avvik_{3D}) som vi sorterer i fra lavest til høyest. De fem koordinatene som har lavest avvik blir brukt til å regne ut et nytt gjennomsnitt, som blir koordinatene til det ene punktet.

Når dette er blitt gjort for alle de 24 punktene, kan vi trekke fra koordinatene fra fasitkoordinatene. Da har vi 24 avvik i nord ($Avvik_N$), 24 i øst ($Avvik_\emptyset$) og 24 i høyde ($Avvik_H$). For å beskrive den totale nøyaktigheten av målingene av alle de 24 punktene bruker vi kvadratisk gjennomsnitt eller RMS (Root Mean Square). P er antall avvik, 24 i hvert av tilfelle under:

$$\begin{aligned} RMS_N &= \sqrt{\frac{1}{P} \sum Avvik_N^2} \\ RMS_\emptyset &= \sqrt{\frac{1}{P} \sum Avvik_\emptyset^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

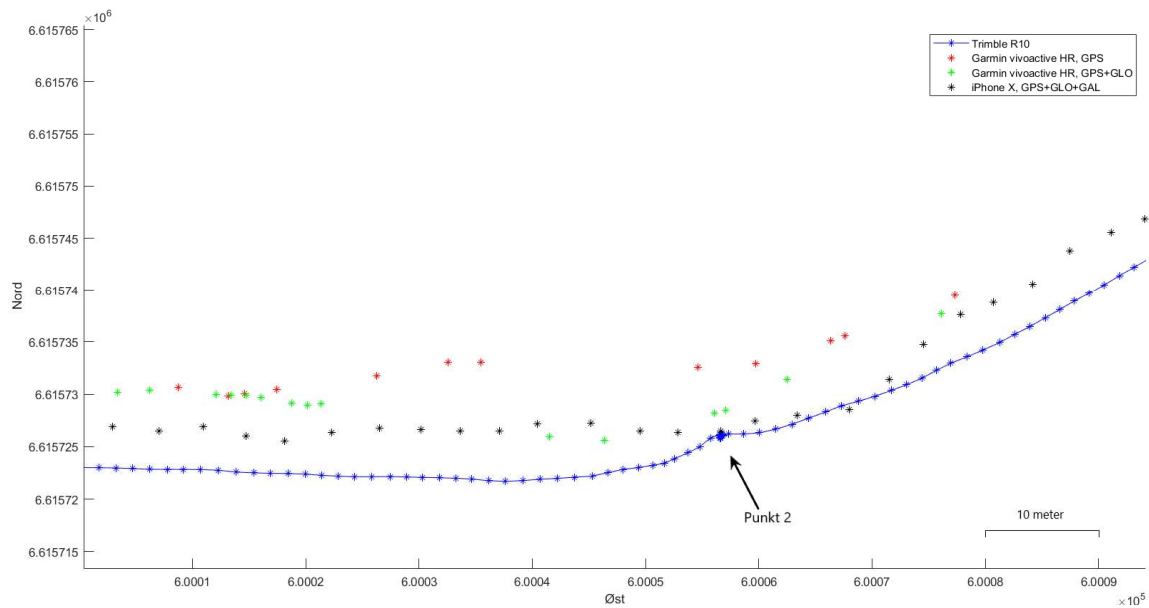
$$RMS_H = \sqrt{\frac{1}{P} \sum Avvik_H^2}$$

$$RMS_{Grunnriss} = \sqrt{RMS_N^2 + RMS_\emptyset^2} \quad (3.5)$$

$$RMS_{3D} = \sqrt{RMS_N^2 + RMS_\emptyset^2 + RMS_H^2} \quad (3.6)$$

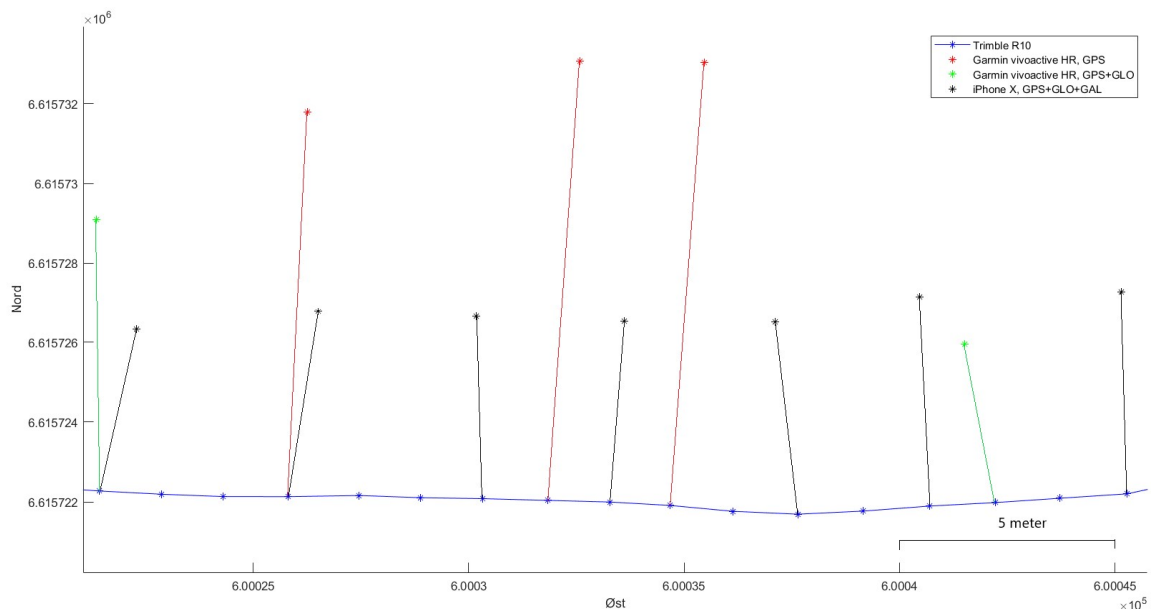
For hver av de 90 prosesseringene i Ås skal vi legge mest vekt på RMS_{3D}, men vi bruker RMS-grunnriss og RMS-høyde for å kartlegge mer hvor feilen ligger, dersom vi får et stort avvik i 3D. RMS_{3D} gir en mer helhetlig innsikt i hvor stor nøyaktighet målingene har. Men dersom vi bruker GNSS i en kartapplikasjon på en telefon, er det avvik i grunnriss som er det mest relevante.

Med iPhone og Garmin-klokken, kan vi ikke selv bestemme dataratene, eller hvor ofte det skal logges ett koordinat. Ser vi på figur 3.4, ser vi et kart med forskjellen i hvordan Trimble-mottakeren har målt og hvor mobilen og klokken måler.



Figur 3.4: Utsnitt fra turen ved punkt 2 med ulike mottakere

Ser vi på Trimble-mottakerens logging, så logger den hvert sekund og det blir mange observasjoner der vi står stille. Mens med mobilen og klokken ser vi noe annet med observasjonene når vi står stille. Det ser nærmest ut som at den logger en ny koordinat når den har kommet langt nok unna forrige koordinat som kan skyldes det at det er ønskelig å spare lagringsplass. For å da heller se på nøyaktigheten til mobilen og Garmin-klokken, bruker vi dataen fra Trimble-mottakeren etter vi har prosessert med DGNSS, som dataen vi tester mot. For å se på nøyaktigheten da, går vi inn i hvert målte koordinat gjennom hele turen og måler avstanden til nærmeste målte koordinat fra Trimble-mottakeren, se figur 3.5.



Figur 3.5: Metode for beregning av nøyaktighet til mobil og aktivitetsklokke

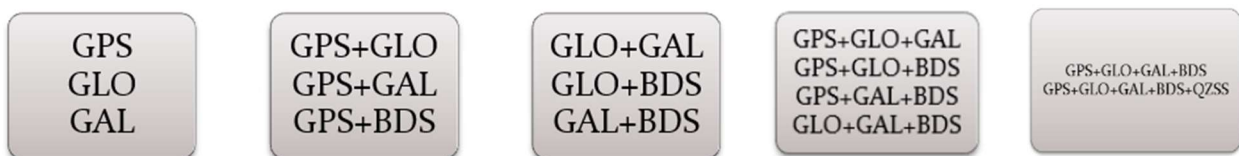
Alle disse avstandene blir summert opp for så å beregne ett gjennomsnittlig avvik i 3D, grunnriss (2D) og høyde, av det som blir våre verdier for å se på nøyaktigheten. For en kontroll over at teknikken med å bruke kontrollpunkter er en god måte, bruker vi denne

teknikken også med SPS og PPP. Med differensiell måling er det ønskelig med fix i alle observasjoner, men vi skal se at det er i noen tilfeller hvor vi mister fix-løsning. Her skal vi se på måter å lokalisere hvor vi mister fix-løsning og se på hva det skyldes.

Helt til slutt skal vi også se på hvor gode de ulike beregningsteknikkene er mot hverandre. Her legger vi også til en siste måte å prosessere hvor vi bruker kun kodeobservasjoner med DGNSS.

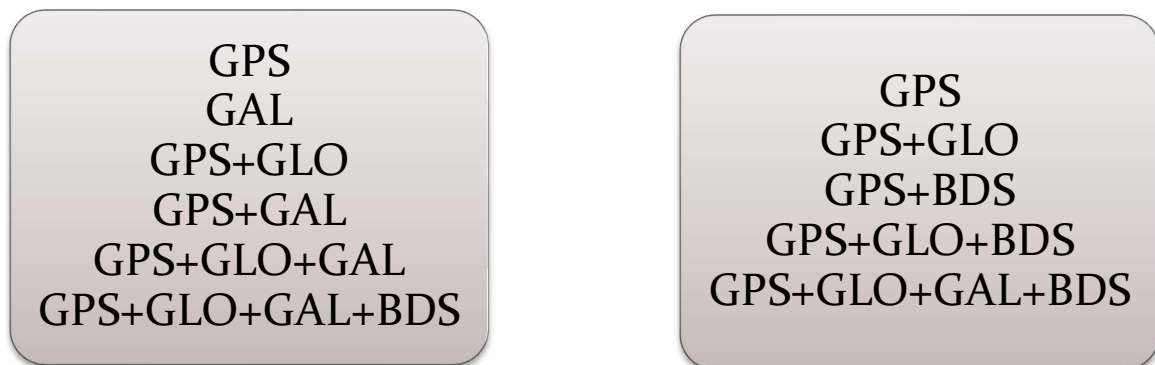
3.1.2. Resultatoppsett

I første omgang skal vi se på hvor gode systemene er alene og hvor gode systemene er i kombinasjon med de andre. Siden BeiDou ikke er fullt operativt, var det ikke nok observasjoner fra BeiDou satellittene til å prosessere det alene. Hver av boksene under beskriver de ulike kombinasjonene vi skal se på sammen i samme figur og tabell.



Figur 3.6: De ulike kombinasjonene i resultatkapittelet

For å kunne se mer på nøyaktigheten til Galileo og BeiDou og bidraget deres, setter vi i neste omgang opp kombinasjoner som gjør at vi kan se om nøyaktigheten blir dårligere eller bedre når vi legger til systemene:

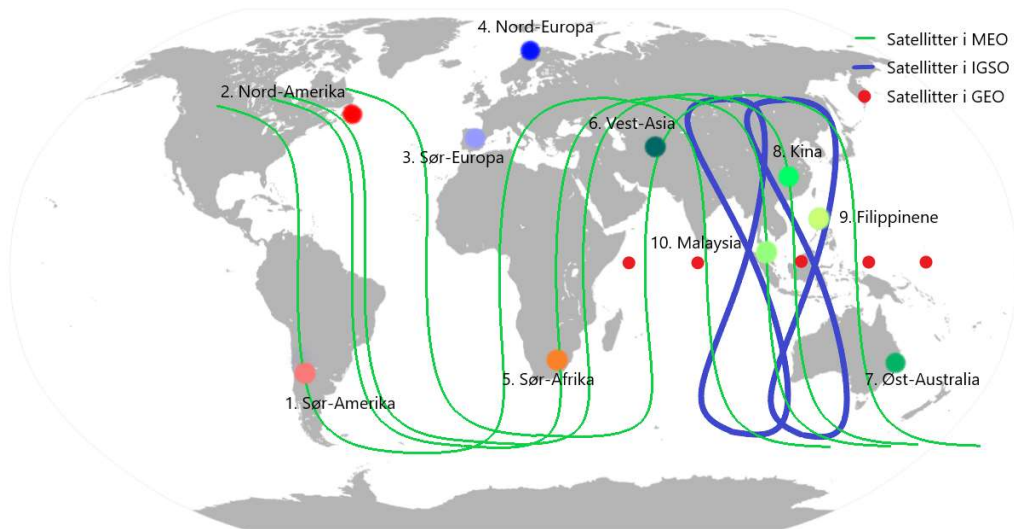


Figur 3.7: De ulike kombinasjonene når vi skal se på bidraget til Galileo og BeiDou

For en siste test etter dette, skal vi gå gjennom avvikene til en av kombinasjonene til alle de 24 punktene, for å se hvilke punkter gir dårligst og best avvik. Derfra skal vi bruke de seks punktene som gir best avvik og de seks punktene som gir dårligst avvik. Kan vi klare å finne en konklusjon på hvorfor disse gir bedre svar enn de andre? Vi skal deretter regne ut nye RMS verdier med god og dårlig sikt for å se på bidraget til Galileo og BeiDou i de samme kombinasjonene som i figur 3.7.

3.2. Global analyse

Jeg har plukket ut ti IGS-stasjoner rundt i verden for å sammenlikne nøyaktigheten til de forskjellige systemene globalt. Dataen er hentet fra IGS-databasene på IGS.org, fra samme dag på alle stasjonene 20.01.19. Fasilitkoordinatene er koordinatene som står oppført på igs.org på hver av stasjonene.



Figur 3.8: Kart over BeiDou sine satellittbaner og basestasjonene brukt i beregningene

	Stasjon	Stasjonsnavn	Mottakertype	Verdensdel	Land
Stasjoner med dårlig Beidou-dekning	1	MGUE00ARG	SEPT POLARX4	Sør-Amerika	Argentina
	2	STJ300CAN	SEPT POLARX5TR	Nord-Amerika	Canada
	3	VILL00ESP	SEPT POLARX4	Europa	Spania
	4	TRO100NOR	TRIMBLE NETR9	Europa	Norge
	5	HARB00ZAF	SEPT POLARX5TR	Afrika	Sør-Afrika
Stasjoner med god Beidou-dekning	6	KITG00UZB	SEPT POLARX5	Asia	Usbekistan
	7	SPA800AUS	SEPT POLARX5	Australia	Australia
	8	JFNG00CHN	TRIMBLE NETR9	Asia	Kina
	9	PTGG00PHL	SEPT POLARX5	Asia	Filippinene
	10	ANMG0200	TRIMBLE NETR9	Asia	Malaysia

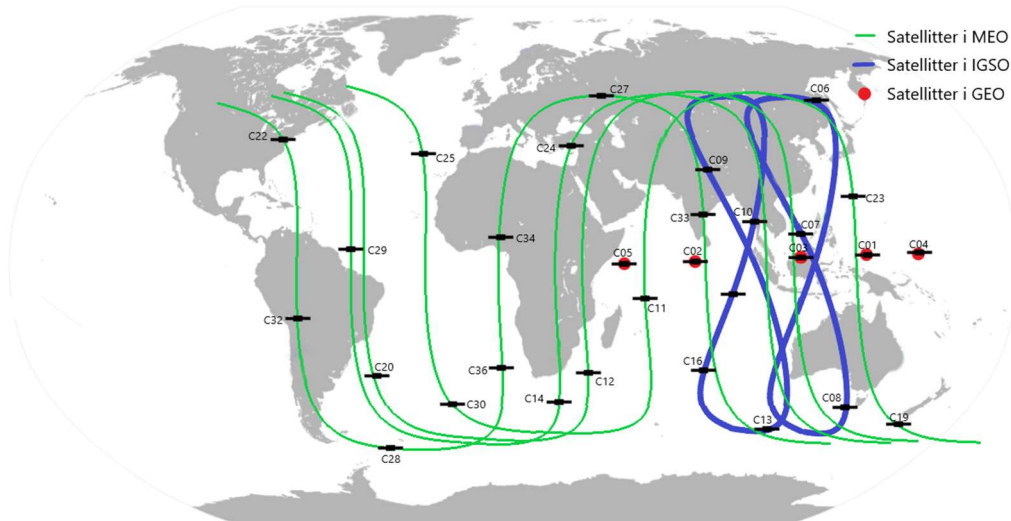
Tabell 3.3: Oversiktstabell over stasjonene

For å gjøre denne delen av oppgaven enkel å tolke i resultatene, er den satt opp ganske lik den lokale analysen. Prosesseringsdelen er også relativt lik. I beregningsgangen av avvikene i MatLab, er alle koordinatene som er logget på den stasjonen den dagen blitt trukket ifra fasilitkoordinatene. Typisk så har stasjonene en datarate i 30 sekunder eller 60 sekunder i innstillingene eller at det er logget koordinater hver 30. eller 60. sekund. De statistiske metodene for å se på nøyaktigheten er her også RMS_{3D} og i tillegg RMS-grunnrikk og RMS-høyde.

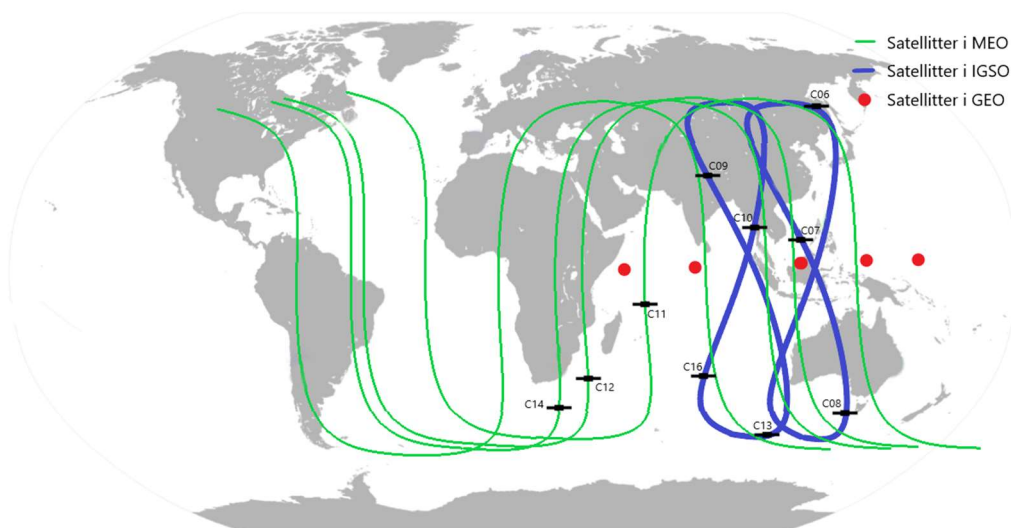
Banetype	Sat. Nr.	Bane	Skutt opp	Kommentar
GEO	C01	GEO 140.0°E	2010-01-16	Operativ
	C02	GEO 80°E	2012-10-25	Operativ
	C03	GEO 110.5°E	2016-06-12	Operativ
	C04	GEO 160.0°E	2010-10-31	Operativ
	C05	GEO 58.75°E	2012-02-24	Operativ
	C59	GEO 144.2°E	2018-11-01	Ikke-operativ
IGSO	C06	55° Inklinasjon IGSO 118°E	2010-07-31	Operativ
	C07	55° Inklinasjon IGSO 118°E	2010-12-17	Operativ
	C08	55° Inklinasjon IGSO 118°E	2011-04-09	Operativ
	C09	55° Inklinasjon IGSO 95°E	2011-07-26	Operativ
	C10	55° Inklinasjon IGSO 95°E	2011-12-01	Operativ
	C13	55° Inklinasjon IGSO 95°E	2016-03-29	Operativ
	C16	55° Inklinasjon IGSO 95°E	2018-07-09	Operativ
	C18	55° Inklinasjon IGSO 95°E	2015-09-29	Ikke-operativ, men mottatt observasjoner i denne oppgaven
	C31	55° Inklinasjon IGSO 95°E	2015-03-30	Ikke-operativ
MEO	C11	MEO Bane A07	2012-04-29	Operativ
	C12	MEO Bane A08	2012-04-29	Operativ
	C14	MEO Bane B04	2012-09-18	Operativ
	C19	MEO Bane B07	2017-11-05	Operativ
	C20	MEO Bane B08	2017-11-05	Operativ
	C21	MEO Bane B06	2018-02-12	Operativ, men ikke observert aktiv i denne oppgaven
	C22	MEO Bane B05	2018-02-12	Operativ
	C23	MEO Bane C07	2018-07-29	Operativ
	C24	MEO Bane C01	2018-07-29	Operativ
	C25	MEO Bane C02	2018-08-24	Operativ
	C26	MEO Bane C08	2018-08-24	Operativ, men ikke observert aktiv i denne oppgaven
	C27	MEO Bane A04	2018-01-11	Operativ
	C28	MEO Bane A05	2018-01-11	Operativ
	C29	MEO Bane A02	2018-03-29	Operativ
	C30	MEO Bane A03	2018-03-29	Operativ
	C32	MEO Bane B01	2018-09-19	Operativ
	C33	MEO Bane A05	2018-09-19	Operativ
	C34	MEO Bane A01	2018-10-15	Operativ
	C35	MEO Bane A07	2018-10-15	Operativ, men ikke observert aktiv i denne oppgaven
	C36	MEO Bane C04	2018-11-18	Operativ
	C37	MEO Bane C06	2018-11-18	Ikke-operativ
C57	MEO Bane A01	2015-07-25	Ikke-operativ	
C58	MEO Bane A06	2015-07-25	Ikke-operativ	

Tabell 3.4: Fullstendig satellittoversikt over satellitter som er skutt opp i BeiDou

Tabell 3.4 viser alle satellittene som er blitt skutt i BeiDou. De hvite og det grønne feltet er satellitter som jeg har observert i en rinex-fil fra en av basestasjonene. De gule og røde er satellitter som er skutt opp, men er enten ikke operative eller så har jeg ikke mottatt data fra dem. Dessverre har ikke BeiDou kommet så langt med å sette alle ordentlig i bruk. Når vi laster ned banedata fra igs.org, finner jeg bare banedata til satellittene Co6 - C14 og C16. Når jeg prosesserer dataen blir det bare brukt disse ti satellittene med i beregningene.



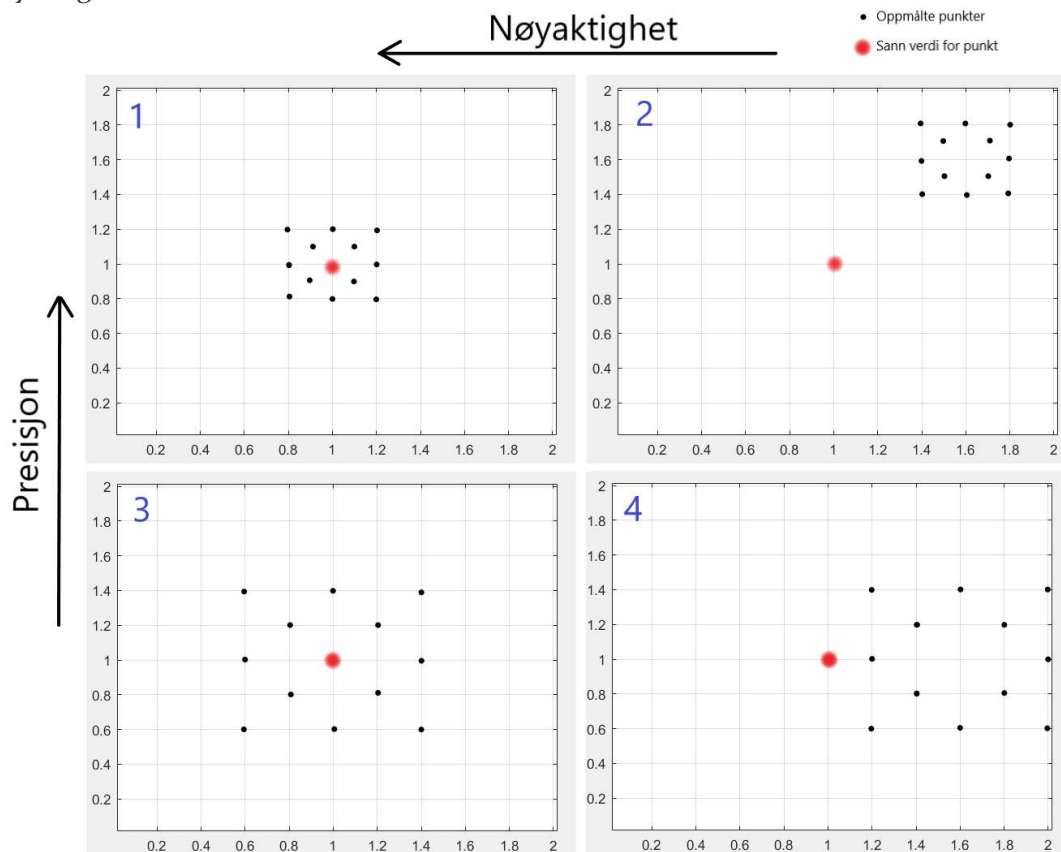
Figur 3.9: Illustrasjon over alle satellitter som er observert i rinex-filene



Figur 3.10: Illustrasjon over alle satellittene som er blitt med i prosesseringene

3.3. Presisjon og nøyaktighet

Mens jeg har jobbet med denne oppgaven tenkte jeg i lang tid å bruke standardavvik som statistisk metode for å se på hvor gode målinger er. For å se litt nærmere på hvorfor jeg ikke bruker det og hvorfor jeg bruker RMS, skal vi se på et eksempel med presisjon og nøyaktighet.



Figur 3.11: Beskrivelse av presisjon og nøyaktighet

Figur 1		Figur 2	
RMS Nord	RMS Øst	RMS Nord	RMS Øst
0.1528	0.1528	0.6191	0.6191
RMS Grunnriss	Standardavvik	RMS Grunnriss	Standardavvik
0.2160	0.2256	0.8756	0.2256
Figur 3		Figur 4	
RMS Nord	RMS Øst	RMS Nord	RMS Øst
0.3055	0.3055	0.3055	0.6733
RMS Grunnriss	Standardavvik	RMS Grunnriss	Standardavvik
0.4320	0.4513	0.7394	0.4513

Tabell 3.5: Statistiske resultater av eksemplene av presisjon og nøyaktighet

Dersom vi ser på figur 1 og 2 i figur 3.11 og de statistiske resultatene i tabell 3.5, så er standardavvikene akkurat det samme. Ser vi på figur 2, så har alle målingene bommet en del mer på det som er sann verdi vi skal teste mot. Standardavviket gir et svar på hvor god presisjonen er på målingene, ikke nøyaktigheten til målingene. Ser vi mer på figuren og tabellen, ser vi at RMS gir et mye bedre svar på presisjon og nøyaktighet i forhold til standardavviket.

Kapittel 4

4. Resultater og kommentarer

Den lokale og globale analysen vil bli presentert ganske likt for at det skal være enklest mulig å vite hva man skal se etter når man ser på resultatene. Resultatene vil bli presentert ved at vi i all hovedsak skal se på RMS_{3D} som blir presentert i form av stolpediagram. Dersom noen av målingene skiller seg grovt ut, skal vi se på RMS i grunnriss og høyde som blir presentert i en tabell under.

Når vi skal se på stolpediagrammene, er de i den lokale analysen delt inn i seks deler, *SPS tur 1*, *SPS tur 2*, *PPP tur 1*, *PPP tur 2*, *DGNSS tur 1* og *DGNSS tur 2*. Det er ikke så viktig å se på forskjellene mellom teknikkene, men heller å se forskjellen mellom kombinasjonene i hver teknikk. Når vi skal se globalt, er det ikke så nøye å se på forskjellene fra sted til sted, men forskjellene mellom kombinasjonene i hvert av stedene.

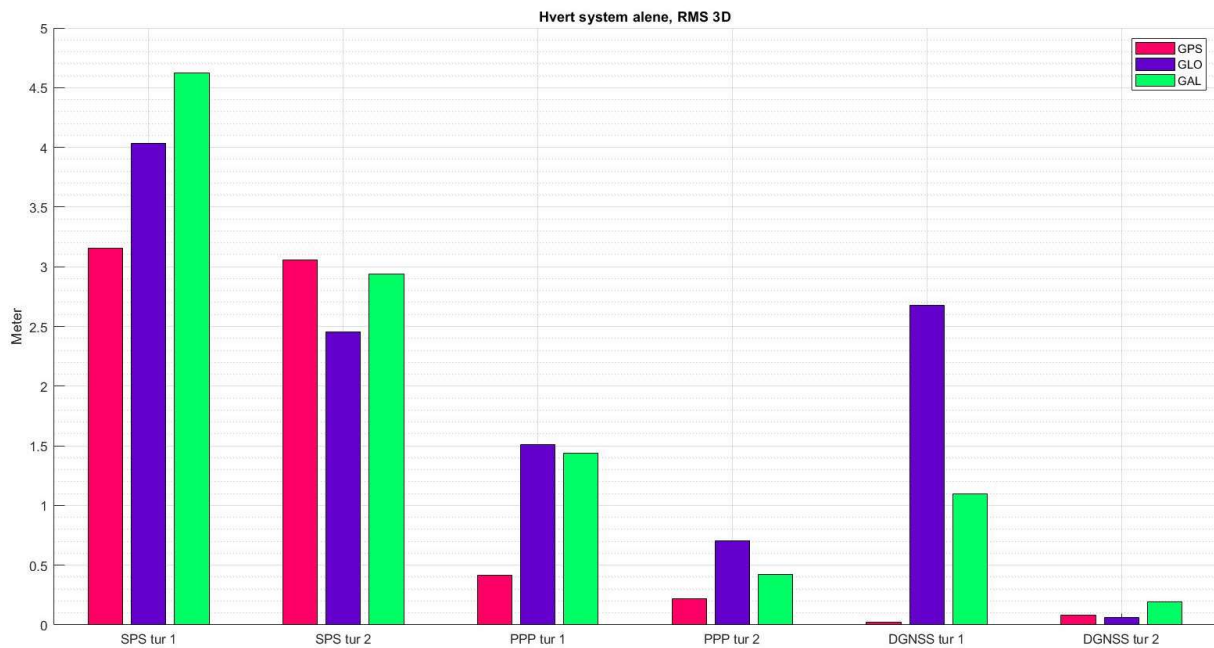
Forventningene til resultatene er at GPS fortsatt er det systemet som vi kan konkludere med gir lavest avvik. Når vi legger til flere systemer sammen i prosesseringen er det forventet at avvikene blir enda lavere. Når vi skal se på to systemer sammen, er det nok GPS og GLONASS sammen som forventes å gi det laveste avviket siden Galileo og BeiDou ikke er fullt operative. I Norge forventes det at Galileo har bedre dekning enn BeiDou, så når vi skal se på tre systemer sammen, kan det tenkes at GPS, GLONASS og Galileo gir oss de laveste avvikene. Men aller lavest avvik er nok forventet med alle de fire systemene sammen. I Asia forventes det at BeiDou klarer å oppnå høyere nøyaktighet enn i Norge. Men selv i Asia er nok fortsatt GPS et sterkere system enn BeiDou. Før vi begynner å se på dataene med BeiDou er det viktig å nevne at i den lokale analysen på tur 1, er det fire BeiDou-satellitter med i prosesseringen, én i MEO-bane og tre i IGSO-banene. På tur 2 var det én i MEO-bane og to i IGSO-banene. Satellittene i IGSO-banene er allerede ganske langt unna jordoverflaten og er designet for å utføre målinger på andre siden av kloden. Det kan kanskje forventes at dette ikke øker nøyaktigheten når vi måler i Norge.

Sted	Dato	Tidsrom	GPS	GLO	GAL	BDS	QZSS	Totalt
Tur 1 i Ås	27.11.2018	09.44 – 11.18	14	9	7	4	1	36
Tur 2 i Ås	27.11.2018	15.23 - 17.12	11	10	8	3	0	32
Argentina	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	22	24	3	0	81
Canada	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	22	24	3	0	81
Spania	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	22	24	8	0	86
Norge	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	21	20	10	0	83
Sør-Afrika	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	22	24	10	0	88
Usbekistan	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	21	20	10	3	86
Australia	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	21	0	9	2	64
Kina	20.01.2019	00.00 – 23.59	31	21	20	10	3	85
Filippinene	20.01.2019	00.00 – 23.59	31	22	24	9	3	89
Malaysia	20.01.2019	00.00 – 23.59	32	21	20	10	3	86

Tabell 4.1: Antall satellitter med i prosesseringen i de ulike delene av verden

Per 01.05.2019 er det kun én GLONASS-satellitt mer observert enn det som er i tabell 4.1. Det er fortsatt kun mulig å prosessere med ti BeiDou-satellitter.

4.1. Resultater fra Ås



Figur 4.1: Hvert system alene lokalt, RMS_{3D}

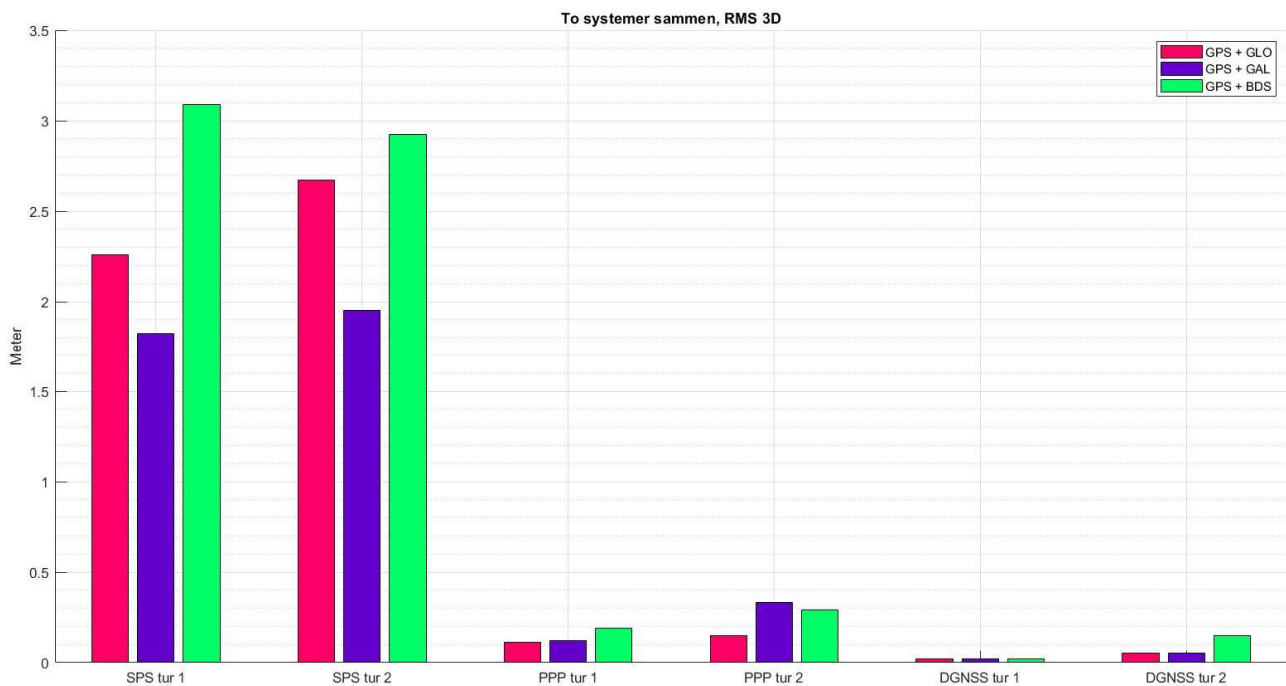
	Hvert system alene, RMS grunnriss og høyde, enhet meter					
	GPS		GLO		GAL	
	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde
SPS tur 1	1.71	2.65	1.77	3.62	3.89	2.50
SPS tur 2	1.44	2.69	1.69	1.78	1.51	2.52
PPP tur 1	0.36	0.20	0.67	1.34	1.30	0.60
PPP tur 2	0.16	0.14	0.30	0.64	0.28	0.32
DGNSS tur 1	0.012	0.016	1.557	2.175	1.087	0.126
DGNSS tur 2	0.065	0.047	0.054	0.029	0.085	0.160

Tabell 4.2: Hvert system alene lokalt, RMS grunnriss og høyde, enheten er meter

BeiDou hadde dessverre ikke nok observasjoner for å kunne prosessere. Ser vi på *SPS tur 1* ser vi resultatet var som forventet, GPS gir lavest RMS-verdier, så GLONASS og tilslutt Galileo. I tabell 4.2 ser vi faktisk at Galileo gir lavest RMS-verdier i høyde, men at feilen ligger mer i grunnriss. På *SPS tur 2* ser vi at GPS gir høyest RMS-verdier og GLONASS gir lavest. I tabellen ser vi at det skyldes mye på grunn av lave RMS-verdier for GLONASS i høyde. GPS viser oss mye mere stabile RMS-verdier, siden det er lite variasjon mellom tur 1 og tur 2.

Ved PPP-målingene er det ganske tydelig at GPS har de laveste RMS-verdiene. Ser vi i tabellen skyldes det svært lave RMS-verdier i høyde. Det samme også med Galileo som overraskende viser lavere RMS-verdier enn GLONASS.

Ved DGNSS er det GLONASS som viser de høyeste RMS-verdiene på tur 1, men de laveste på tur 2. Men det aller laveste verdiene ser vi på GPS tur 1. Her er det svært lett å se at vi har hatt fix-løsning store deler av turen, grunnet RMS-verdier rundt én centimeter. Det er svært overraskende med bare GPS alene. Samtidig er det også svært overraskende at GLONASS slår så feil som det gjør på tur 1, antageligvis på grunn av en feil i fix-en som gir så høye RMS-verdier gjennom hele turen.



Figur 4.2: To systemer sammen lokalt, RMS 3D, enheten er meter

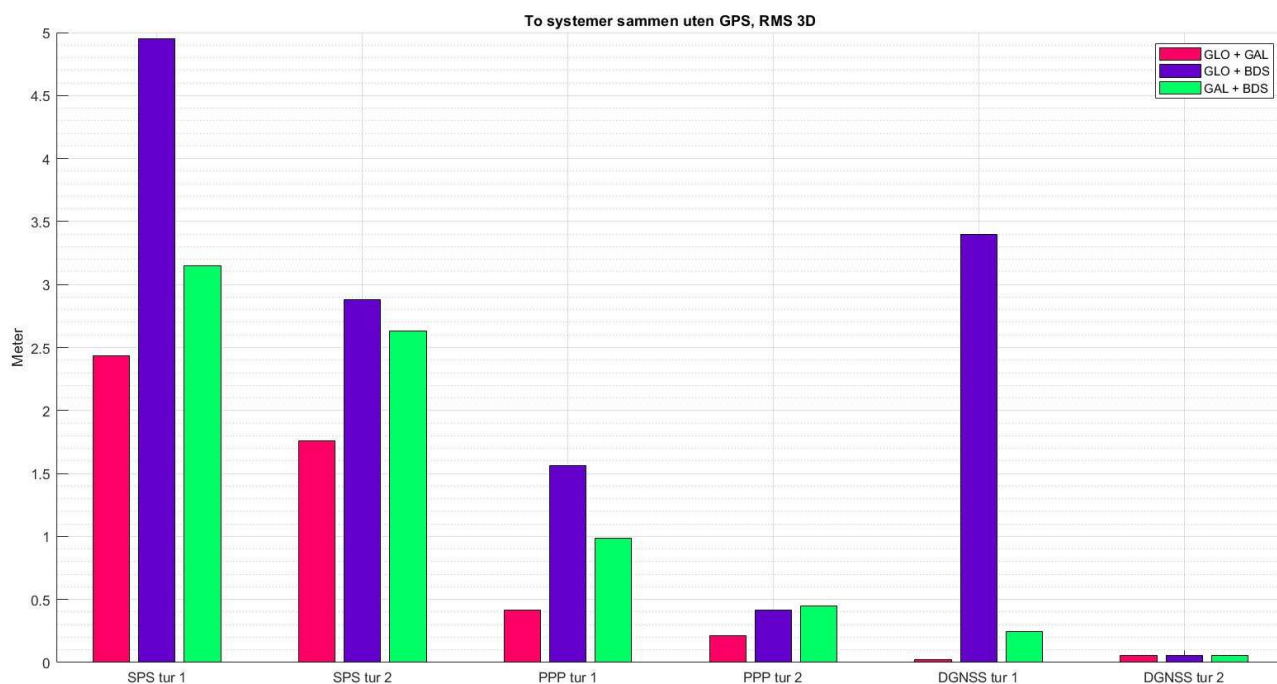
	To systemer sammen, RMS grunnriss og høyde, enhet meter					
	GPS + GLO		GPS + GAL		GPS + BDS	
	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde
SPS tur 1	1.10	1.97	0.98	1.54	1.49	2.70
SPS tur 2	1.10	2.44	1.13	1.60	1.29	2.63
PPP tur 1	0.07	0.09	0.10	0.06	0.18	0.05
PPP tur 2	0.11	0.10	0.22	0.25	0.21	0.20
DGNSS tur 1	0.012	0.017	0.012	0.014	0.012	0.017
DGNSS tur 2	0.051	0.016	0.050	0.017	0.056	0.137

Tabell 4.3: To systemer sammen lokalt, RMS grunnriss og høyde, enheten er meter

Overraskende nok gir kombinasjonen GPS og Galileo, lavest RMS-verdier på begge SPS-turene. Her ser vi også RMS-verdier på under én meter i grunnriss på SPS tur 1. Sammenlikner vi med GPS og GLONASS, så er verdiene ganske like i grunnriss, mens det er i høyde som gir GPS og Galileo lavere RMS-verdier. Kombinasjonen GPS og BeiDou gir som forventet høyest RMS-verdier, men de er ikke så høye i grunnriss.

GPS og GLONASS er en mer stabil kombinasjon når det kommer til PPP, på begge turene er RMS-verdiene mellom én og to desimeter. GPS med Galileo og BeiDou skal vi heller ikke se bort ifra er dårlige kombinasjoner. Ser vi på RMS i høyde på GPS og Galileo, og GPS og BeiDou på tur 1, ser vi at begge to har veldig lave RMS-verdier i forhold til kombinasjonen med GLONASS. GPS og BeiDou har faktisk de laveste verdiene der. GPS og Galileo viser lave RMS-verdier på tur 1, men veldig høye på tur 2.

DGNSS viser oss nok engang svært lave RMS-verdier på tur 1. Ser vi på det med GPS alene fra forrige side, så ser vi at vi har ikke kommet noe nærmere enn én centimeter. På tur 2 er det litt rare verdier når alle viser RMS-verdier på ca. fem centimeter i grunnriss. Det er ikke dårlig, men det er noe rart. GPS og BeiDou fikk en ganske høy verdi i tur 2 i høyde.



Figur 4.3: To systemer sammen lokalt uten GPS, RMS 3D

	To systemer sammen uten GPS, RMS grunnriss og høyde, enhet meter					
	GLO + GAL		GLO + BDS		GAL + BDS	
	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde
SPS tur 1	1.53	1.90	1.79	4.62	2.65	1.70
SPS tur 2	0.99	1.45	1.85	2.21	1.42	2.22
PPP tur 1	0.28	0.31	0.71	1.39	0.79	0.58
PPP tur 2	0.18	0.11	0.22	0.36	0.33	0.31
DGNSS tur 1	0.016	0.017	1.547	3.027	0.165	0.181
DGNSS tur 2	0.050	0.017	0.054	0.023	0.049	0.026

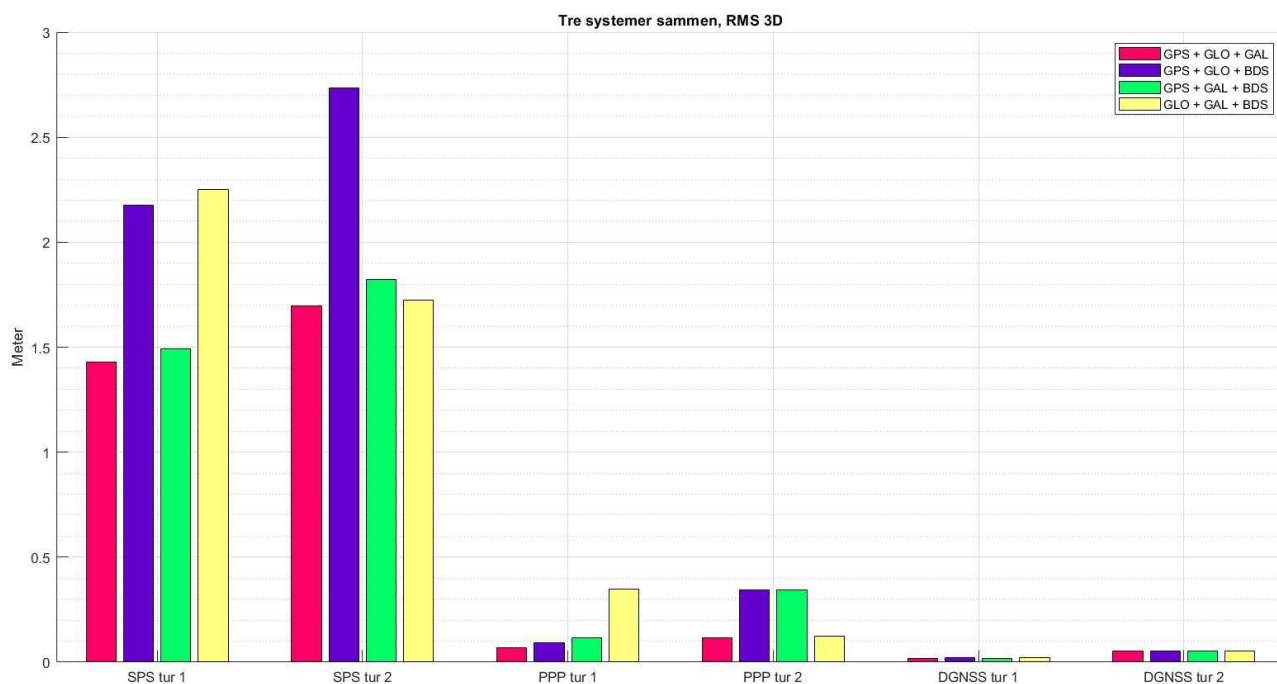
Tabell 4.4: To systemer sammen lokalt uten GPS, RMS grunnriss og høyde

For å ha noe å sammenlikne dette mot, kan vi huske at GPS og Galileo viste oss de laveste verdiene med to og to systemer, med RMS_{3D} på litt over 1,8 meter med SPS. Med PPP så vi RMS-verdier nede på nesten én desimeter.

Ser vi på SPS tur 2 med kombinasjonen GLONASS og Galileo, er nøyaktigheten like under 1,8 meter. Denne kombinasjonen viser lavere RMS-verdier enn GPS og GLONASS faktisk. Også er det uten Galileo som gir høyest RMS-verdier helt klart. Galileo viser seg som et sterkt system foreløpig. Sammenlikner vi GPS og BeiDou med Galileo og BeiDou, ser vi at Galileo gir lavere RMS-verdier enn GPS i denne testen.

Med PPP ser vi noe helt annet. Her ser vi nå at uten GPS, får vi høyere RMS-verdier dersom vi sammenlikner med kombinasjonene fra forrige side. GLONASS og Galileo gir ikke høye RMS-verdier, men vi får lavere verdier med GPS.

Med DGNSS får vi svært lave RMS-verdier ved tur 2 når vi sammenlikner med forrige side. Men det er bare kombinasjonen GLONASS og Galileo som gir tilsvarende svar på tur 1. Når det er nesten 3,5 meter er det ganske store RMS-verdier. Feilen skyldes antageligvis feil i fix-en og på grunn av for få satellitter.



Figur 4.4: Tre systemer sammen lokalt, RMS 3D

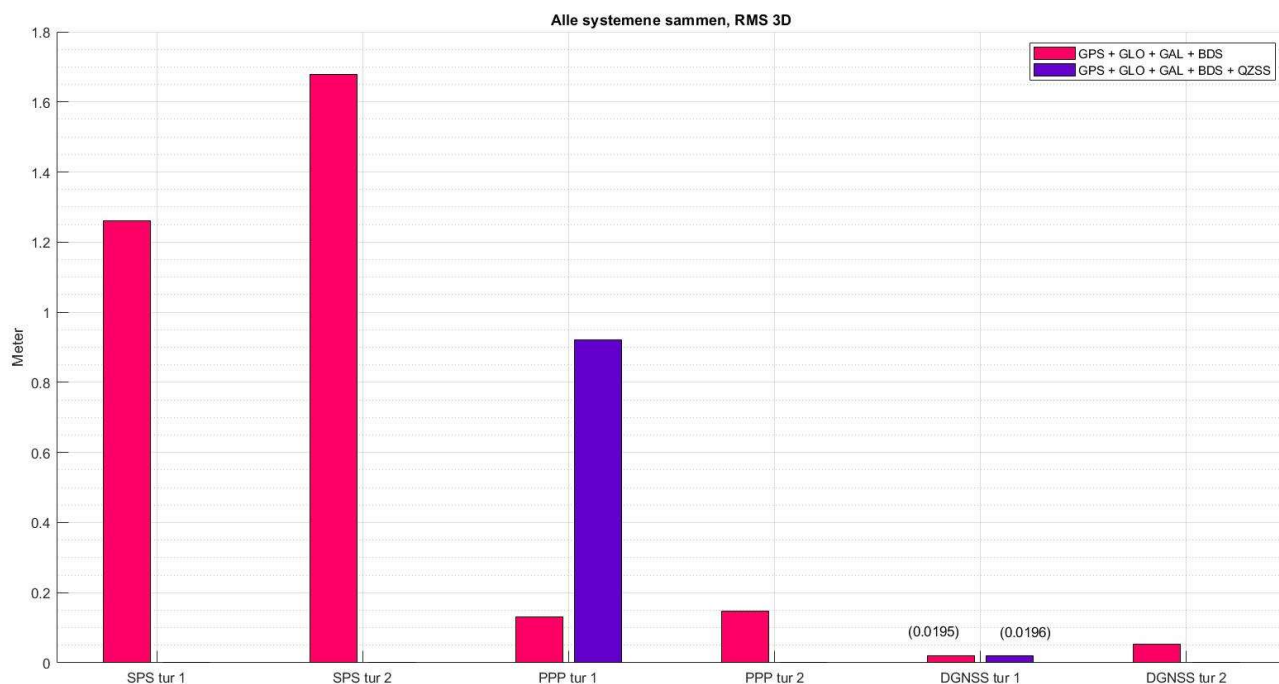
	Tre Systemer sammen, RMS grunnriss og høyde, enhet meter							
	GPS + GLO + GAL		GPS + GLO + BDS		GPS + GAL + BDS		GLO + GAL + BDS	
	Grunnr	Høyde	Grunnr	Høyde	Grunnr	Høyde	Grunnr	Høyde
SPS tur 1	0.82	1.17	0.97	1.95	0.75	1.29	1.32	1.82
SPS tur 2	0.90	1.44	1.08	2.51	1.04	1.49	0.96	1.43
PPP tur 1	0.04	0.06	0.03	0.09	0.09	0.07	0.30	0.17
PPP tur 2	0.08	0.09	0.20	0.28	0.26	0.22	0.09	0.09
DGNSS tur 1	0.012	0.016	0.011	0.016	0.012	0.014	0.014	0.017
DGNSS tur 2	0.050	0.017	0.051	0.017	0.050	0.016	0.050	0.017

Tabell 4.5: Tre systemer sammen lokalt, RMS grunnriss og høyde

Med SPS viser alle disse kombinasjonen veldig lave RMS-verdier. I grunnriss er det ganske likt mellom de forskjellige, alle er på rundt én meter. Det er i høyde som gjør at det blir litt forskjeller. Ser vi på den røde (uten BeiDou) og den grønne (uten GLONASS), er dette kombinasjonene som viser å være de mest stabile. Uten Galileo er det som gir høyest RMS-verdier, mens uten GPS overrasker kanskje litt med å ha relativt gode verdier i tur 2.

Med PPP er det lavest RMS-verdier på den røde (uten BeiDou). Her ser vi målinger med RMS-verdier på under én desimeter. Det samme gjør vi med de andre kombinasjonene også, men bare på en av turene hver, som gjør de noe mer ustabile enn kombinasjonen uten BeiDou, men det er fortsatt svært lave RMS-verdier vi ser med PPP.

RMS-verdiene ved DGNSS likner egentlig ganske mye på det vi så med to og to systemer i figur 4.2. Alle kombinasjonene har ganske like RMS-verdier. På tur 1 er verdiene på rundt én centimeter, mens på tur 2 er det noe rart i grunnriss som vi har sett tidligere.



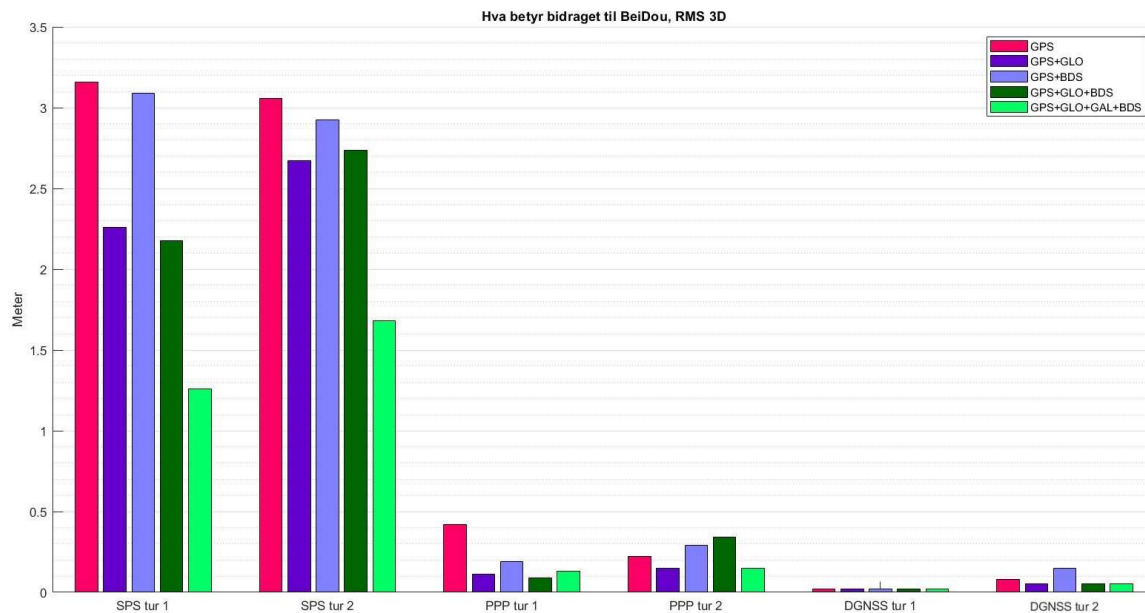
Figur 4.5: Alle systemene sammen lokalt, RMS 3D

	Hvert system alene, RMS grunnriss og høyde, enhet meter			
	GPS + GLO + GAL + BDS		GPS + GLO + GAL + BDS + QZSS	
	Grunnriss	Høyde	Grunnriss	Høyde
SPS tur 1	0.69	1.06	N/A	N/A
SPS tur 2	0.86	1.44	N/A	N/A
PPP tur 1	0.06	0.12	0.39	0.84
PPP tur 2	0.12	0.10	N/A	N/A
DGNSS tur 1	0.01193	0.01545	0.01190	0.01551
DGNSS tur 2	0.050	0.017	N/A	N/A

Tabell 4.6: Alle systemene sammen lokalt, RMS grunnriss og høyde

Som forventet ser vi svært stabile og lave RMS-verdier når vi ser på verdiene med alle de fire hovedsystemene. QZSS-observasjoner er også mulig å få i Norge, og dersom vi inkluderer disse observasjonen, blir RMS-verdiene høyere. Ikke så rart når vi vet at banene til satellittene er på andre siden av kloden og blir akkurat med over horisonten.

Videre skal vi nå se nærmere på hvor mye bedre RMS-verdiene blir mellom GPS alene, Galileo alene og når vi legger til flere systemer. Dette for å enklere se hva betyr bidraget til Galileo og BeiDou.

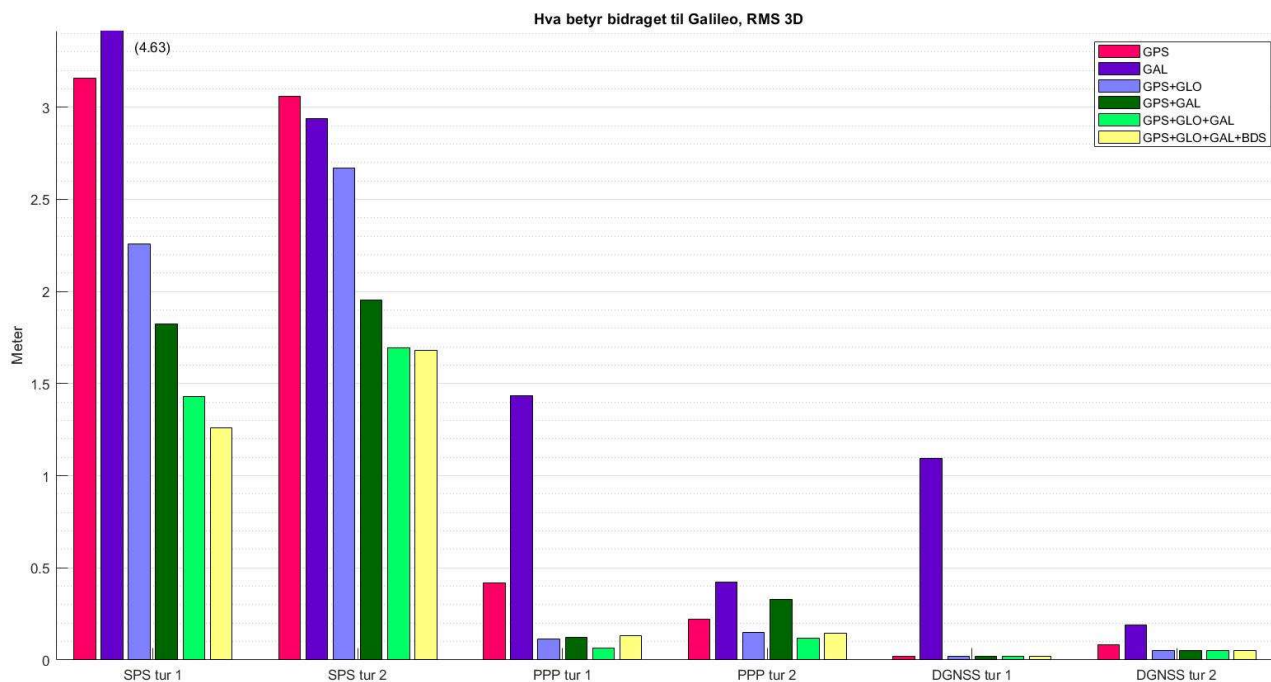


Figur 4.6: Bidraget til BeiDou lokalt, RMS_{3D}

Ved SPS ser vi at når vi legger til GLONASS med GPS, øker nøyaktigheten, men dersom vi tar GPS med BeiDou, blir egentlig ikke nøyaktigheten noe særlig bedre. Legger vi til GLONASS og har tre systemer sammen får vi ganske like RMS-verdier som GPS og GLONASS. Det er først når vi legger til Galileo hvor vi har alle fire systemene sammen at vi ser en forskjell, men det kan tolkes som at BeiDou sitt bidrag gir høyere RMS-verdier med SPS.

Ved PPP kan vi komme til den samme konklusjonen. Ser vi på GPS og GLONASS, er det omtrent akkurat den samme nøyaktigheten som dersom vi bruker alle systemene. Litt spennende er resultatet fra *PPP tur 1* GPS, GLONASS og BeiDou som gir den laveste RMS-verdier, men også det høyeste i tur 2 som gjør at det øker usikkerheten.

Ved DGNSS ser vi klart på tur 1 at kombinasjoner egentlig ikke har mye å si. Har man nok satellitter til å oppnå fix, så har ikke de ekstra satellittene noe å si. På tur 2 ser vi at det er en svakhet i GPS alene og kombinasjonen GPS og BeiDou, men det er noe vi kan forvente.



Figur 4.7: Bidraget til Galileo lokalt, RMS_{3D}

Mellom tur 1 og tur 2 ved SPS er den eneste forskjellen, at Galileo gir høyere RMS-verdier alene i forhold til GPS på tur 1. Ellers er det veldig lett å tolke at bidraget til Galileo gir lavere RMS-verdier. Ser vi på forskjellene mellom GPS og GLONASS med GPS og Galileo, gir sistnevnte mye lavere verdier. Sammen med GLONASS igjen med tre systemer blir RMS-verdiene enda lavere. Legger vi til BeiDou også med alle de fire systemene, så ser vi at BeiDou kan bidra noe for å øke nøyaktigheten.

Ser vi på PPP, kan vi konkludere med noe annet. GPS gir lavere RMS-verdier alene i forhold til Galileo. Legger vi til Galileo med GPS, ser vi at det blir høyere nøyaktighet på tur 1 og dårligere på tur 2 enn GPS og GLONASS som viser mer like RMS-verdier mellom turene. Litt rart når vi ser på RMS-verdiene rundt Galileo alene på tur 1 i forhold til tur 2 når vi også ser på DGNSS resultatene. De aller laveste RMS-verdiene viser kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo. Dersom vi legger til BeiDou og har alle de fire systemene med, får vi faktisk høyere RMS-verdier.

Ved DGNSS er RMS-verdiene akkurat slik vi forventer.

Siden vi flere ganger fikk ett avvik på rundt fem centimeter i grunnriss ved DGNSS i tur 2, skal vi se litt nærmere på hva dette kan skyldes. Foreløpig har vi sett at kombinasjonen med GPS, GLONASS og Galileo gir de laveste RMS-verdiene, tar jeg utgangspunktet i den kombinasjonen når vi nå skal se på alle avvikene til alle punktene i forhold til sann verdi.

GPS+GLONASS+Galileo, DGNSS, enhet meter									
Tur 1			Tur 2			RMS _{3D}			
Pkt.	Nord	Øst	Høyde	Nord	Øst	Høyde	Tur 1	Tur 2	
1	0.017	-0.005	0.002	0.001	0.172	-0.034	0.019	0.175	
2	-0.001	-0.015	0.005	-0.002	-0.014	-0.019	0.016	0.024	
3	0.012	-0.001	0.008	0.009	0.001	0.004	0.015	0.010	
4	-0.001	0.003	0.013	-0.060	-0.025	0.009	0.013	0.066	
5	0.0001	0.009	0.012	0.004	0.011	0.016	0.015	0.020	
6	-0.008	-0.006	0.012	-0.006	-0.009	-0.001	0.015	0.011	
7	0.007	0.001	0.018	-0.003	0.001	0.005	0.019	0.006	
8	-0.004	-0.0005	0.015	-0.0002	0.005	0.012	0.016	0.013	
9	0.010	-0.014	0.011	0.005	-0.006	0.015	0.021	0.017	
10	0.006	-0.003	-0.007	0.001	-0.0002	-0.018	0.010	0.018	
11	0.008	-0.016	0.013	0.007	-0.011	0.014	0.023	0.019	
12	0.008	0.002	-0.004	0.003	0.006	0.018	0.009	0.019	
13	-0.012	-0.006	0.045	-0.0001	-0.007	0.039	0.047	0.040	
14	0.010	-0.005	0.007	0.002	-0.001	-0.001	0.013	0.003	
15	-0.014	0.002	-0.014	-0.056	0.027	-0.035	0.020	0.071	
16	0.006	-0.002	0.011	-0.002	0.002	0.003	0.012	0.004	
17	0.007	-0.005	0.001	-0.005	0.010	0.003	0.013	0.012	
18	0.002	-0.003	0.017	0.002	-0.003	0.015	0.017	0.015	
19	0.005	-0.0003	0.010	0.007	0.010	0.005	0.011	0.013	
20	-0.017	0.001	0.029	-0.011	0.001	0.010	0.034	0.015	
21	-0.007	-0.020	-0.009	-0.004	-0.005	0.009	0.023	0.011	
22	-0.011	0.001	-0.011	0.005	0.016	0.026	0.016	0.031	
23	-0.0004	-0.008	0.005	-0.004	0.002	0.007	0.009	0.008	
1	0.003	0.001	-0.018	-0.119	0.081	0.0003	0.018	0.144	
Snitt	0.0076	0.0054	0.0128	0.0133	0.0178	0.0133	0.017	0.032	

Tabell 4.7: Alle avvikene med kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo med DGNSS

Avvikene vi spesielt skal se på er markert med «Fet» skrift. Ser vi på punkt 1 da den ble målt inn første gang og siste gang, har den fått ganske store avvik som ser ut til å være en stor faktor i feilen. Det er også litt store avvik i punkt 4 og 15 i nord. For å se hvor stor betydning disse avvikene har, har jeg først fjernet avvikene i punkt 1 og regnet ut nye RMS-verdier. Etter det har jeg fjernet avvikene i punkt 4 og 15 og regnet ut nye RMS-verdier. Dersom vi fjerner målingene i punkt 1 (1 og 24) og etterpå 4 og 15 for tur 2 får vi:

	RMS høyde (m)	RMS Grunnriss (m)	RMS _{3D} (m)
Uten punkt 1	0.016	0.021	0.027
Uten punkt 1, 4 og 15	0.015	0.009	0.018

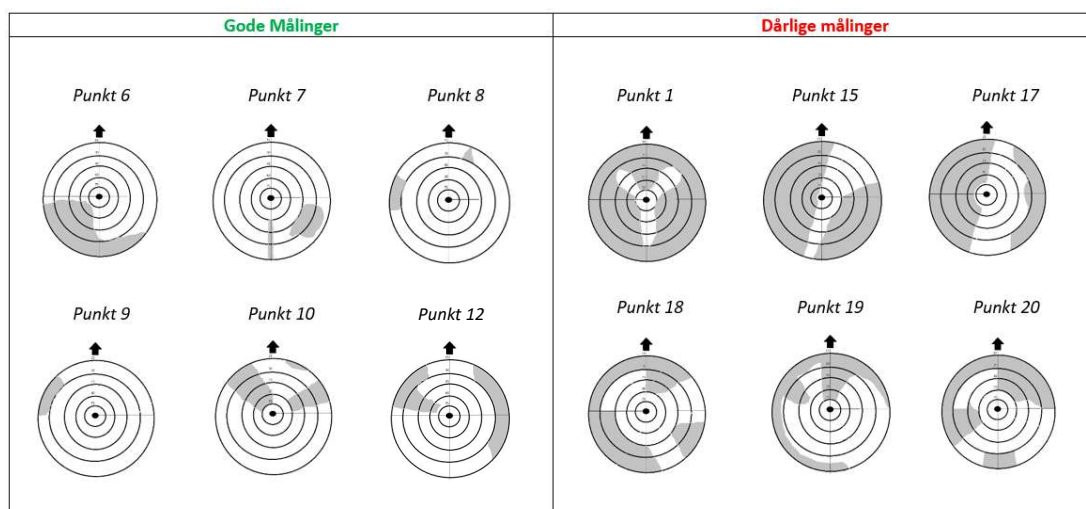
Tabell 4.8: Nye RMS-verdier uten punkt 1 og 1, 4 og 15

Fra tidligere har vi ikke sett at noen av de differensielle målingene har fått RMS-verdier i grunnriss under én centimeter. Uten de fire målingene fikk vi nå en RMS-verdi på ni millimeter i grunnriss og 15 millimeter i høyde. Ser vi tilbake til hva nøyaktigheten til CPOS er, som fra kartverkets opplysninger er åtte millimeter i grunnriss og 17 millimeter i høyde, så får vi ganske like svar. Det styrker svaret på nøyaktigheten til CPOS, men det gir oss ikke så veldig stort innblikk i hvor nøyaktig DGNSS-målinger er med etterprosessering.

Nå skal se vi nærmere hvilke av punktene som gir bedre resultater enn andre hvor vi videre tar de seks punktene med best resultat og de seks punktene med dårligst resultat for å se mye har sikt å si på de forskjellige systemene. Under ser vi alle avvikene til punktene med kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo med teknikken PPP som vi tar utgangspunktet i. Avvikene vi skal se på er markert med rødt og grønt.

GPS+GLONASS+Galileo, PPP, enhet meter									
Pkt.	Tur 1			Tur 2			RMS _{3D}		Snitt
	Nord	Øst	Høyde	Nord	Øst	Høyde	Tur 1	Tur 2	
1	0.033	-0.019	0.010	0.056	0.084	-0.058	0.039	0.116	0.078
2	-0.008	-0.044	-0.009	0.051	-0.096	-0.017	0.045	0.111	0.078
3	0.006	-0.009	0.026	0.072	-0.072	-0.005	0.029	0.102	0.066
4	0.004	-0.013	0.038	-0.003	-0.121	0.027	0.040	0.124	0.082
5	0.023	-0.021	0.013	-0.025	-0.010	0.095	0.033	0.099	0.066
6	-0.009	-0.043	0.011	-0.039	-0.050	0.014	0.045	0.065	0.055
7	0.006	-0.035	0.025	-0.031	-0.040	0.038	0.043	0.063	0.053
8	-0.007	-0.031	0.024	-0.034	-0.033	0.045	0.040	0.066	0.053
9	0.003	-0.039	0.003	-0.020	-0.024	0.053	0.040	0.061	0.051
10	0.009	-0.055	0.014	-0.022	-0.027	0.046	0.058	0.058	0.058
11	0.020	-0.055	0.009	-0.012	-0.033	0.069	0.059	0.078	0.068
12	0.015	-0.011	-0.007	-0.024	-0.0002	0.030	0.020	0.039	0.029
13	-0.036	-0.039	0.082	-0.035	-0.012	0.071	0.098	0.080	0.089
14	-0.023	-0.037	0.051	-0.030	-0.017	0.067	0.067	0.075	0.071
15	-0.015	-0.038	0.102	-0.075	0.023	0.122	0.110	0.145	0.127
16	0.029	-0.026	0.077	-0.011	0.011	0.113	0.087	0.114	0.100
17	0.006	-0.023	0.069	-0.024	0.030	0.171	0.073	0.175	0.124
18	-0.022	-0.019	0.1010	0.008	0.031	0.119	0.105	0.123	0.114
19	0.0005	-0.001	0.077	-0.014	0.040	0.137	0.077	0.145	0.110
20	-0.032	-0.023	0.070	-0.034	0.005	0.159	0.080	0.163	0.122
21	0.002	-0.043	0.048	-0.013	0.020	0.141	0.064	0.143	0.104
22	-0.008	0.006	0.051	-0.118	0.027	-0.075	0.052	0.142	0.097
23	0.002	-0.008	0.096	-0.094	0.008	0.046	0.096	0.105	0.101
1	-0.006	0.010	0.084	-0.204	0.093	-0.010	0.085	0.225	0.155
Snitt	0.014	0.027	0.046	0.044	0.038	0.072	0.062	0.109	0.085

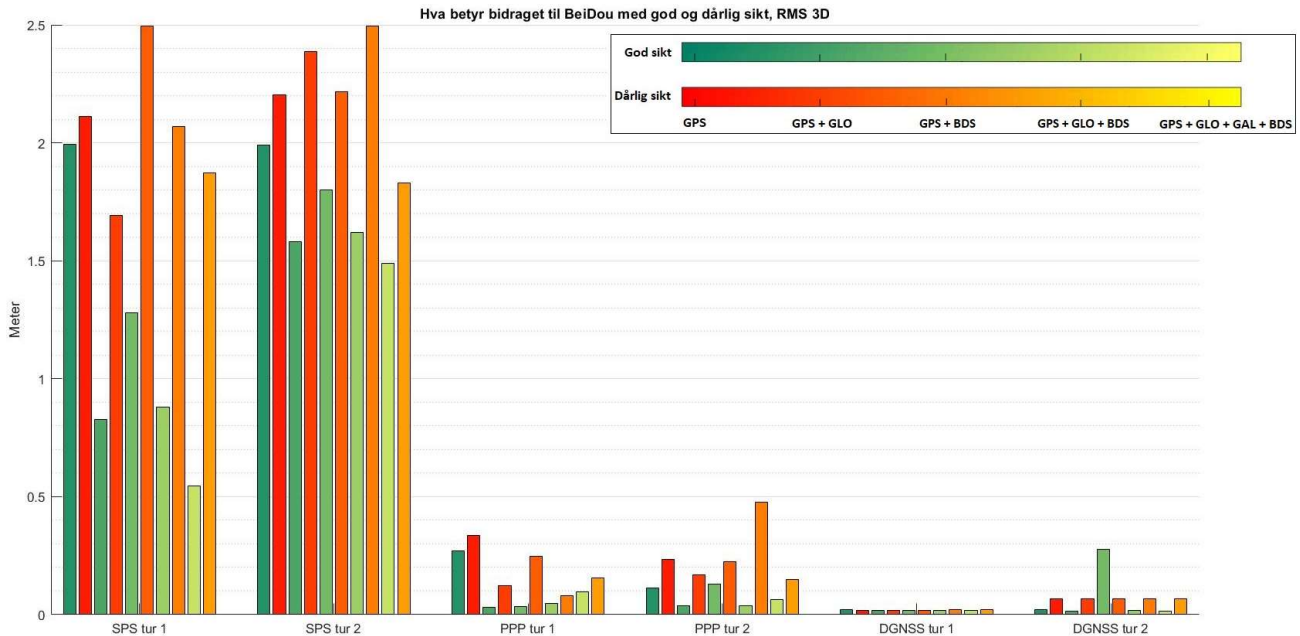
Tabell 4.9: Alle avvikene med kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo med PPP



Figur 4.8: Polarplott over sikten til punktene med gode og dårlige målinger

Det minste avviket vi har av snittet til RMS_{3D}-verdiene er på 0.0294 i punkt 12 mot det største på 0.1547 i punkt 1 (24). Ser vi gjennom ganske fort på alle avvikene på tur 1, ser vi at avvikene her er litt lavere enn de er på tur 2. Ser vi på figur 4.8, har jeg plukket ut de seks punktene som ga lavest avvik og høyest avvik, og lagt ved polarplottene over sikten. Dette gir oss et inntrykk i at sikt har en del å si, som forventet. Fra den tidligere testen om hvor det var feil i DGNSS-målingene, husker vi at det var litt rare målinger i punkt 1 og 15. Her får vi også bekreftet at sikten kan ha stor skyld i hvorfor avvikene der ble så store.

Videre skal vi nå se på hva er bidraget til Galileo og BeiDou med god og dårlig sikt. For å gjøre det enklest mulig å lese av grafen, er det akkurat det samme oppsettet i figuren som da vi så på bidraget til systemene. Nå er hver kombinasjon med god og dårlig sikt. Dersom RMS-verdiene er lave og forskjellen mellom god og dårlig sikt er liten, vil det gi et innblikk i at usikkerheten rundt målinger med dårlig sikt er lav.

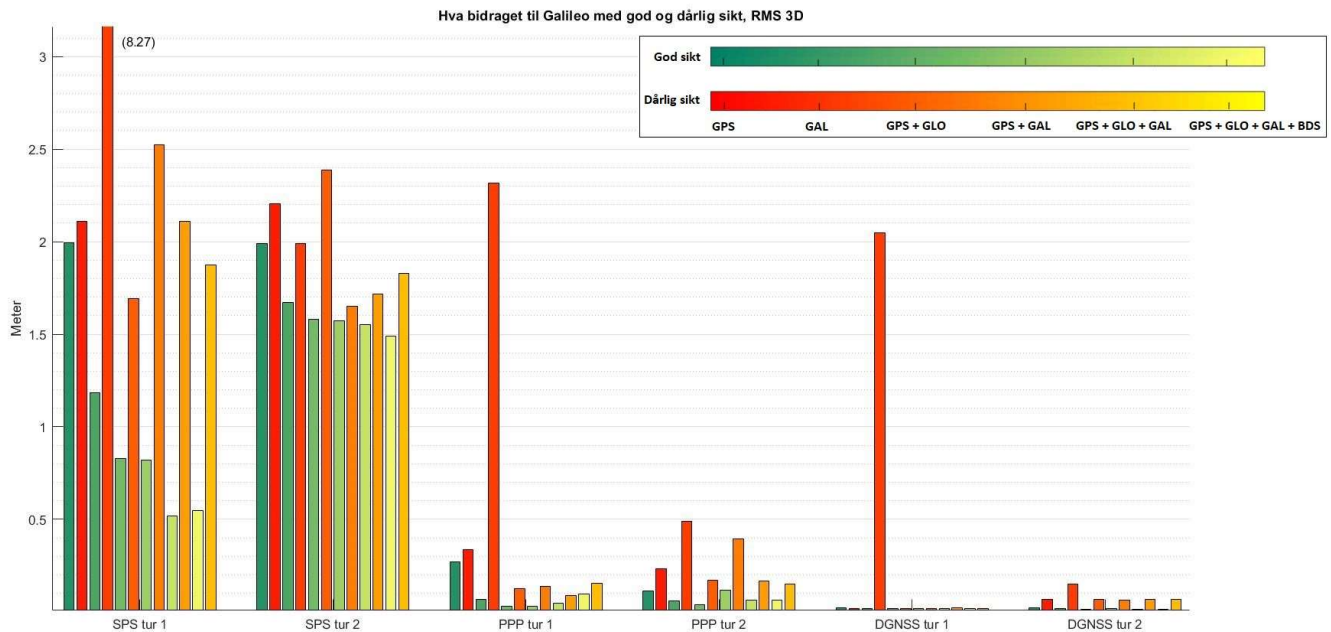


Figur 4.9: Bidraget til BeiDou lokalt med god og dårlig sikt, RMS_{3D}

Ved SPS ser vi at GPS alene gir lave og stabile RMS-verdier, siden det er liten forskjell mellom god og dårlig sikt og resultatene viser omtrent det samme fra tur 1 til tur 2. Ser vi verdiene kun med god sikt, ser vi at tur 1 og tur 2 likner på hverandre. Fra tidligere har vi sett at BeiDou minker nøyaktigheten og det gjør det også med god og dårlig sikt dessverre. Alle testene på SPS viser at GPS og GLONASS viser lavere RMS-verdier enn til og med dersom vi legger til BeiDou.

Ser vi på PPP-avvikene, viser bidraget til BeiDou seg helt greit når vi har god sikt. Med god sikt ser vi det samme som ved SPS, at GPS og GLONASS kombinasjonen er en bedre løsning. Med dårlig sikt, viser BeiDou seg litt svakere med unntak av tur 1 med GPS, GLONASS og BeiDou. Her er forskjellen mellom god og dårlig sikt svært liten. Men i tur 2 er den kombinasjonen den mest usikre.

Ved DGNSS kan vi først se på tur 2 der kombinasjonen GPS og BeiDou har den største RMS-verdien med god sikt, enda en ny svakhet til BeiDou. Ellers ser vi lave RMS-verdier og ikke noe mer å si enn hva som er konkludert med tidligere.



Figur 4.10: Bidraget til Galileo lokalt med god og dårlig sikt, RMS_{3D}

Her ser vi veldig lave RMS-verdier med Galileo med SPS. Alene viser Galileo lavere verdier enn GPS med god og dårlig sikt, med unntak av den på tur 1 med dårlig sikt. Ser vi spesielt på tur 1, er RMS-verdien for Galileo lavere enn med GPS. Sammenlikner vi med to systemer sammen, er verdiene ganske like med god sikt, men bidraget til Galileo er noe bedre enn bidraget til GLONASS. Med dårlig sikt viser Galileo egentlig litt svakheter her, men det kan skyldes at vi har noe færre Galileo satellitter enn GPS og GLONASS. Ser vi på GPS og GLONASS og kombinasjonen når vi legger til Galileo, ser vi at nøyaktigheten økes ved god sikt, men i ett av tilfellene med dårlig sikt, blir nøyaktigheten dårligere. Det er veldig spennende å se RMS-verdiene helt nede på 0,5 meter med god sikt med SPS i 3D.

Noe å merke seg som vi ikke har sett med PPP før nå, er at Galileo alene gir lavere RMS-verdier enn GPS alene dersom vi har god sikt. Med dårlig sikt, ser vi at GPS er et mye mer stabilt system og Galileo egentlig veldig ustabil. Noe som er litt rart her er når vi ser på GPS og GLONASS og den kombinasjonen når vi legger til Galileo, så ser vi at når vi legger til Galileo, så minsker nøyaktigheten med god sikt. Kombinasjonen med GPS og GLONASS ser vi er mer stabil enn kombinasjonen GPS og Galileo dersom vi ser på tur 2. Men generelt er RMS-verdiene veldig lave her.

Ved DGNSS ser vi at med Galileo alene med dårlig sikt, gir veldig høye RMS-verdier. Noe interessant ved DGNSS resultatene er at ved tur 1 er verdiene omtrent like små med dårlig sikt som ved god sikt.

For å se nærmere på resultatene rundt der vi har god sikt og dårlig sikt, skal vi nå se på differansene mellom god sikt og dårlig sikt. Dette kan gi oss en nærmere indikasjon på usikkerheten rundt hvor mye større feil vi kan få, dersom vi har litt dårlig sikt. Tabell 4.10 viser alle differansene mellom god og dårlig sikt mellom kombinasjonene vi har sett på i figur 4.9 og 4.10.

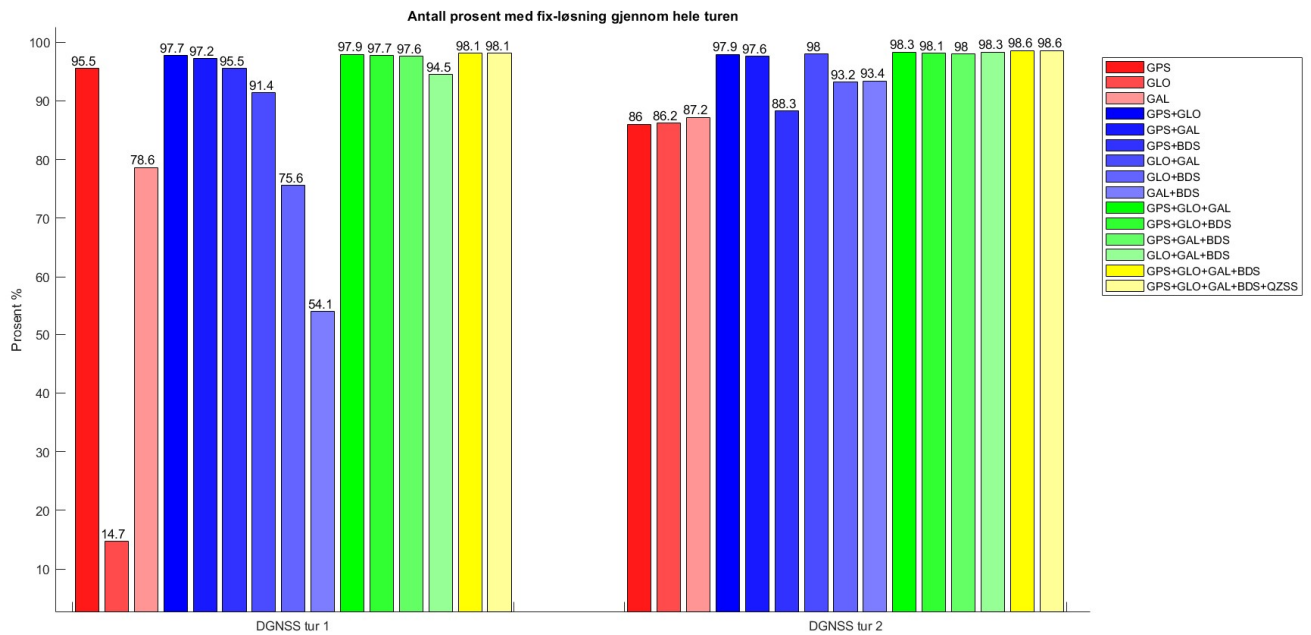
	Differanser mellom gode og dårlige målinger					
	Tur 1			Tur 2		
	SPS	PPP	DGNSS	SPS	PPP	DGNSS
GPS	0.12	0.06	-0.003	0.22	0.12	0.04
GAL	7.08	2.25	0.43	0.32	2.25	2.03
GPS+GLO						
	0.86	0.09	0.001	0.81	0.13	0.05
GPS+GAL	1.70	0.11	-0.001	0.08	0.28	0.05
GPS+BDS	1.22	0.21	-0.001	0.42	0.10	-0.21
GPS+GLO+GAL						
	1.59	0.04	0.001	0.17	0.10	0.05
GPS+GLO+BDS	1.19	0.03	-0.001	0.87	0.44	0.05
GPS+GLO+GAL+BDS						
	1.33	0.06	0.002	0.34	0.09	0.05

Tabell 4.10: Differanser mellom RMS-verdiene ved gode og dårlige målinger

Ved SPS-målingene kan vi se at det er her vi får størst variasjon i differansene. Men av alle de ulike kombinasjonene med SPS, ser vi at det er GPS alene som har lavest differanser i SPS dersom vi ser på begge turene samlet. GPS og Galileo viser aller lavest i tur 2, men viser høyest differanse av alle i SPS i tur 1. Ser vi på bidraget til Galileo, viser det seg en stor usikkerhet rundt Galileo på tur 1, mens det er veldig lav usikkerhet i tur 2. Bidraget til BeiDou viser også at det ligger litt usikkerhet her også.

Ved PPP ser vi enda en gang at det ligger svært lav usikkerhet rundt GPS alene med differansene mellom god og dårlig sikt, men denne gangen er det GPS, GLONASS og Galileo kombinasjonen som gir lavest usikkerhet. Usikkerheten ved PPP er generelt ganske lav, men det er bidraget til BeiDou som viser høyest usikkerhet blant systemene, dersom vi ser bort fra resultatene med Galileo alene.

Ved DGNSS kan vi se tilbake på da vi så på alle avvikene til GPS, GLONASS og Galileo i tabell 4.7. Da husker vi at det lå en rar feil som ga oss en feil på rundt fem centimeter i tur 5. Ser vi differanse mellom god og dårlig sikt her, ser vi at på tur 2 ligger differansene på rundt fem centimeter. Galileo og kombinasjonen GPS og BeiDou litt høyere differanser, det betyr at ved dårlige målinger har vi mistet fix-en i disse kombinasjonene. Og dette er hvor stor feilen kan bli. Ved Tur 1 ser vi at det er bare Galileo alene som gir oss høye differanser. Ved alle andre kombinasjoner varierer differansene mellom en og tre millimeter. Det er svært lavt, noe som betyr at vi får omtrent like høy nøyaktighet ved god sikt som ved dårlig sikt i denne analysen.



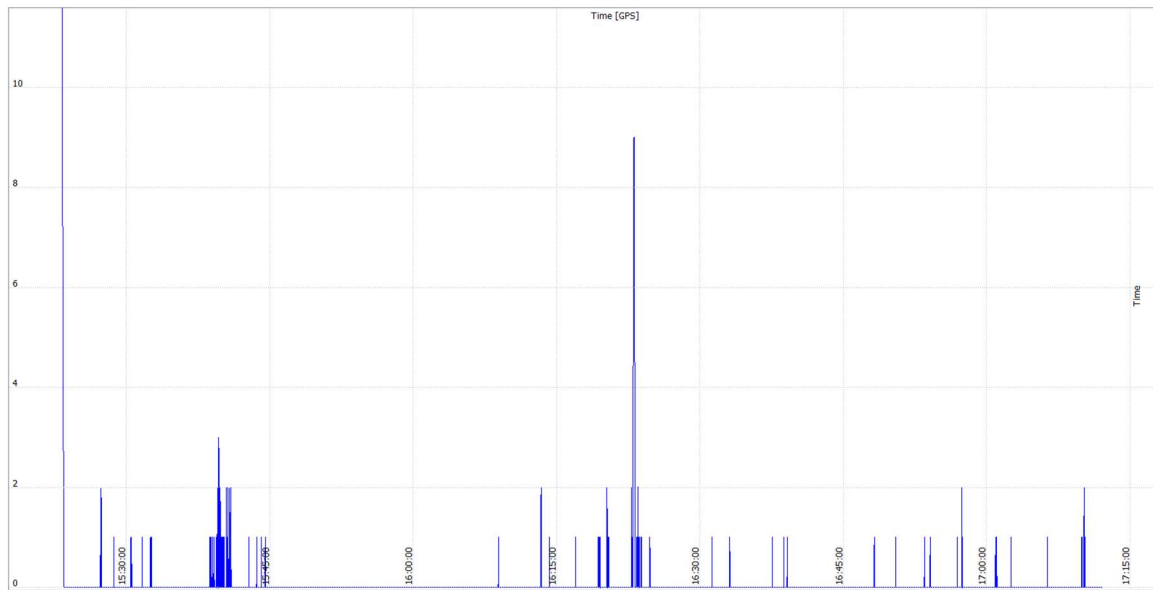
Figur 4.11: Antall prosent med fix-løsning til alle kombinasjonene lokalt

Når vi har sett på DGNSS resultater, har vi sett at tur 2 har høyere RMS-verdier enn tur 1. Ser vi på figur 4.11, ser vi den totale oversikten av alle kombinasjonene på tur 1 og tur 2, hvor stor prosentandel av turen hvor vi har hatt fix. Her kan vi faktisk se at tur 2 har hatt mye bedre dekning i forhold til å beregne fix. Ser vi på tur 2, så har Galileo alene en høyere prosentandel enn GPS, men GPS er mer stabilt når vi ser på tur 1 også. Når vi har to systemer sammen, er det lite som skiller GPS og GLONASS med GPS og Galileo, men GPS og GLONASS har hakket bedre dekning. BeiDou viser litt dårligere dekning. Når vi er på tre systemer sammen og videre, nærmer vi oss veldig så god dekning som det går an. På det høyeste ser vi er med alle systemene på tur 2 med 98.6%.

98.6% er meget bra, men noe gjør at vi ikke får 100%. I figur 4.12 ser vi presisjonsstandardavvik fra DGNSS tur 2, en figur vi får fra TerraPos. Her kan vi dedikere hvor vi mister fix-løsningen. Spesielt ser vi at vi mister den ved tidspunkt 15.40 og 16.22.

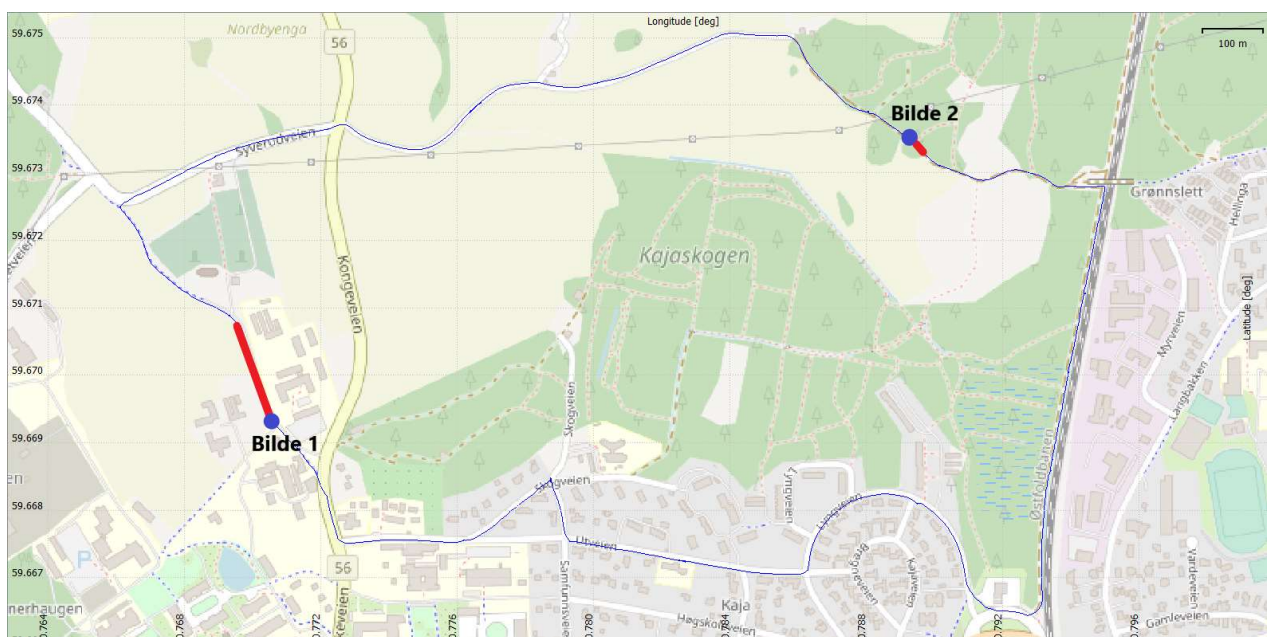


Figur 4.12: Presisjonsstandardavvik på posisjonsberegningen med DGNSS tur 2



Figur 4.13: Antall sekunder hvor vi har mistet fix-løsning

Ser vi på figur 4.13 på de to tidspunktene, ser vi mer hvor lenge fix-løsningen var borte. I tilfelle ved 15.40, ser vi egentlig at vi ikke mistet den så lenge, men veldig ofte. Ved 16.22 mistet vi den i ni sekunder på det meste.



Figur 4.14: Klart over ruta og hvor vi har mistet fix-løsning

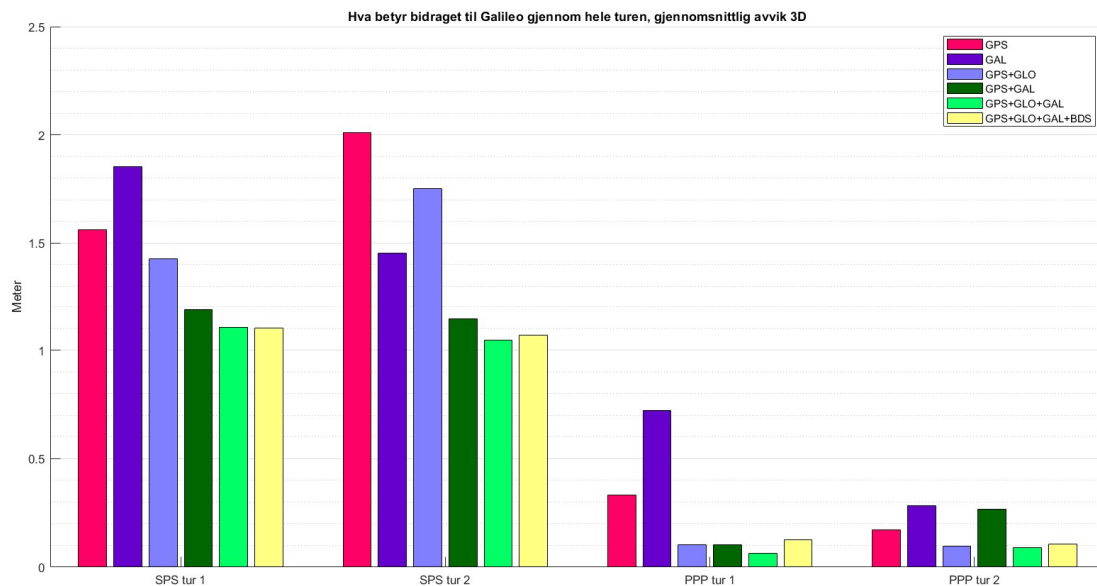
Figur 4.14 viser områdene der vi mistet fix-løsningen (rød stripe). For å se nærmere på hva dette skyldes er det avbildet to bilder av terrenget, se figur 4.15.



Figur 4.15: Bilde 1 til venstre og bilde 2 til høyre, tatt 02.05.2019

Bildene er tatt på i en annen tid på året enn da målingene ble gjort, så det kan ha vært dårligere sikt enn dette. Men vi kan tydelig se at det som forårsaker brudd i fix-løsningen, er trær som er over mottakeren i så å si alle retningene. I bildet 2 er skogen ganske mye tettere som forårsaket de ni sekundene.

Videre skal vi se på avviket gjennom hele turen. DGNSS er det vi nå setter som fasitkoordinater. Hovedsakelig skal vi se på nøyaktigheten til de håndholdte GNSS-mottakerne som tar signaler fra ulike systemer. Men først ser vi på resultatet fra hvordan resultatet ble for hele turen med Trimble-mottakeren.



Figur 4.16: Bidraget til Galileo lokalt gjennom hele turen, gjennomsnittlig avvik 3D

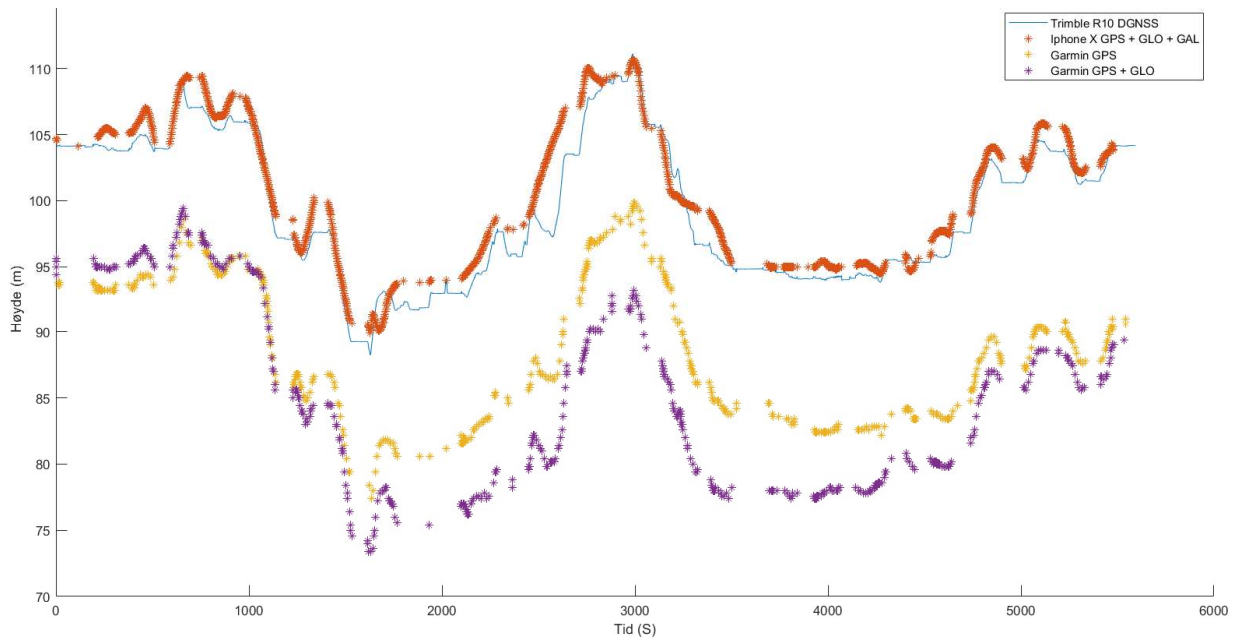
I figur 4.16 kan vi sammenlikne dataen fra figur 4.7, hvor vi så på bidraget til Galileo i de ulike kontrollpunktene. Ser vi på forskjellene, kan vi se at Galileo er et mer stabilt system her i figur 4.16 og at kombinasjonen med GLONASS er mer ustabil i SPS tur 2. Ellers likner figur 4.7 og figur 4.16 svært mye på hverandre.

Mottaker	Garmin Vivoactive HR	Garmin Vivoactive HR	iPhone X
Systemer	GPS	GPS + GLO	GPS + GLO + GAL
Gjennomsnittlig avvik 3D (m)	11.9	15.2	2.9
Gjennomsnittlig avvik 2D (m)	2.7	2.5	2.4
Gjennomsnittlig avvik H (m)	11.4	14.8	1.3
Gjennomsnittlig avvik 3D (m) med korrigerte høyder	3.0	4.4	2.9
Gjennomsnittlig avvik H (m) med korrigerte høyder	0.9	3.3	1.3
Antall observasjoner pr min	8.3	8.5	19.2

Tabell 4.11: Oversikt over avvikene fra håndholdte GNSS-mottakere, enhet meter

Ser vi i tabell 4.11 ser vi at det er noe rart med avvikene i høyde med dataen fra Garmin-klokken. Ser vi på alle avvikene gjennom turen, kan man se at alle avvikene med GPS, ligger på rundt 11 meter. Avvikene med GPS og GLONASS ligger på rundt 13 meter. Korrigerer vi dette manuelt, får vi noen nye verdier som er enklere å sammenlikne, men ikke like reelle som dersom vi ser på avvikene i 2D.

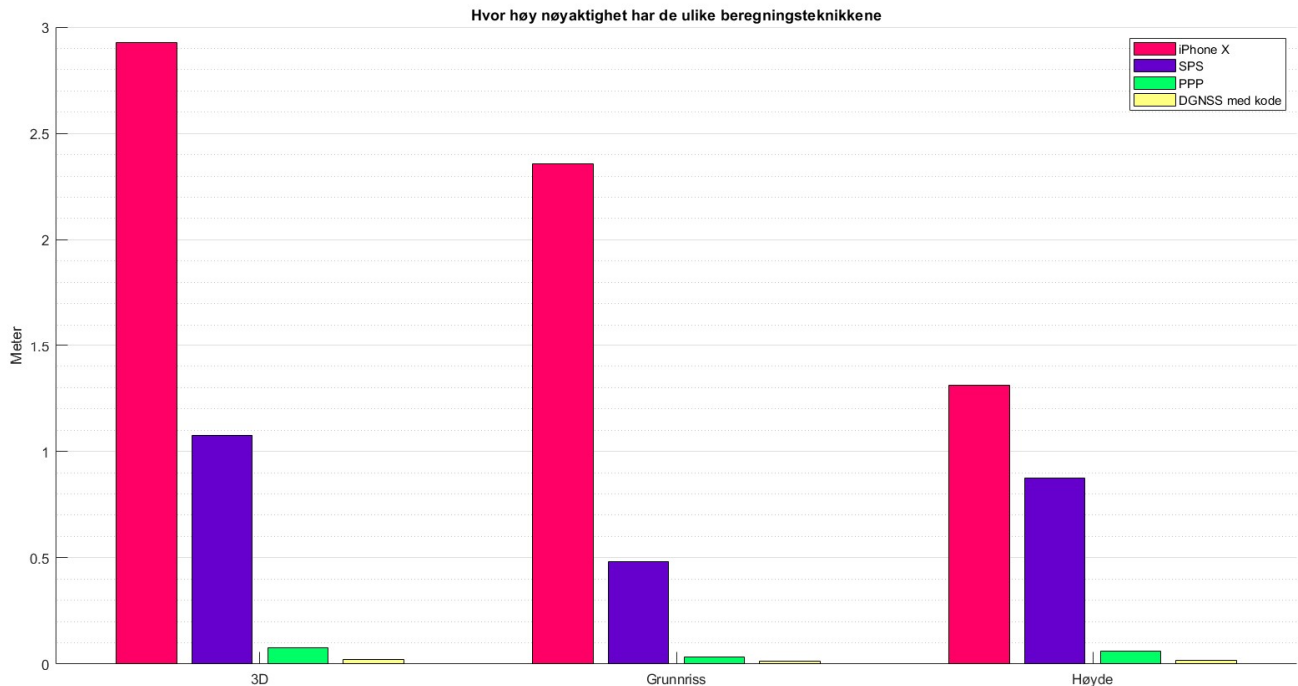
Ser vi på avvikene i 2D i tabell 4.11, ser vi at nøyaktigheten øker, men veldig lite dersom vi legger til flere systemer. Antageligvis for å spare lagringsplass logger Garmin-klokken koordinater over dobbelt så få ganger som det telefonen gjør. Sammenlikner vi da kombinasjonen GPS, GLONASS og Galileo med SPS og mobiltelefonen, så kan det se ut til at ved etterprosessering øker nøyaktigheten ved kode-observasjoner fra 2,9 meter til 1,1 meter.



Figur 4.17: Høydekurver til beregningene fra håndholdte GNSS-mottakere

Garmin opplyser at de bruker barometrisk høydemåling på klokken jeg har brukt (Garmin, 2019). Dette er en teknikk som beregner høyden ut ifra luftrykket. Fra figur 4.17 kan vi se at høyderesultatene fra telefonen gir et resultat vi kan forvente, men Garmin-klokken viser noe rart. Ser vi på Garmin med GPS og Garmin med GPS og GLONASS sammen, ser vi at høyden er i nærheten av hverandre i starten, men ut i løypa blir det ganske mange meter forskjell før de nærmer seg igjen mot slutten. Kun ut ifra disse målingene er det vanskelig å da kunne si at det er den barometriske teknikken som er årsaken, men vi kan anta det.

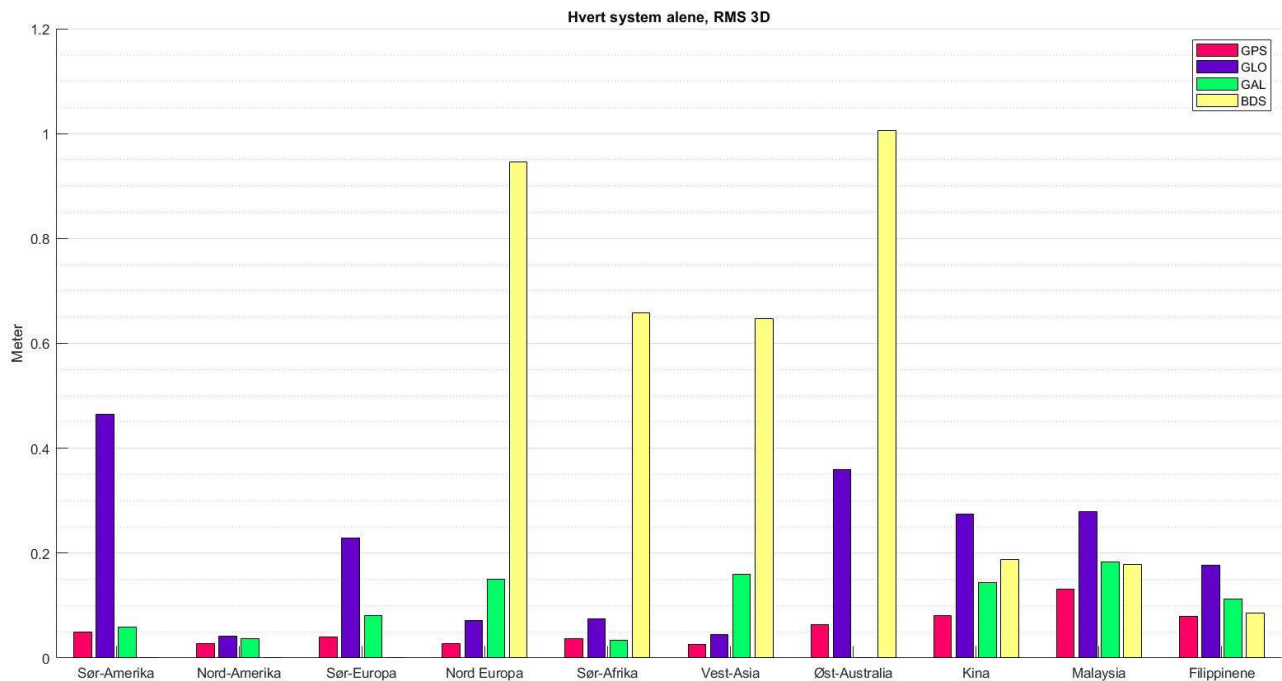
Når vi nå skal se på beregningsteknikker mot hverandre, har vi lagt tur 1 og tur 2 sammen til en samlet verdi. Her bruker vi DGNS med kode- og fase-observasjoner som fastkoordinatene.



Figur 4.18: Gjennomsnittlig avvik 3D til ulike beregningsteknikker

Ut ifra denne dataen kan det tolkes at dersom vi etterprosesserer dataen, øker nøyaktigheten fra 2,87 til 0,5 meter med kodeobservasjoner i grunnriss og 1,3 til 0,9 meter i høyde. Ser vi DGNS med kode-observasjoner, får vi en nøyaktighet på to centimeter i 3D og 1 cm i grunnriss og høyde. Dette betyr at man kan oppnå centimeters nøyaktighet også med en mottaker som kun kan beregne posisjon ut ifra kode-observasjonene med de rette teknikkene.

4.2. Globale resultater

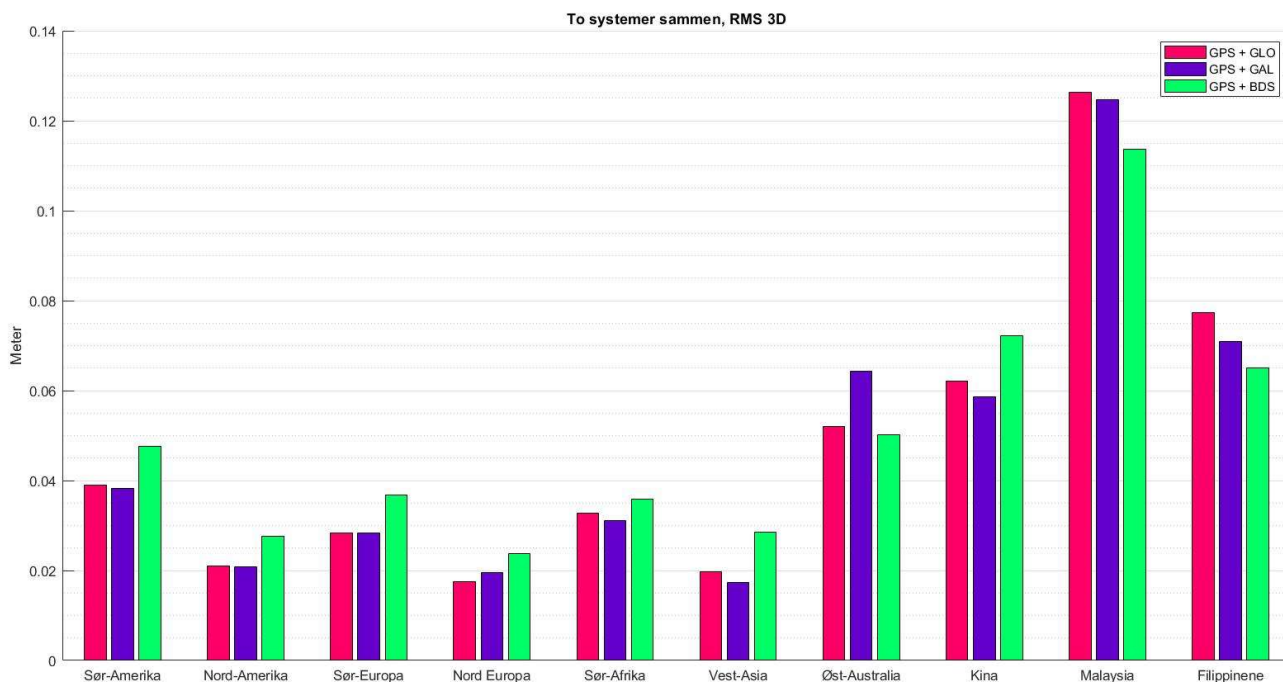


Figur 4.19: Hvert system alene globalt, RMS_{3D}

	Hvert system alene, RMS grunnriss og høyde, enhet meter							
	GPS		GLO		GAL		BDS	
	2D	Høyde	2D	Høyde	2D	Høyde	2D	Høyde
Sør-Amerika	0.0297	0.0398	0.3886	0.2553	0.0439	0.0405	Ingen Data	Ingen Data
Nord-Amerika	0.0125	0.0250	0.0229	0.0344	0.0193	0.0308	Ingen Data	Ingen Data
Sør-Europa	0.0182	0.0354	0.1035	0.2047	0.0541	0.0603	Ingen Data	Ingen Data
Nord-Europa	0.0137	0.0235	0.0459	0.0553	0.1009	0.1108	0.7299	0.6015
Sør-Afrika	0.0113	0.0356	0.0422	0.0623	0.0102	0.0318	0.5440	0.3704
Vest-Asia	0.0182	0.0188	0.0269	0.0349	0.1447	0.0676	0.4964	0.4157
Øst-Australia	0.0606	0.0215	0.3046	0.1917	Ingen Data	Ingen Data	0.9313	0.3801
Kina	0.0755	0.0278	0.2604	0.0880	0.1340	0.0541	0.1519	0.1115
Malaysia	0.1184	0.0571	0.2563	0.1113	0.1665	0.0767	0.1656	0.0682
Filippinene	0.0717	0.0330	0.1606	0.0726	0.1055	0.0404	0.0776	0.0354

Tabell 4.12: Hvert system alene globalt, RMS grunnriss og høyde

Ser vi på figur 4.19, kan vi begynne med å se på resultatene av GPS. Av alle de fire systemene kan vi enkelt konkludere med at GPS er det mest stabile og beste systemet globalt. På alle av de ti stasjonene får GPS det beste avviket på ni av stasjonene. Ser vi på GLONASS, så ser vi egentlig litt svake resultater i forhold til GPS og Galileo. Galileo gir generelt lave RMS-verdier. BeiDou klarer å nærme seg nøyaktigheten til GPS når vi er i Asia, slik som forventet. Det er litt overraskende at vi klarer å prosessere i Nord-Europa og Sør-Afrika med BeiDou. Ikke så rart at det ikke går i Amerika, når det er på baksiden av kloden vår i forhold til IGSO-banene til BeiDou. Ser vi på tabell 4.12, så er BeiDou systemet mye bedre å beregne høyder enn grunnriss, alle grunnriss-resultatene har dårligere nøyaktighet enn høydene.

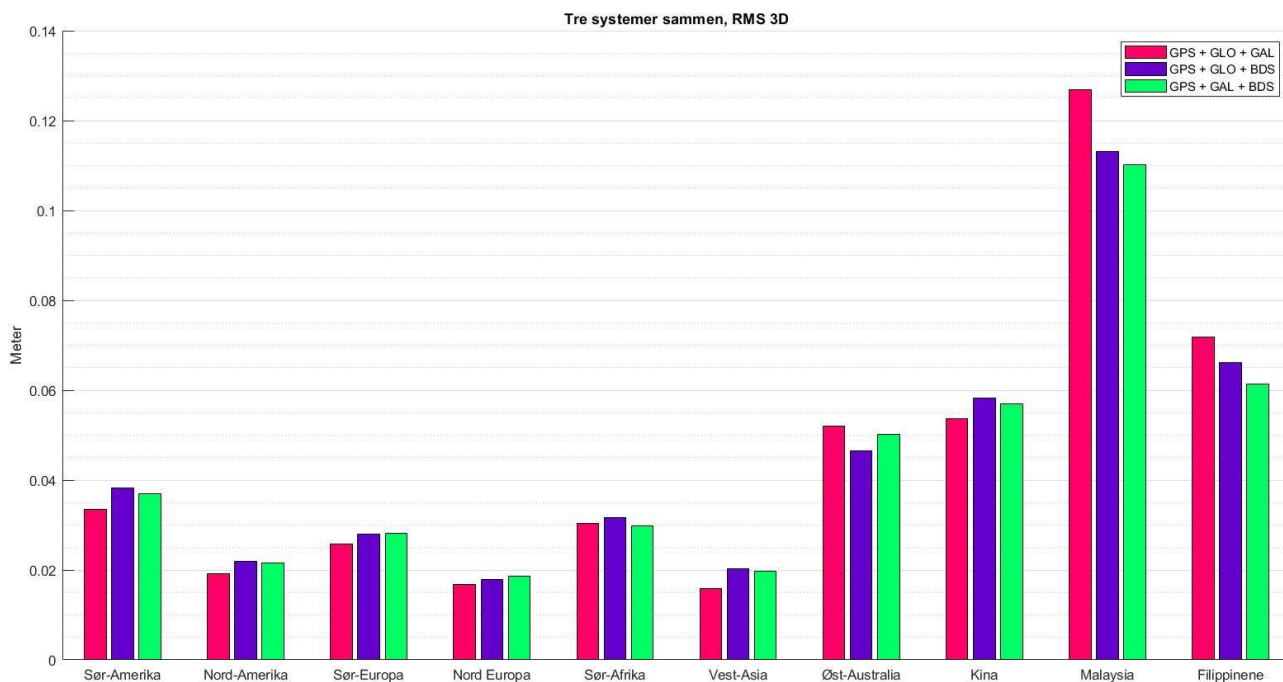


Figur 4.20: To systemer sammen globalt, RMS_{3D}

	To systemer sammen, RMS grunnriss og høyde, enhet meter					
	GPS + GLO		GPS + GAL		GPS + BDS	
	2D	Høyde	2D	Høyde	2D	Høyde
Sør-Amerika	0.0222	0.0320	0.0261	0.0279	0.0281	0.0384
Nord-Amerika	0.0079	0.0195	0.0109	0.0177	0.0133	0.0242
Sør-Europa	0.0136	0.0249	0.0133	0.0250	0.0174	0.0324
Nord-Europa	0.0082	0.0155	0.0103	0.0165	0.0124	0.0202
Sør-Afrika	0.0091	0.0314	0.0089	0.0298	0.0120	0.0339
Vest-Asia	0.0113	0.0163	0.0114	0.0130	0.0133	0.0252
Øst-Australia	0.0479	0.0205	0.0606	0.0215	0.0468	0.0182
Kina	0.0578	0.0224	0.0540	0.0229	0.0637	0.0341
Malaysia	0.1176	0.0461	0.1150	0.0481	0.1040	0.0459
Filippinene	0.0729	0.0257	0.0665	0.0245	0.0606	0.0235

Tabell 4.13: To systemer sammen globalt, RMS grunnriss og høyde

På figur 4.20 ser vi at forskjellene mellom kombinasjonene av systemene nå begynner å bli relativt lave. Men i de små forskjellene vi ser kan vi si at den kombinasjonen som gir lavest RMS-verdier globalt i denne testen, så er det GPS og Galileo som gir de laveste RMS-verdiene, men GPS og GLONASS er omtrent like bra. GPS og BeiDou gir de laveste verdiene der hvor det er dårlig BeiDou-dekning, mens der det er god BeiDou-dekning gir denne kombinasjonen de laveste RMS-verdiene.

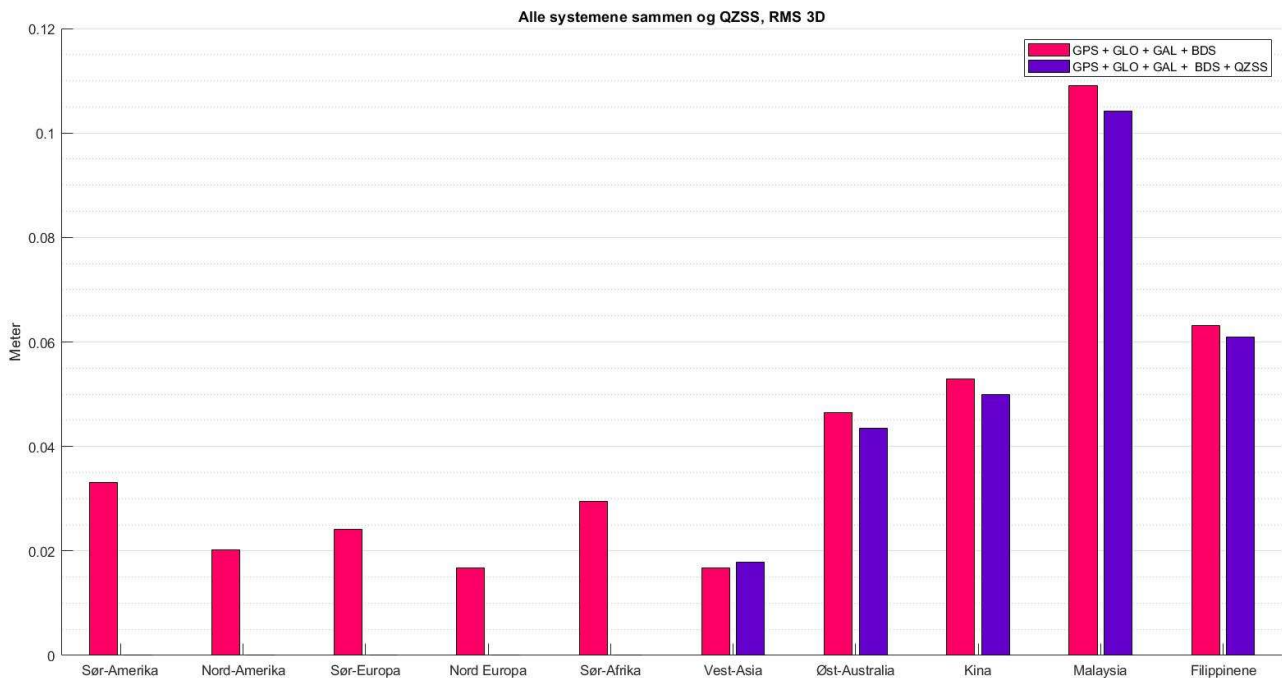


Figur 4.21: Tre systemer sammen globalt, RMS_{3D}

	Tre systemer sammen, RMS grunnriss og høyde, enhet meter					
	GPS + GLO + GAL		GPS + GLO + BDS		GPS + GAL + BDS	
	2D	Høyde	2D	Høyde	2D	Høyde
Sør-Amerika	0.0212	0.0260	0.0215	0.0316	0.0250	0.0272
Nord-Amerika	0.0087	0.0172	0.0089	0.0201	0.0112	0.0185
Sør-Europa	0.0113	0.0232	0.0135	0.0246	0.0133	0.0248
Nord-Europa	0.0087	0.0144	0.0096	0.0151	0.0093	0.0161
Sør-Afrika	0.0084	0.0293	0.0093	0.0303	0.0093	0.0283
Vest-Asia	0.0092	0.0129	0.0102	0.0176	0.0100	0.0171
Øst-Australia	0.0479	0.0205	0.0427	0.0186	0.0468	0.0182
Kina	0.0497	0.0202	0.0524	0.0254	0.0508	0.0257
Malaysia	0.1193	0.0433	0.1060	0.0394	0.1032	0.0386
Filippinene	0.0680	0.0230	0.0627	0.0212	0.0582	0.0195

Tabell 4.14: Tre systemer sammen globalt, RMS grunnriss og høyde

Resultatene her viser stabilitet i alle kombinasjonene. Sammenlikner vi alt i tabell 4.14 er forskjellene svært små. I figur 4.21, kan vi konkludere med at GPS, GLONASS og Galileo (rød) er sterkest globalt og GPS, GLONASS og BeiDou (blå) er svakest. Med god BeiDou-dekning er GPS, Galileo og BeiDou (grønn) kombinasjonen med lavest avvik.

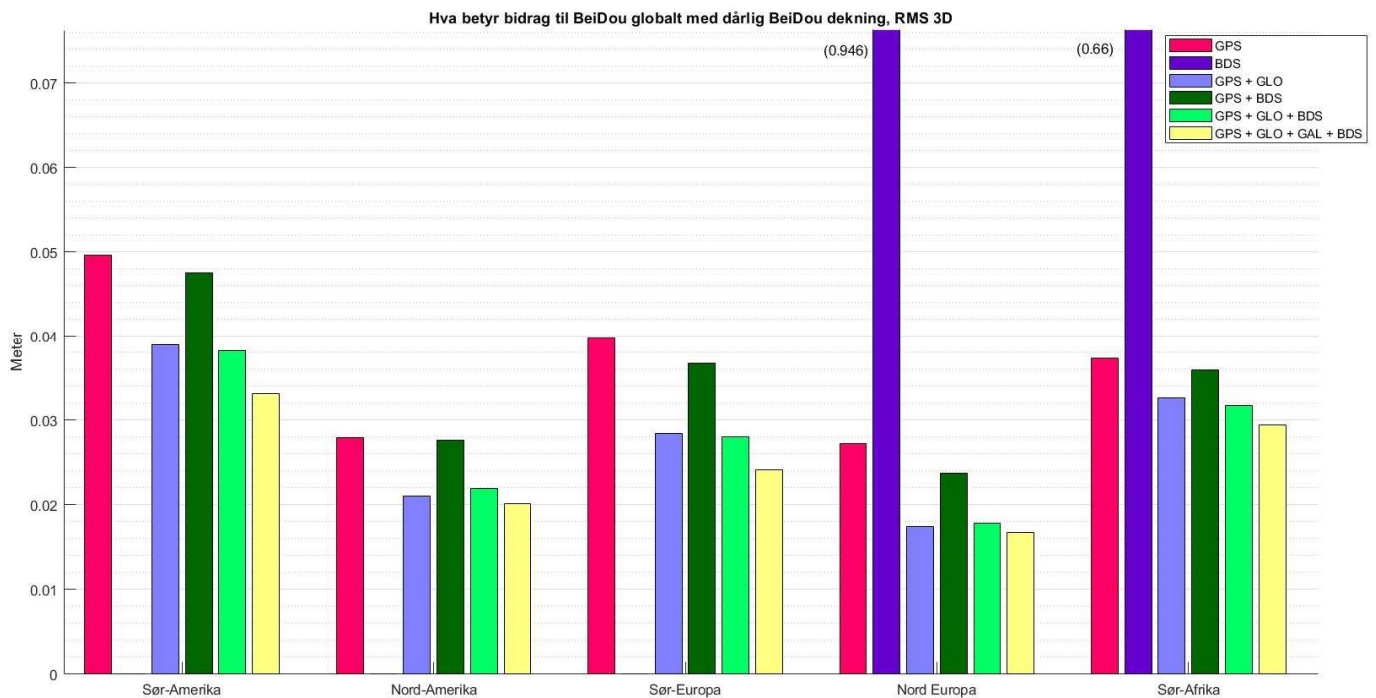


Figur 4.22: Alle systemene sammen globalt, RMS_{3D}

	Alle systemene sammen, RMS grunnriss og høyde, enhet meter			
	GPS + GLO + GAL + BDS		GPS + GLO + GAL + BDS + QZSS	
	2D	Høyde	2D	Høyde
Sør-Amerika	0.02	0.03	N/A	N/A
Nord-Amerika	0.01	0.02	N/A	N/A
Sør-Europa	0.01	0.02	N/A	N/A
Nord-Europa	0.01	0.01	N/A	N/A
Sør-Afrika	0.01	0.03	N/A	N/A
Vest-Asia	0.008	0.014	0.008	0.016
Øst-Australia	0.043	0.019	0.040	0.018
Kina	0.048	0.022	0.045	0.021
Malaysia	0.103	0.035	0.099	0.032
Filippinene	0.060	0.020	0.058	0.019

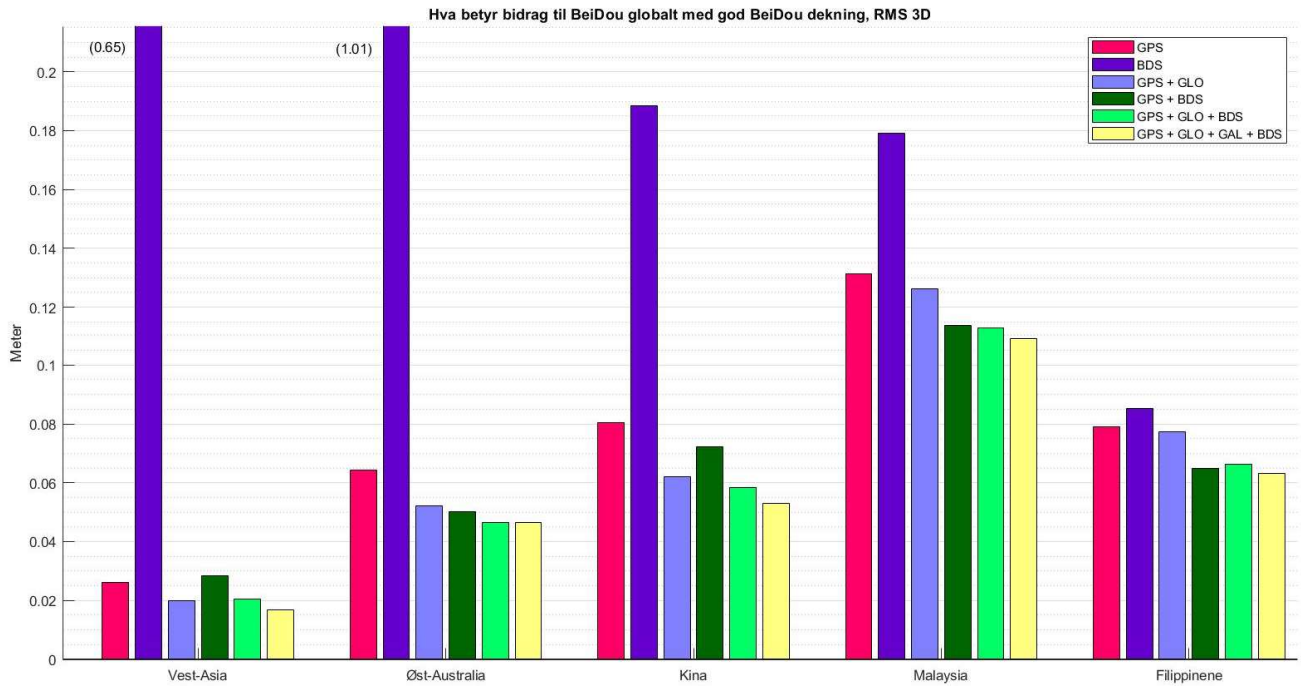
Tabell 4.15: Alle systemene sammen globalt, RMS grunnriss og høyde

Svært tydelig kan vi se dekningen til systemet QZSS. Det overrasker litt at vi ikke får noen resultater i Afrika og Europa, siden vi fikk det på den lokale analysen, men det mest spennende her er å se at der vi har fått QZSS-data, har RMS-verdiene blitt lavere utenom i Vest-Asia.



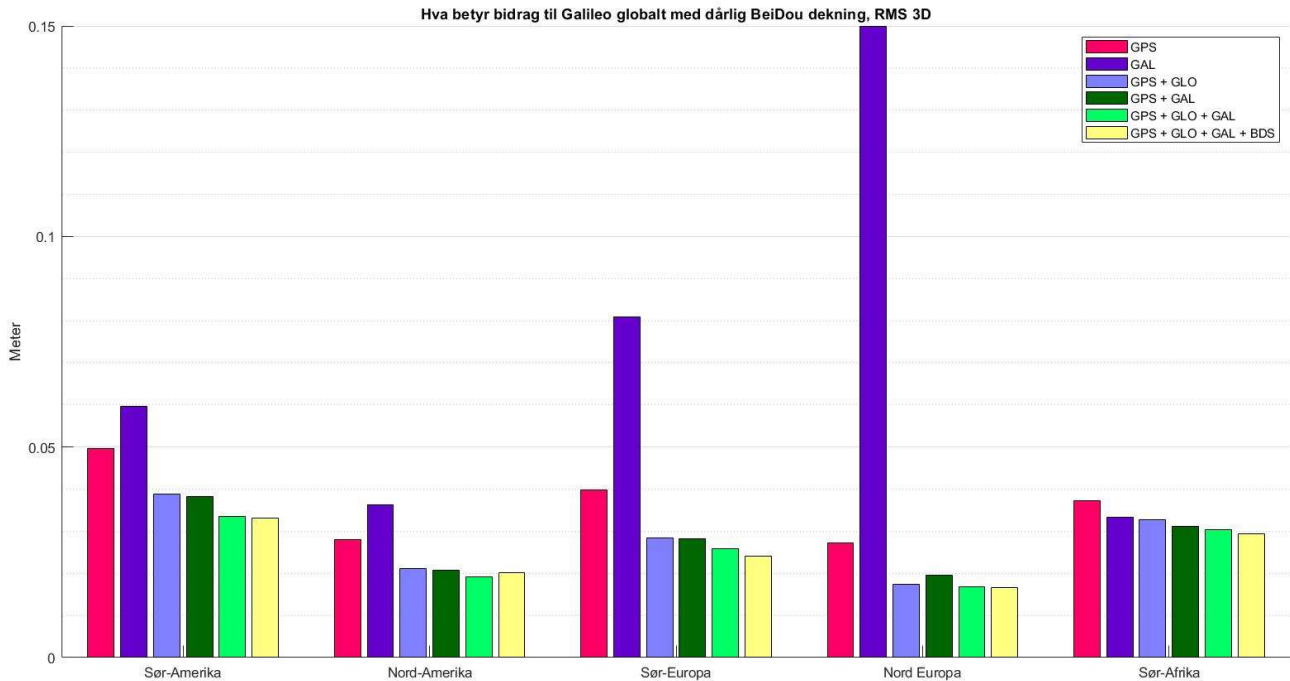
Figur 4.23: Bidraget til BeiDou med dårlig BeiDou-dekning, RMS_{3D}

Ser vi på GPS og sammenlikner med GPS og GLONASS får vi høyere nøyaktighet. Dersom vi ser på GPS og BeiDou, så blir nøyaktigheten bedre, men svært lite. Ser vi på GPS og GLONASS og når vi legger til BeiDou (lyseblå og lysegrønn), så ser vi faktisk at nøyaktigheten blir dårligere i Nord-Amerika og Nord-Europa. Dette tyder på at man kan med en høyere sikkerhet få bedre resultater dersom vi ekskluderer BeiDou dataen i disse områdene dersom man ikke har muligheten til å bruke alle fire systemene. Med alle fire systemene, får vi den høyeste nøyaktigheten. Men det er ganske spennende å se hvordan GPS gjør det alene mot alle fire samlet. Forskjellene der er ikke så veldig store.



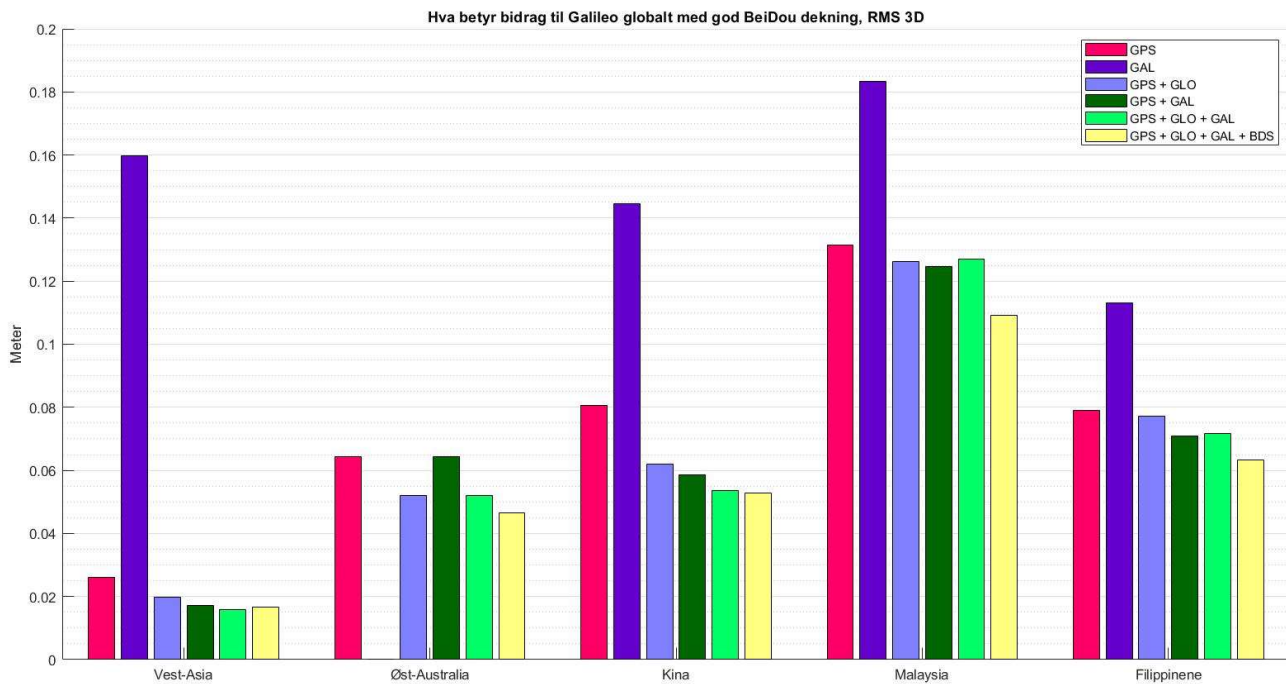
Figur 4.24: Bidraget til BeiDou med god BeiDou-dekning, RMS_{3D}

Fra figur 4.24 ser vi at bidraget til BeiDou hjelper svært godt til i landene med god BeiDou-dekning. Foreløpig er ikke BeiDou et system å satse på alene, men sammen med GPS, ser vi at vi oppnår høyere nøyaktighet enn ved GPS og GLONASS. Legger vi til BeiDou i den sistnevnte kombinasjon, hjelper BeiDou godt til for å oppnå høyere nøyaktighet. I Filippinene kan vi se at forskjellen mellom GPS og BeiDou og GPS, GLONASS og BeiDou, går litt feil vei. Legger vi til GLONASS, så minker nøyaktigheten. Men vi kan enda en gang konkludere med at når vi legger til Galileo, oppnås den høyeste nøyaktigheten.



Figur 4.25: Bidraget til Galileo med dårlig BeiDou-dekning, RMS_{3D}

Her ser vi at forskjellene er relativt små. Bruker vi alle fire systemene får vi den høyeste nøyaktigheten, med unntak av i Nord-Amerika. Legger vi til GLONASS med GPS og Galileo med GPS, ser vi at med Galileo, få vi en noe høyere nøyaktighet nesten hver gang. I Nord-Europa er det dårligere. Ser vi på forskjellen det blir mellom GPS og GLONASS og når vi legger til Galileo (lyseblå og lysegrønn), så blir nøyaktigheten bedre hver gang. Men selv om vi har dårlig BeiDou-dekning, så er alle fire systemene bedre enn med GPS, GLONASS og Galileo.



Figur 4.26: Bidraget til Galileo med god BeiDou-dekning, RMS_{3D}

Her er konklusjonen ganske lik som den vi så på forrige side. Men ser vi spesielt på Malaysia og Filippinene, så blir nøyaktigheten ganske mye større når vi legger til BeiDou i forhold til når vi legger til Galileo. Dekningen i Asia vises å være veldig bra.

4.3. Oppsummering av avvikene

	Tur 1				Tur 2		
	SPS	PPP	DGNSS		SPS	PPP	DGNSS
GPS	3.16	0.42	0.021		3.06	0.22	0.081
GLO	4.04	1.51	2.675		2.46	0.71	0.062
GAL	4.63	1.44	1.094		2.94	0.42	0.190
GPS+GLO							
GPS+GLO	2.26	0.11	0.021		2.67	0.15	0.053
GPS+GAL	1.82	0.12	0.018		1.95	0.33	0.052
GPS+BDS	3.09	0.19	0.020		2.93	0.29	0.148
GLO+GAL	2.44	0.42	0.023		1.76	0.21	0.053
GLO+BDS	4.95	1.56	3.399		2.88	0.42	0.059
GAL+BDS	3.15	0.98	0.245		2.63	0.45	0.056
GPS+GLO+GAL							
GPS+GLO+GAL	1.43	0.07	0.019		1.70	0.12	0.053
GPS+GLO+BDS	2.18	0.09	0.020		2.73	0.34	0.054
GPS+GAL+BDS	1.49	0.12	0.018		1.82	0.34	0.052
GLO+GAL+BDS	2.25	0.35	0.022		1.72	0.12	0.053
GPS+GLO+GAL+BDS							
GPS+GLO+GAL+BDS	1.26	0.13	0.019		1.68	0.15	0.053
ALLE	N/A	0.92	0.020		N/A	N/A	N/A

Tabell 4.16: Oppsummering av alle RMS 3D verdiene lokalt i Ås, enhet meter

	God Sikt						
	Tur 1				Tur 2		
	SPS	PPP	DGNSS		SPS	PPP	DGNSS
GPS	1.99	0.27	0.020		2.00	0.11	0.021
GLO	2.57	0.21	1.775		2.57	0.20	0.019
GAL	1.19	0.07	0.019		1.67	0.06	0.016
GPS+GLO							
	0.83	0.03	0.018		1.58	0.04	0.016
GPS+GAL							
	0.82	0.03	0.019		1.57	0.12	0.017
GPS+BDS							
	1.28	0.04	0.019		1.80	0.13	0.276
GLO+GAL							
	1.28	0.25	0.018		1.24	0.06	0.014
GLO+BDS							
	3.69	0.37	0.031		2.26	0.23	0.021
GAL+BDS							
	1.18	0.25	0.018		1.68	0.16	0.017
GPS+GLO+GAL							
	0.52	0.05	0.018		1.55	0.07	0.015
GPS+GLO+BDS							
	0.88	0.05	0.017		1.62	0.04	0.019
GPS+GAL+BDS							
	0.74	0.05	0.019		1.49	0.11	0.018
GLO+GAL+BDS							
	1.19	0.12	0.018		1.01	0.08	0.016
GPS+GLO+GAL+BDS							
	0.55	0.09	0.018		1.49	0.06	0.016
ALLE	N/A	0.28	0.018		N/A	N/A	N/A
	Dårlig sikt						
	Tur 1				Tur 2		
	SPS	PPP	DGNSS		SPS	PPP	DGNSS
GPS	2.11	0.33	0.018		2.21	0.23	0.066
GLO	5.28	1.91	3.803		2.69	1.21	0.076
GAL	8.27	2.32	2.046		1.99	0.49	0.150
GPS+GLO							
	1.69	0.12	0.019		2.39	0.17	0.067
GPS+GAL							
	2.52	0.14	0.018		1.65	0.39	0.065
GPS+BDS							
	2.49	0.25	0.018		2.22	0.23	0.067
GLO+GAL							
	3.31	0.54	0.028		1.73	0.16	0.068
GLO+BDS							
	6.34	2.00	0.044		3.42	0.22	0.076
GAL+BDS							
	5.22	1.42	0.047		2.03	0.58	0.076
GPS+GLO+GAL							
	2.11	0.09	0.020		1.72	0.17	0.067
GPS+GLO+BDS							
	2.07	0.08	0.020		2.50	0.48	0.067
GPS+GAL+BDS							
	1.86	0.05	0.017		1.73	0.32	0.065
GLO+GAL+BDS							
	2.93	0.37	0.023		1.89	0.13	0.067
GPS+GLO+GAL+BDS							
	1.87	0.16	0.018		1.83	0.15	0.066
ALLE	N/A	0.25	0.019		N/A	N/A	N/A

Tabell 4.17: Oppsummering av alle RMS 3D verdiene lokalt i Ås med god og dårlig sikt, enhet meter

	Dårlig BeiDou-dekning				
	Sør-Amerika	Nord-Amerika	Sør-Europa	Nord-Europa	Sør-Afrika
GPS	0.050	0.028	0.040	0.027	0.037
GLO	0.465	0.041	0.230	0.072	0.075
GAL	0.060	0.036	0.081	0.150	0.033
BDS	N/A	N/A	N/A	0.946	0.658
GPS+GLO					
	0.039	0.021	0.028	0.017	0.033
GPS+GAL					
	0.038	0.021	0.028	0.019	0.031
GPS+BDS					
	0.048	0.028	0.037	0.024	0.036
GPS+GLO+GAL					
	0.033	0.019	0.026	0.017	0.030
GPS+GLO+BDS					
	0.038	0.022	0.028	0.018	0.032
GPS+GAL+BDS					
	0.037	0.022	0.028	0.019	0.030
GPS+GLO+GAL+BDS					
	0.033	0.020	0.024	0.017	0.029
God BeiDou-dekning					
	Vest-Asia	Øst-Australia	Kina	Malaysia	Filippinene
GPS	0.026	0.064	0.080	0.131	0.079
GLO	0.044	0.360	0.275	0.279	0.176
GAL	0.160	N/A	0.144	0.183	0.113
BDS	0.647	1.006	0.188	0.179	0.085
GPS+GLO					
	0.020	0.052	0.062	0.126	0.077
GPS+GAL					
	0.017	0.064	0.059	0.125	0.071
GPS+BDS					
	0.028	0.050	0.072	0.114	0.065
GPS+GLO+GAL					
	0.016	0.052	0.054	0.127	0.072
GPS+GLO+BDS					
	0.020	0.046	0.058	0.113	0.066
GPS+GAL+BDS					
	0.020	0.050	0.057	0.110	0.061
GPS+GLO+GAL+BDS					
	0.017	0.046	0.053	0.109	0.063
ALLE	0.018	0.043	0.050	0.104	0.061

Tabell 4.18: Oppsummering av alle RMS 3D verdiene globalt, enhet meter

Diskusjon og konklusjon

5. Diskusjon og konklusjon

5.1. Diskusjon

Oppgaven viser stort sett at Galileo og BeiDou er godt på vei til å være egne selvstendige systemer. Sistnevnte, BeiDou, har vist relativt dårlige resultater i Norge, men det er til å forvente når vi har observasjoner fra kun en satellitt i MEO-bane og to-tre satellitter i IGSO-bane. Det er overraskende nok at vi får inn signaler fra satellittene i IGSO-banene, når vi i Terrapos har satt en grense på at satellitter med en elevasjonsvinkel på under ti grader, ikke skal bli brukt. Det er veldig synd at vi ikke har fått sett ordentlig på hvordan nøyaktigheten til BeiDou er ut ifra de 30 satellittene vi får signaler fra, grunnet at vi bare får brukt ti oppskutte satellitter i etterprosesseringen. Allikevel ser vi at systemet fungerer svært godt i deler av Asia. Det blir veldig spennende å se hvordan nøyaktigheten blir når BeiDou er fullt operativt. Tenker vi på fremtiden til Galileo, blir det veldig interessant å se hvor god nøyaktighet man kan oppnå når det er fullt operativt. Vi har tydelig sett at bidraget til Galileo hjelper svært godt til, og alene er det fullt mulig å bruke systemet til posisjonsberegning. De forventningene vi hadde før vi begynte, var at GPS og GLONASS skulle være et godt alternativ, grunnet at det er det vi kjenner godt til fra før. GLONASS har i denne analysen vist oss flere ganger at de gir dårlige resultater i kombinasjoner i de ulike teknikkene. QZSS er også et system som øker nøyaktigheten, men kun i deler av Asia. I Norge blir nøyaktigheten relativt mye dårligere. GPS viser seg fortsatt å være systemet som bidrar mest til å gi de laveste avvikene.

Ser vi på metoden vi har testet systemene på i Ås, har den vært helt grei. Skulle jeg gjort en liknende test igjen, ville jeg ikke brukt flere målinger med CPOS-dekning før en utjevning. Noe jeg kunne gjort annerledes er å ha brukt de ti koordinatene i hvert punkt med DGNSS måling, og gjort en utjevning av de for å beregne hvert kontrollpunkt. Det mest ideelle ville vært statistisk måling på alle punktene, men det er en meget stor jobb, så da ville jeg ha brukt færre kontrollpunkter. CPOS lover en nøyaktighet med åtte millimeter i grunnriss og 17 millimeter i høyde (Kartverket, D, 2019). Men med DGNSS, skal vi i teorien få enda lavere nøyaktighet. Hvor høy nøyaktighet man får med DGNSS, skulle vi gjerne ha sett på.

Metoden jeg brukte for å teste nøyaktigheten på aktivitetsklokken og mobiltelefonen er egentlig ikke så veldig gunstig, siden vi da bare ser på en måling fra ett tilfelle i hver kombinasjon. Men vi klarte å få frem en svakhet i aktivitetsklokken ved høydeberegningene. Skulle vi sett nærmere på dette burde vi kanskje ha brukt ti målinger i hver av kombinasjonene også med flere aktivitetsklokker som regner på høyder med barometrisk høydeberegning, men da burde jeg ha valgt et kortere testområde.

Ser vi på beregningsteknikker, ser vi at etterprosessering gir høyere nøyaktighet på målingene. Det som fanger tankene mine er hvorfor håndholdte GNSS-mottakere som mobiltelefoner ikke bruker dette. Ved Android telefoner kan vi logge rådata og få ut rinex-filer. Ved etterprosesseringen legger vi ved korreksjonsdata fra bakkestasjonene som ikke

er tilgjengelig før noen dager senere, så det blir et minus at man må vente så lenge. Men på en kartapplikasjon i grunnriss kan vi oppleve nesten fire ganger så høy nøyaktighet ved etterprosessering dersom vi stoler på tallene vi har fått fra denne analysen med en måling. Dette burde gå an å implementere i treningsapper som Strava eller Endomondo, hvor man får opp foreløpige data av loggingen med en gang, mens den korrekte dataen kommer når korreksjonsdataene blir tilgjengelig. Dersom kartverket også hadde lansert Etpos som en gratis tjeneste, kan det tenkes at vi kanskje får centimeters nøyaktighet på da en mottakertype som vi «alle» eier.

5.2.Konklusjon

Fra resultatene kan vi gi en helhetlig konklusjon at Galileo hjelper svært godt til med å øke nøyaktigheten. Spesielt bra hjelper det til med kode-observasjoner. BeiDou viser seg å ikke være så bra i Norge i denne analysen, men at det er veldig bra i Asia, der det er god BeiDou dekning. GPS viser seg som forventet som det beste systemet, mens GLONASS viser svakheter i store deler av denne analysen.

	Kinematisk		Statisk	
	Ås		God BeiDou dekning	Dårlig BeiDou dekning
Kombinasjoner	SPS	PPP	PPP	PPP
GPS → GPS + GLO	21%	52%	11%	24%
GPS + GLO → GPS + GLO + GAL	37%	31%	5%	9%
GPS + GLO + GAL → GPS + GLO + GAL + BDS	6%	-51%	10%	2%
GPS → GPS + GLO + GAL + BDS	53%	51%	24%	32%
GPS + GLO → GPS + GLO + GAL + BDS + GAL + BDS + QZSS	N/A	-600%	5%	N/A

Tabell 5.1: Samlede resultater med økning i prosent fra en kombinasjon til en annen

Resultatene har vist oss at i Ås er bidraget til Galileo meget bra. Fra tabell 5.1 kan vi se at nøyaktigheten øker med 37% med SPS og 31% med PPP når vi legger til Galileo med GPS og GLONASS. Bidraget til BeiDou er ikke spesielt bra i Ås, her øker nøyaktigheten med 6% med SPS og minker med hele 51% med PPP hvor da vi oppnår høyere nøyaktighet med kombinasjonen med kun GPS og GLONASS. Får vi inn QZSS-signaler minker nøyaktigheten med 600% dersom vi tar det med i prosesseringen.

Ser vi resultatene globalt i tabell 5.1, kan vi se at bidraget til Galileo gir en høyere nøyaktighet med 5% og 9% rundt i verden. Bidraget til BeiDou viser at vi oppnår 8% høyere nøyaktighet dersom vi bruker GPS, GLONASS og Galileo og legger til BeiDou i områder hvor vi har god BeiDou-dekning.

System	Kinematisk			Statisk	
	Ås			God BeiDou dekning	Dårlig BeiDou dekning
	SPS	PPP	DGNSS	PPP	PPP
GPS	3.10	0.32	0.05	0.08	0.04
GLO	3.25	1.11	1.37	0.23	0.18
GAL	3.78	0.93	0.64	0.15	0.07
BDS	N/A	N/A	N/A	0.15	0.80

Tabell 5.2: Samlede resultater av nøyaktigheten til hvert system alene

Fra tabell 5.2 kan vi se at GPS er det beste systemet dersom det skulle vært aktuelt å bruke noen av systemene alene. Galileo viser seg bedre enn GLONASS med unntak med SPS. BeiDou viser seg like sterk som Galileo i områder med god BeiDou-dekning, ikke langt unna GPS sin nøyaktighet.

Kombinasjoner	Kinematisk		Statisk	
	Ås		God BeiDou dekning	Dårlig BeiDou dekning
	SPS	PPP	PPP	PPP
GPS + GLO → GPS + GAL	23%	-72%	8%	0.4%
GPS + GLO → GPS + BDS	-22%	-83%	5%	-24%
GPS + GLO → GAL + BDS	-17%	-446%	-82%	-244%
GPS + GLO → GLO + GAL	15%	-139%	-85%	-165%
GPS + GLO → GPS + GLO + GAL	37%	31%	13%	9%
GPS + GLO → GPS + GLO + BDS	0.4%	-65%	12%	0.5%

Tabell 5.3: Økningen i prosent mellom ulike kombinasjoner for å teste Galileo og BeiDou mot GPS og GLONASS

Fra tabell 5.3 ser vi at kombinasjonen GPS og GLONASS egentlig er generelt bra. Skulle vi erstattet GLONASS med enten Galileo eller BeiDou, viser det seg at i Ås er det kun med Galileo SPS at vi oppnår høyere nøyaktighet. Med bare Galileo og BeiDou minker nøyaktigheten med hele 466% med PPP løsning, men bare med 17% med SPS. Et overraskende funn er dersom vi erstatter GPS med Galileo i kombinasjonen med GLONASS, da øker nøyaktigheten med 15% med SPS.

Bruker vi Galileo eller BeiDou i kombinasjon med GPS rundt i verden, viser det seg at vi oppnår en høyere nøyaktighet enn ved kombinasjonen GPS og GLONASS. I områder med god BeiDou-dekning gir kombinasjonen GPS og BeiDou 29% bedre resultater enn med GPS og GLONASS i områder med dårlig dekning. Generelt ser vi også at GPS og GLONASS har en høyere nøyaktighet. Når vi legger til BeiDou med GPS og GLONASS, øker nøyaktigheten med 11,5% mer dersom man er i et område med god BeiDou-dekning.

Helt i starten av oppgaven hørte vi at EUs transportkommissær Jacques Barrot, lofte at med Galileo vil vi oppleve nøyaktighet på en meter. Han presiserer ikke noe mer hvor vi vil oppleve det, men til offentligheten kan det da antas å være i en kartapplikasjon på en mobiltelefon. Foreløpig ser vi ikke at nøyaktigheten er så høy, men det blir mye høyere nøyaktighet enn en meter dersom vi etterprosesserer.

5.3. Videre arbeid

- En ny liknende undersøkelse av hvor høy nøyaktighet systemene har og ulike kombinasjoner av systemene etter at Galileo og BeiDou er fullt operative.
- Med Android-telefoner er det mulig å logge rådata. Dette vil gjøre det mulig for etterprosessing også med DGNSS. Kan man oppleve nøyaktighet på centimeters nivå med en mobiltelefon? Og hvor mye øker nøyaktigheten med SPS med en mobiltelefon?
- Se på nyere metoder for å oppnå høyere nøyaktighet rundt atmosfæriske effekter. Blant annet har vi en modell, NeQuick-G, som er en kringkastet ionosfæremodell som man kan implementere.

Bibliografi

1. Barrot, J. (2007, 30. November). *EU sier ja til romprosjektet Galileo*. Dagbladet. Tilgjengelig fra: <https://www.dagbladet.no/nyheter/eu-sier-ja-til-romprosjektet-galileo/66411361>.
2. Cabinet-Office. (u.å.). *Quasi-Zenith Satellite Orbit (QZO)*. Tilgjengelig fra: <http://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>.
3. EoPortal. (u.å.). *IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System)*. Tilgjengelig fra: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/irnss> (lest 11.05.2019).
4. ESA, A. (2011). *Galileo Space Segment*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Space_Segment (lest 11.05.2019).
5. ESA, B. (2014). *GPS Signal Plan*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan (lest 11.05.2019).
6. ESA, C. (2019). *Galileo Signal Plan*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan.
7. ESA, D. (2018). *CDMA FDMA Techniques*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques (lest 11.05.2019).
8. ESA, E. (2015). *GPS Performances*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Performances (lest 11.05.2019).
9. ESA, F. (2019). *Constellation Information*. Tilgjengelig fra: <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information> (lest 11.05.2019).
10. ESA, G. (2014). *Carrier Phase Wind-up Effect*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Carrier_Phase_Wind-up_Effect (lest 12.05.2019).
11. ESA, H. (2013). *Tropospheric Delay*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Tropospheric_Delay (lest 12.05.2019).
12. European-Commission. (u.å.). *The history of Galileo*. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history_en (lest 11.05.2019).
13. Garmin. (2019). *vivoactive® HR*. Tilgjengelig fra: <https://buy.garmin.com/nb-NO/NO/p/538374#specs> (lest 11.05.2019).
14. Glonass-iac, A. (u.å.). *GLONASS HISTORY*. Tilgjengelig fra: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/> (lest 11.05.2019).

15. Glonass-iac, B. (u.å.). *BEIDOU GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM*. Tilgjengelig fra: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php> (lest 11.05.2019).
16. Glonass-iac, C. (2019). *BEIDOU constellation status*. Tilgjengelig fra: <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/index.php> (lest 11.05.2019).
17. Hoffmann-Wellenhof, L., Wasle. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite Systems*.
18. Kartverket, A. (2018). *Referanserammer for Noreg*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/Posisjonstjenester/bruke-referanserammer/Referanserammer-for-Noreg/> (lest 11.05.2019)..
19. Kartverket, B. (2018). *NN2000*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/NN2000> (lest 11.05.2019).
20. Kartverket, C. (2009). *KOORDINATBASERTE REFERANSESYSTEMER*. Tilgjengelig fra: https://www.kartverket.no/globalassets/standard/bransjestandarder-utover-sosi/koo_referansesyst.pdf (lest 11.05.2019).
21. Kartverket, D. (2019). *CPOS*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/posisjonstjenester/cpos/> (lest 11.05.2019).
22. Kartverket, E. (2018). *ETPOS*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/Posisjonstjenester/ETPOS/> (lest 11.05.2019).
23. NASA, A. (2012). *Global Positioning System History*. Tilgjengelig fra: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html (lest 11.05.2019).
24. NASA, B. (2014). *Global Positioning System*. Tilgjengelig fra: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/policy_pnt.html (lest 11.05.2019).
25. Ophaug, V. (2018). *GMGD300: Geodesi Hovedkurs, Høyder*.
26. Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy 2nd Edition*.
27. Shi, C. (2014). *Precise orbit determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX network*. Scientific Reports. Tilgjengelig fra: <https://www.nature.com/articles/srepo4692>.
28. Trimble. (u.å.). *Antenna Phase Centers*. Tilgjengelig fra: https://www.trimble.com/OEM_ReceiverHelp/V4.44/en/AntennaPhaseCenters.html (lest 12.05.2019).
29. Øvstedal, O. (2017). *Satellittgeodesi*. Ås, Universitetet for miljø- og biovitenskap (Forelesning 14.03.2017).



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway